

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

1 16



Главный редактор
академик, доктор физико-математических наук **А.Ф.Андреев**

Заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батурич**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A. Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T. Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Куниин** (**E. Koonin**, США), академик, доктор геологоминералогических наук **Н.П.Лаверов**, доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Ленин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор физико-математических наук **Л.Д.Фаддеев**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Национальный парк «Приэльбрусье». Панорама Большого Кавказа. См. в номере: **Газаев М.А., Мурзамуратова Л.С., Статова Ю.Г.** *Заповедные маршруты Кабардино-Балкарии.*

Фото Т.С.Клювиткиной

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Детектор Super-Kamiokande. Идет замена неисправных фотоумножителей. См. в номере: **Герштейн С.С., Куденко Ю.Г.** *Лауреаты Нобелевской премии 2015 года по физике — АМакдональд и Т.Каджита.*

Публикуется с разрешения Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), the University of Tokyo



В НОМЕРЕ:**3** **Волинский А.Л.****Стареют ли полимеры?**

Крупномасштабная подвижность в стеклообразных полимерах совсем не «заморожена», как полагали ранее. В последние десятилетия был обнаружен целый комплекс молекулярных перестроек, характерных для данного состояния полимеров.

12 **Рабинович А.Б., Шепич Я.****Метеорологические цунами: что это такое?**

Метеорологические цунами регулярно наблюдаются во многих районах Мирового океана, порой принимая катастрофический характер, подобно обычным волнам цунами. Но вызываются они не землетрясениями, извержениями вулканов или подводными оползнями, а атмосферными процессами.

27 **Гельфанд М.С.****Геном неандертальца: открытые вопросы**

Благодаря расшифрованным геномам неандертальцев мы буквально «читаем» эволюционную историю нашего вида. Прогресс в этой области науки напоминает наступление танковыми клиньями: за публикацией каждого нового генома следует ряд работ, в которых уточняются детали и проводятся дополнительные сопоставления. Открытых вопросов, однако, еще достаточно.

36 **Васильев С.В., Веселовская Е.В., Григорьева О.М., Пестряков А.П.****Краниология Франца Галля**

В Музее человека в Париже хранится череп знаменитого анатома, основателя френологии Ф.И. Галля, который был им завещан науке. Антропологическое исследование черепа (измерение по классической краниологической программе, описание его морфологических особенностей) и научная графическая реконструкция внешности ученого позволили создать его профильный портрет.

43 **Газаев М.А., Мурзамуратова Л.С., Статовая Ю.Г.****Заповедные маршруты Кабардино-Балкарии****49** **Герштейн С.С., Зеленый Л.М., Сон Э.Е.****Владимир Фортв: уравнение состояния в науке****59** **ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2015 ГОДА****Герштейн С.С., Куденко Ю.Г.****По физике – А.Макдональд, Т.Каджита (59)****Жарков Д.О., Торгашева Н.А.****По химии – Т.Линдаль, П.Модрич, А.Санджар (65)****Сергиев В.П.****По физиологии или медицине – У.С.Кэмпбелл, С.Омура, Ю.Ту (71)****76** **Новости науки**

Высокочувствительный метод газоанализа. Цхай С.Н. (76). Укroшение плазмы на установке С2-У (77). Генофонд славян (78). Новый отряд паукообразных в фауне бывшего СССР. Михайлов К.Г. (79). Что скрывают древнейшие курганы Тывы? Рукавишников И.В., Гладченков А.А. (80). Первая находка архаичного плезиозавра из среднеюрских отложений Поволжья. Зверьков Н.Г. (81).

Рецензии**82** **Корякин В.С.****Удивительная книга о первопроходцах Арктики**

(на кн.: Первоначальное заселение Арктики человеком в условиях меняющейся природной среды: Атлас-монография / Отв. ред. В.М.Котляков, А.А.Величко, С.А.Васильев)

85 **Новые книги****Времена и люди****88** **Минина Е.Л.****Минералогическая коллекция и ее создатели**

CONTENTS:

- 3 Volynsky A.L.**
Do Polymers Aging?
Large-scale mobility in glass-like polymers is not «frozen out» at all, as was thought earlier. In recent decades a whole complex of molecular rearrangements typical for this state of polymers was discovered.

- 12 Rabinovich A.B., Šepić J.**
**Meteorological Tsunami:
 What Is That?**
Meteorological tsunamis are regularly observed in many regions of the ocean, sometimes becoming catastrophic, like conventional tsunamis. Unlike them, though, they are caused not by earthquakes, volcano eruptions or underwater landslides, but by atmospheric processes.

- 27 Gelfand M.S.**
**Neandertal Genome:
 Pending Questions**
Due to sequencing of Neandertal genome we literally can «read» evolutionary history of our species. Advances in this field remind offensive by tank wedges: after publishing of every new genome follows a series of papers elaborating details and providing additional comparisons. But there is still enough of pending questions.

- 36 Vasiliev S.V., Veselovskaya E.V.,
 Grigorieva O.M., Pestryakov A.P.**
Craniology of Franz Gall
The skull of a famous anatomist, founder of phrenology F.Y.Gall, which was bequeathed by him to science, is now kept in Museum of Man in Paris (France). Anthropological research of this skull (measurement according to the classical craniological program, description of its morphological traits) and scientific graphical reconstruction of the appearance of the scientist allows create his profile portrait.

- 43 Gazaev M.A., Murzamuraeva L.S.,
 Statovaya Yu.G.**
**Precious Routes
 of Kabardino-Balkaria**

- 49 Gershtein S.S., Zelenyi L.M., Son E.E.**
**Vladimir Fortov:
 The Equation of State in Science**

- 59 NOBEL PRIZE WINNERS OF 2015**
Gershtein S.S., Kudenko Yu.G.
In Physics: A.McDonald, T.Kajita (59)
Zharkov D.O., Torgashova N.A.
**In Chemistry: T.Lindahl, P.Modrich,
 A.Sancar (65)**

- Sergiev V.P.**
**In Physiology or Medicine:
 W.Campbell, S.Omura, Y.Tu (71)**

- 76 Science News**
 Highly Sensitive Gas Analysis Method. **Tskhai S.N.** (76). Taming of Plasma in S2-U Installation (77). Gen Pool of Slavs (78). A New Arachnida Order in the Fauna of the Former USSR. Mikhailov K.G. (79). What Do the Most Ancient Mounds of Tuva Hide? **Rukavishnikova I.V., Gladchenkov A.A.** (80). The First Find of Archaic Plesiosaurus from Middle Jurassic Deposits of Volga Region. **Zverkov N.G.** (81).

- 82 Book Reviews**
Koryakin V.S.
**Amazing Book about Pioneers
 of Arctic**
 (on book: Initial Human Colonization of the Arctic in a Changing Environment: Atlas-Monograph / Managing Editors V.M.Kotlyakov, A.A.Velichko, S.A.Vasiliev)

- 85 New Books**

- 88 Times and People**
Minina E.L.
**Mineralogical Collection
 and Its Creators**

Стареют ли полимеры?

А.Л.Волынский

Главная особенность полимеров, принципиально отличающая их от всех других веществ, — цепное строение молекул. В указанном обстоятельстве кроются физические причины уникального свойства полимерных молекул (макромолекул) — гибкости, т.е. способности изменять свою форму (конформацию) под действием внешнего напряжения и/или теплового движения. Это качество превратило изучение полимеров в давно сформировавшуюся самостоятельную область науки, поскольку гибкость макромолекул определяет практически все их характеристики. Прежде чем мы перейдем к анализу тех или иных свойств полимеров и обусловленных ими процессов, необходимо хотя бы примерно представить себе, как возникает и реализуется гибкость полимерных молекул.

Мера гибкости — сегмент

Итак, рассмотрим, что происходит с молекулой, если мы будем увеличивать число составляющих ее групп, связывая их в цепочку. На рис.1,*а* показана цепочка, состоящая всего из трех атомных групп. Пусть для простоты роль последних играют углеводородные радикалы $-\text{CH}_3$, тогда молекула из двух таких групп будет хорошо известным углеводородом этаном (C_2H_6), а если к ней вместо одного из атомов водорода присоединится третья группа, получится пропан



Александр Львович Волынский, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — структура и механика полимеров. Постоянный автор журнала «Природа».

Ключевые слова: полимеры, стеклообразное состояние, тепловое старение.
Key words: polymers, glassy state, thermal aging.

(C_3H_8). Оказывается, что две соседние $\text{C}-\text{C}$ связи образуют в пропане фиксированный угол 109° . Какие бы силы к этой молекуле ни прикладывались, данный угол изменить невозможно, если только не разрушить молекулу совсем, разбив ее на независимые части. Однако в остальных направлениях, которые не нарушают угол в 109° , изменять положение в пространстве последующему фрагменту молекулы по отношению к предыдущему вполне разрешается.

Другими словами, две концевые CH_3 -группы в молекуле пропана могут вращаться относительно друг друга, сохраняя угол в 109° . Траектория этого вращения обозначена в виде окружности пунктиром на рис.1. Теперь начнем увеличивать число звеньев, присоединяя новый мономер вместо последнего атома H , и попробуем про-

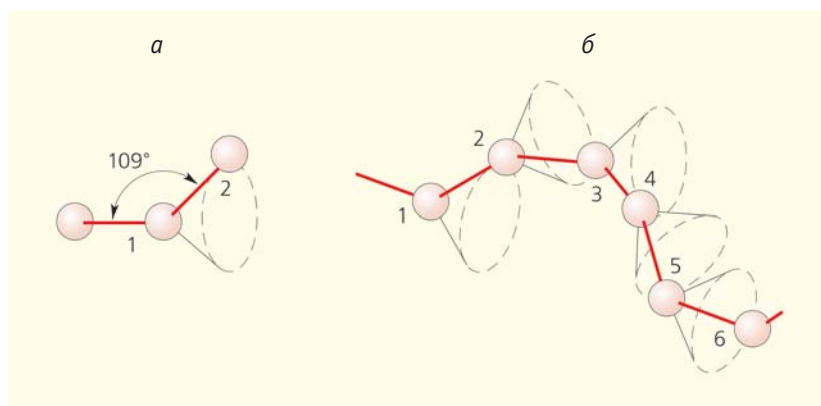


Рис.1. Схематическое изображение молекулы углеводорода пропана (*а*) и фрагмента углеводородной цепи, содержащей шесть CH_2 -групп (*б*).

следить, как будет изменяться положение в пространстве n -й группы относительно первой (номера групп отмечены на рис.1). Нетрудно увидеть без каких-либо расчетов, что по мере удаления звеньев от первого звена, взятого нами за начало отсчета, т.е. по мере увеличения их номера, количество положений в пространстве удаленного звена будет непрерывно возрастать — каждое следующее звено в цепи будет получать все большую свободу перемещений относительно первого звена. В конце концов наступит такой момент, когда увеличение числа звеньев цепи приведет к ситуации, при которой положение в пространстве звена №1 никак не будет влиять на положение в пространстве звена № n . Как бы мы ни вращали первое звено, на положении n -го звена это никак не отразится. Физики называют эту ситуацию утратой корреляции в расположении звеньев цепи, а фрагмент цепи длиной n звеньев — сегментом цепи.

Чем больше сегмент данного полимера, или (что то же) чем длиннее фрагмент цепи, который мы определили в качестве сегмента, тем менее гибким (и тем более жестким) называют данный полимер. Оказывается, при механическом воздействии на полимер его деформация, которая, очевидно, связана с перемещением макромолекул внутри материала, происходит в основном за счет движения мобильных элементов именно в виде сегментов. Такого рода сегментальное движение — самое характерное и одновременно уникальное молекулярное движение, присущее исключительно полимерам благодаря гибкости их макромолекул.

Однако сегментальное строение полимеров — принципиально важный, но не единственный фактор, определяющий, как они реагируют на воздействие. Все линейные аморфные полимеры могут находиться по крайней мере в двух важнейших состояниях: стеклообразном и высокоэластическом. Каждое из этих состояний находит свою область практического использования. Высокоэластические (каучукоподобные) полимеры служат основой для многотоннажного производства автомобильных, авиационных и велосипедных шин; без них невозможно обойтись при создании разного рода поглотителей вибрации, уплотнителей для монтажа стекол в транспорте и жилых домах и при решении множества других, менее масштабных задач, ставящих целью сделать нашу жизнь более комфортной. Не менее популярны и полимеры, находящиеся в стеклообразном состоянии: на их базе производят органические стекла, разного рода композиционные материалы для корпусов, например, холодильников, для многих деталей авиалайнеров, автомобилей и т.д. и т.п.

Возникает вопрос: а в чем, собственно, разница между стеклообразным и каучукоподобным состоянием полимера, состоящего из одних и тех

же сегментов? Иначе говоря, как и почему конкретный полимер может превратиться из органического стекла в каучук и наоборот?

Свободный объем и температура стеклования

Для ответа на этот вопрос нам опять необходимо вспомнить некоторые особенности молекулярного движения в полимерах. При любом воздействии (механическом, тепловом, электрическом и др.) на твердое тело последнее реагирует на это воздействие некими молекулярными перегруппировками, в результате чего изменяются его геометрические размеры, а следовательно, и структура. Но длинные молекулярные цепочки полимеров не могут перемещаться целиком — так, как это делают молекулы низкомолекулярных веществ. В силу гибкости макромолекул при механическом и/или температурном воздействии полимерная молекула отвечает на него более сложным образом. Так, под действием механической силы в полимере, находящемся в каучукоподобном состоянии, будут двигаться значительные (протяженные, громоздкие) участки макромолекул, которые мы выше определили как сегменты. Но, оказывается, это не единственная особенность молекулярного движения в полимерах. Сегментальная подвижность носит так называемый кооперативный характер [1]. Это означает, что при разного рода воздействиях происходит движение (перемещение) не просто отдельных сегментов, а неких их групп. Разумеется, для такого «группового» молекулярного движения внутри полимера должно возникнуть достаточное пространство, которое называют свободным объемом. Свободный объем характерен для любых твердых и жидких тел, так как молекулы в них не могут быть упакованы абсолютно плотно, результатом чего становится наличие неких промежутков между молекулами, суммарный объем которых и называют свободным. Тепловое движение, естественно, сильнее всего влияет на эти промежутки: чем интенсивнее молекулярное движение (т.е. чем выше температура), тем больше свободный объем твердого или жидкого тела, расширяющегося при этом. Когда мы измеряем свою температуру, мы видим, как ртуть ползет в капилляре термометра, заметно увеличивая свой объем. Этот рост по сути и есть изменение свободного пространства. Так вот, для реализации сегментального движения в полимере необходимо, чтобы свободный объем составлял не менее 2.5% от общего. Для всех линейных аморфных полимеров существует температура, при которой достигается данная величина. Выше этой температуры, именуемой температурой стеклования (T_g), полимер находится в каучукоподобном состоянии, ниже — в стеклообразном.

Что пишут в учебниках

Механическое поведение стеклообразного полимера обычно иллюстрируют с помощью кривой растяжения (типичная показана на рис.2). Такая кривая содержит три главных участка: так называемый упругий участок; область плато, где развивается шейка (резкое сужение поперечного сечения); и участок, где происходит однородная деформация полимера, перешедшего в шейку. Очень важная характеристика — максимум на кривой растяжения полимера. Этот максимум, получивший название предела текучести (yield stress), соответствует началу процесса ориентации стеклообразного полимера, который выражается в возникновении резкого сужения. Краткое хрестоматийное описание поведения таких полимеров, подвергнутых деформации до указанных величин, выглядит следующим образом [2]. Сначала полимер деформируется упруго, когда просто увеличиваются межмолекулярные расстояния (форма образца при этом сохраняется, а размеры полностью восстанавливаются после снятия нагрузки). Максимум на кривой растяжения соответствует возникновению в материале сужения (шейки), и на втором участке происходит превращение исходного полимера в материал шейки. Теперь растянутый стеклообразный полимер уже самопроизвольно не сожмется. Однако, если его нагреть выше T_g , сегменты обретут способность к тепловым перемещениям и образец вернется к практически исходной длине. Отметим, что, согласно [2], крупномасштабное (сегментальное) движение в стеклообразном полимере заморожено и не реализуется в температурном интервале ниже его T_g .

Фотография участка полиэфирного волокна в области его перехода в шейку представлена на рис.3,а. Хорошо видно отмеченное выше сужение полимерного образца под действием растягивающего напряжения. На рис.3,б схематически изображена молекулярная структура полимера в материале шейки (внизу) и в исходном, недеформированном, полимере (вверху). Как следует из этого рисунка, в результате растяжения полимер приобретает молекулярную ориентацию (упорядоченное взаимное расположение макромолекул). Это очень важное обстоятельство, поскольку изменения взаимного расположения и конформации макромолекул достаточно для резкого изменения свойств полимера в целом. Полимер в результате простого растяжения существенно увеличивает прочность, жесткость (модуль упругости), предел текучести и другие эксплуатационные характеристики. Такого рода растяжение получило в технологии название «ориентационное вытягивание» и широко используется в практике изготовления синтетического волокна. Но вечны ли достигнутые этим способом изменения параметров? И тут мы уже выходим за рамки учебников.

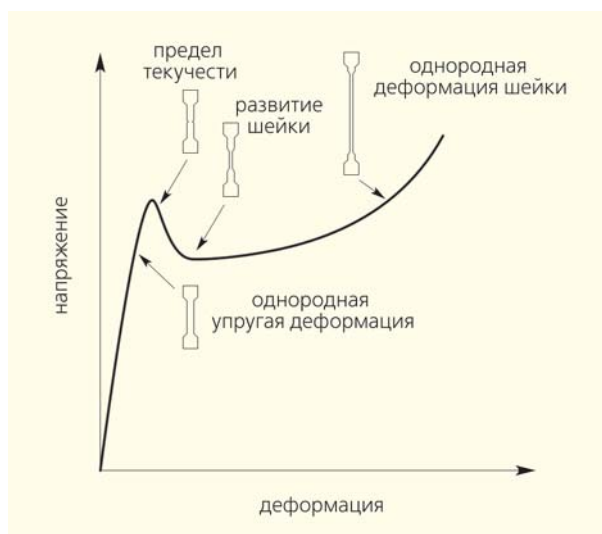


Рис.2. Кривая растяжения стеклообразного полимера.

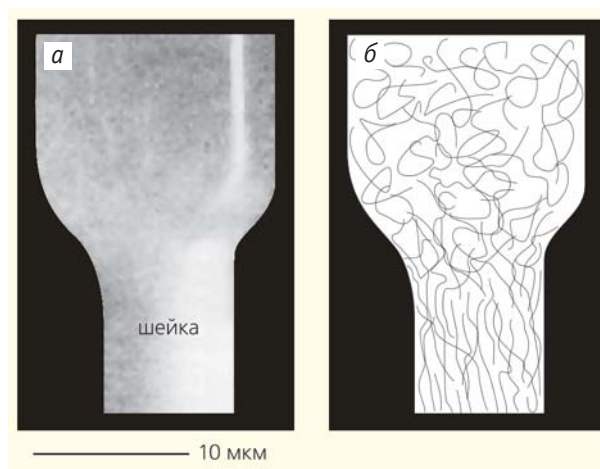


Рис.3. Фотография участка полиэфирного волокна в области его перехода в шейку под действием растягивающего напряжения (а) и схематическое изображение молекулярной структуры этого фрагмента (б).

Тепловые секреты старения

В повседневной жизни термин «старение» обычно относят к свойствам живых органических систем. Энциклопедии определяют это явление так: «старение животных и человека — последовательное приближение старости, т.е. периода в индивидуальном развитии, наступающего после периода зрелости и сопровождающегося в той или иной мере угнетением жизненных функций организма. Старение — закономерно наступающий процесс, следствие непрерывных биологических изменений, составляющих процесс жизни».* К нашему

* См., например, статью «Старение» в Популярной медицинской энциклопедии (М., 1961. С.1029).

большому сожалению, старение живых организмов необратимо, и хорошо известно, чем оно завершается.

Однако, оказывается, и для синтетических стеклообразных полимеров существуют процессы изменения свойств во времени, которые также обозначают общим термином «старение» (aging) [3]. Чтобы разобраться в сходстве и различиях двух указанных выше явлений, кратко напомним, как формируется стеклообразное состояние полимеров.

Рассмотрим зависимость удельного объема аморфного полимера от температуры (рис.4). Начнем с каучукообразного состояния, постепенно понижая температуру полимера, и проследим, что будет происходить с удельным объемом последнего.

Понижение температуры будет сопровождаться сокращением удельного объема полимера, поскольку охлаждение приводит к уменьшению объема любых твердых тел. Как мы уже знаем, молекулярное движение в полимерах существенно отличается от соответствующего процесса, наблюдаемого в низкомолекулярных твердых телах. В силу того что макромолекулы представляют собой длинные цепочки, уменьшение объема полимера будет происходить за счет не просто сближения отдельных молекул, но и изменения формы этих цепочек. Другими словами, в силу гибкости макромолекул изменение объема полимера обусловлено движением и взаимным смещением достаточно протяженных участков макромолекул — сегментов, что требует для реализации сегментального движения (его иногда называют крупномасштабным) определенного пространства.

При относительно высоких температурах (в области каучукоподобного состояния) макромолекулы полимера, а точнее, их конформации находятся в равновесном состоянии, так как доля

свободного объема и связанная с ним скорость молекулярных перегруппировок в нем достаточно высоки. По мере снижения температуры скорость молекулярных перегруппировок, естественно, падает, но остается достаточно высокой, чтобы полимер находился в состоянии, близком к термодинамическому равновесию. Такая ситуация сохраняется до тех пор, пока полимер не достигнет своей температуры стеклования. У каждого полимера T_c имеет свое собственное значение, однако при ее достижении любой полимер переходит из каучукоподобного состояния в стеклообразное (если мы понижаем температуру) и, наоборот, из стеклообразного в каучукоподобное — если мы ее увеличиваем.

При прохождении точки T_c вниз по температурной шкале вязкость системы резко возрастает, в связи с чем скорость молекулярных перегруппировок резко падает и дальнейшее охлаждение не дает возможности полимеру обеспечить равновесные конформации макромолекул. Полимер просто «не успевает» достичь равновесного состояния. На рис.4 эта смена режима сопровождается резким изменением наклона зависимости удельного объема от температуры. Пунктиром отмечена траектория снижения удельного объема полимера при уменьшении температуры в случае, если бы полимер «успевал» обеспечить равновесные конформации. Данные рис.4 позволяют сделать два вывода: во-первых, регистрируя зависимость удельного объема от температуры, мы можем измерить T_c любого аморфного полимера; во-вторых, пройдя через T_c , полимер оказывается в термодинамически неравновесном состоянии. Это очень важное обстоятельство, поскольку любая термодинамическая система, находящаяся в неравновесном состоянии, «стремится» любым способом достичь равновесия или хотя бы приблизиться к нему. В то же время, как было отмечено выше, сегментальное молекулярное движение, ответственное за динамику полимера, ниже T_c запрещено [2]. Как же быть полимеру в этом случае?

Стремление стеклообразного полимера, полученного из расплава/раствора в термодинамически неравновесном состоянии, обрести устойчивость таково, что даже отмеченный выше запрет крупномасштабного движения не отменяет неких молекулярных перестроек. Эти перестройки, все же протекающие в нем, конечно, сильно замедлены по сравнению с соответствующими процессами в каучукоподобных полимерах. Тем не менее, хотя и достаточно медленно, они «движут» полимер по направлению к его равновесному состоянию. Именно эти процессы получили название процессов *физического, или теплового, старения*. Поскольку в неравновесном состоянии находятся лишь стеклообразные полимеры, процессы физического старения характерны только для полимерных стекол. В самом общем виде это явление включает в себя самопроизвольно идущие во вре-

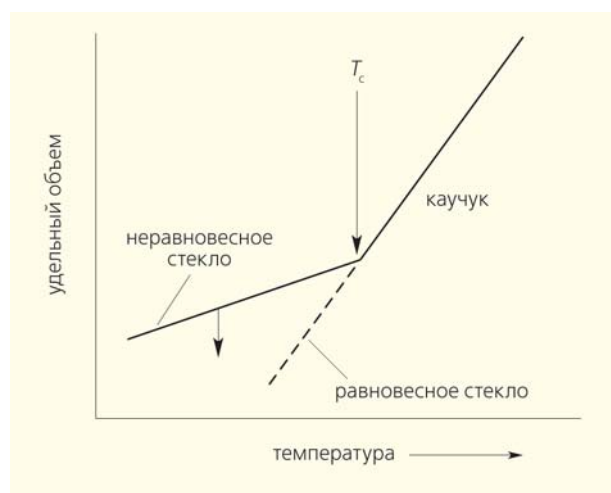


Рис.4. Схематическое изображение температурной зависимости удельного объема аморфного полимера.

мени молекулярные перегруппировки, приводящие к заметному изменению всего комплекса их свойств (плотности, энthalпии, проницаемости, предела текучести, температуры стеклования и других динамических и статических механических характеристик). Указанные изменения происходят самопроизвольно во времени в температурной области стеклообразного состояния полимера.

Что конкретно стареет?

Рассмотрим некоторые типичные проявления процессов физического старения полимерных стекол. Оказывается, что и при температурах существенно более низких, чем T_c аморфного полимера, в нем могут происходить молекулярные перестройки, приводящие к заметному изменению всего комплекса свойств. Прямым доказательством такого рода перестроек служит, в частности, спонтанное увеличение плотности во времени при старении свежеформованного, закаленного (резко охлажденного ниже T_c) аморфного полимера. Пример такого «уплотнения» представлен на рис.5 [4]: в процессе изотермического старения полимер заметно уменьшается в объеме, о чем однозначно свидетельствуют данные прямого измерения линейных размеров образца полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Как следует из рис.5, скорость уплотнения зависит от температуры, при которой идет старение: чем ближе она к T_c , тем выше эта скорость. Еще раз подчеркнем: изменения объема полимера в процессе его старения суть изменения его свободного объема. Полученный результат доказывает, что в процессе старения полимерных стекол участвуют термически активируемые молекулярные перестройки, а сам он может происходить при температурах ниже T_c полимера, т.е. в температурных пределах его стеклообразного состояния. Другими словами, в стеклообразном состоянии молекулярные перегруппировки не запрещены, а резко замедлены.

Процедуры омолаживания

Как мы уже отмечали, в биологических системах повернуть в обратную сторону процесс старения, к несчастью, невозможно. Что же касается стеклообразного полимера, то «омолодить» его очень просто. Чтобы осуществить омоложение (rejuvenation) состаренного полимера, достаточно всего

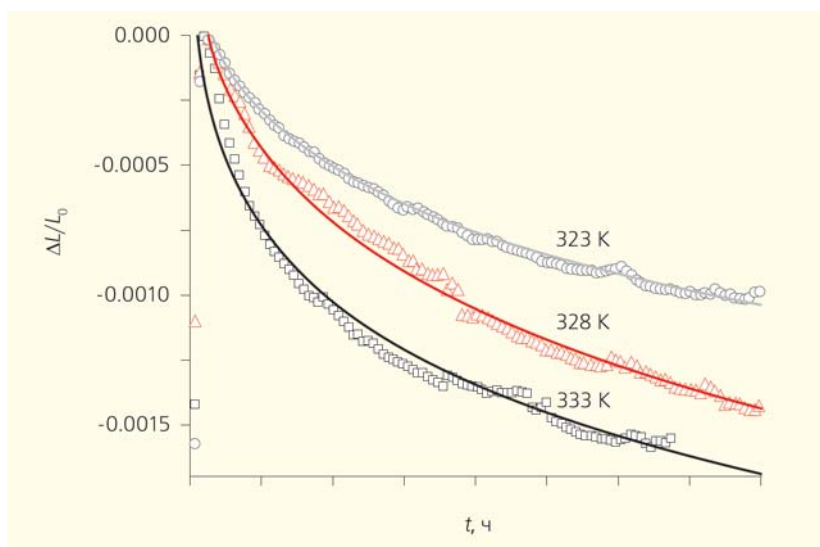


Рис.5. Зависимость относительного изменения линейных размеров ($\Delta L/L_0$) образцов ПЭТФ от времени старения (t) при постоянной температуре (цифры у кривых). Образцы ПЭТФ из расплава закаливали, опуская в ледяную воду, после чего нагревали их со скоростью $10 \text{ К}\cdot\text{мин}^{-1}$ до указанных температур, при которых и подвергали изотермическому отжигу (температура стеклования ПЭТФ $\sim 350 \text{ К}$) [4].

лишь нагреть его выше T_c , и последующее охлаждение полимера ниже T_c вновь «запустит» процесс старения по описанным выше причинам (см. рис.4). И так можно провести сколько угодно циклов «тепловое (физическое) старение — омоложение», процессы которых, важно отметить, протекают равномерно и однородно во всем объеме аморфного полимера.

Самое удивительное состоит в том, что некий процесс старения можно «запустить», и не прибегая к нагреванию полимера выше его температуры стеклования. Этот «запуск» можно осуществить путем механического воздействия на полимер в температурном интервале его стеклообразного состояния. Указанное воздействие легко реализовать путем, например, одноосного сжатия или прокатки в температурном интервале ниже T_c полимерной пленки. На рис.6 схематически представлено устройство, позволяющее осуществить такое воздействие.

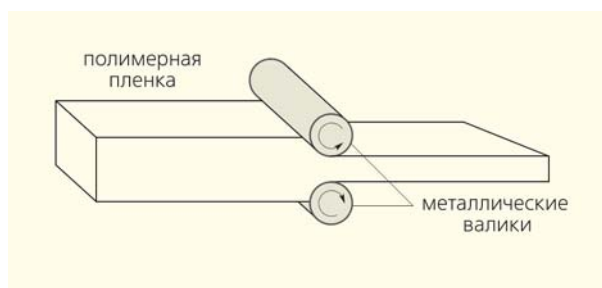


Рис.6. Схема устройства (вальцев), позволяющего осуществить прокатку полимерного образца.

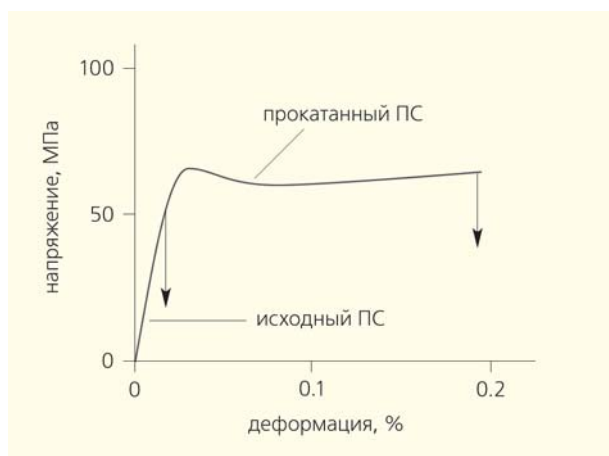


Рис. 7. Влияние прокатки на кривую растяжения полистирола (ПС) при комнатной температуре. Стрелками отмечены разрывные удлинения [5].

Если пленку «состаренного» стеклообразного полимера пропустить через указанное устройство, его свойства коренным образом изменяются. Проиллюстрируем это явление на примере такого популярного и хорошо изученного полимера, как полистирол (ПС, рис. 7). Из рисунка следует, что предварительное механическое воздействие (в данном случае прокатка) приводит к эффекту, аналогичному эффекту омоложения состаренного полимера путем его нагревания выше T_c с последующим резким охлаждением ниже T_c (закалкой). Действительно, механически «омоложенный» полимер практически не имеет предела текучести и последующей релаксации напряженного состояния. Хорошо известно, что ПС в условиях одноосного растяжения при комнатной температуре — довольно хрупкий материал, и его разрушение происходит при деформациях порядка 1–2% (уже на упругом участке

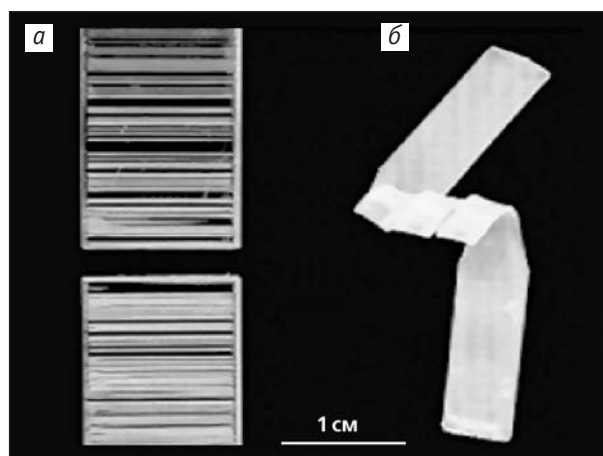


Рис. 8. Внешний вид пленок ПС после их деформации на воздухе при комнатной температуре. Исходный ПС (а); образец ПС, предварительно подвергнутый прокатке (б) [6].

кривой растяжения). Зато после механического воздействия ПС показывает пластичное поведение, и его разрывное удлинение при комнатной температуре достигает 30%.

Влияние механического воздействия на стеклообразный полимер можно обнаружить даже визуально. На рис. 8 представлены фотографии двух образцов ПС, механическое поведение которых характеризует рис. 7. Хорошо видно, что исходный ПС хрупок и действительно разрушается при растяжении на 1–2%. Разрушению предшествует интенсивное развитие поперечных сгущений и разрежений, которые служат зародышами магистральной трещины (рис. 8, а). Если же ПС предварительно подвергнуть деформации на вальцах (прокатке), он становится мутным, непрозрачным и его можно деформировать в любых условиях, вплоть до закатывания в трубку (рис. 8, б).

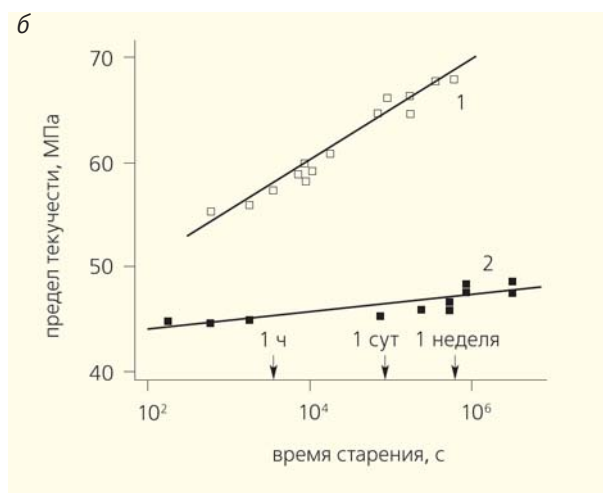
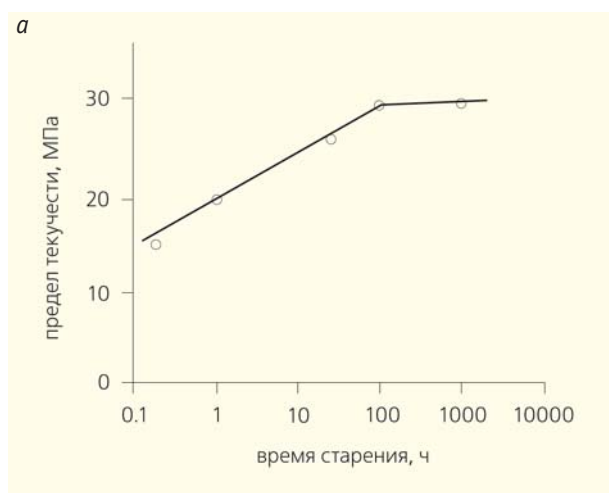


Рис. 9. Зависимость эволюции предела текучести во времени эпоксидной смолы, подвергнутой тепловой обработке при температуре выше T_c (а) [7] и для ПС (1) и поликарбоната (ПК) (2), подвергнутых предварительной прокатке (б) [6].

Отжиг деформированного полимера выше его T_c , так же как и для случая полимера, омоложенного нагреванием выше температуры стеклования с последующей закалкой, полностью возвращает все свойства полимера к исходному варианту и устраняет эффект механического «омоложения». Более того, механически «омоложенный» полимер самопроизвольно восстанавливает во времени свои исходные механические свойства без какого-либо отжига.

Итак, существуют два вида «омоложения» полимера, способные запускать механизм его старения. На рис.9 показана зависимость предела текучести от времени старения полимера, омоложенного путем его нагревания выше T_c (а) и путем механического воздействия при температуре ниже T_c (б). Хорошо видно, что в обоих случаях наблюдаются похожие процессы: самопроизвольно растет во времени предел текучести.

Возникает вопрос: лежат ли в основе этих двух видов старения одни и те же молекулярные процессы или же изменения свойств, происходящие во времени, обусловлены различными структурными перестройками? Поскольку внешние проявления эффектов старения, инициированные различными причинами, имеют определенное сходство (рис.9), этот вопрос стал предметом многочисленных дискуссий [7, 8].

О некоторых особенностях деформации

Ответ на сформулированный выше вопрос помогают найти данные структурных исследований. Как мы отмечали выше, процессы циклов «физическое старение — омоложение» при тепловой обработке протекают во всем объеме аморфного полимера. В то же время оказывается, что механическое воздействие на стеклообразный полимер вызывает деформацию, неоднородную по его объему. Дело не только в том, что в условиях одноосного растяжения в стеклообразном полимере возникает шейка и образец делится на две части — ориентированную и неориентированную (см. рис.3). Даже в том случае, когда полимер подвергают одноосному сжатию или прокатке (см. рис.6), его деформация развивается крайне неоднородно, хотя, конечно, в этих условиях шейка в нем и не возникает. Оказыва-

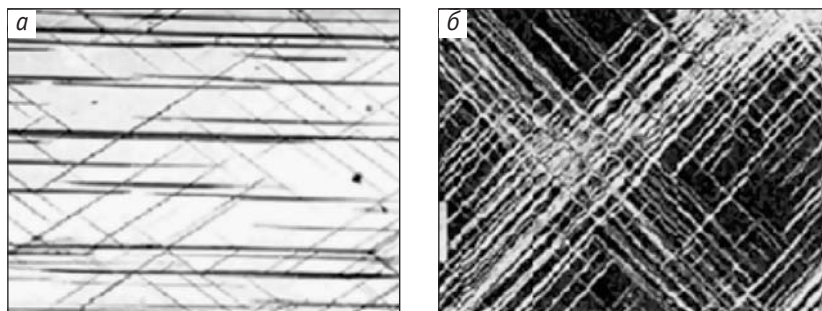


Рис.10. Микрофотографии полимерной пленки (ПЭТФ), подвергнутой действию постоянной растягивающей нагрузки ~0.7 от предела текучести (а) и тонкого среза ПС, подвергнутого деформации одноосного сжатия (б). Направление напряжения в обоих случаях вертикальное [9] (оптический микроскоп, увеличение $\times 1000$).

ется, в этих условиях деформированный полимер буквально насыщен некими неоднородностями, которые имеют выраженные границы раздела и поэтому прекрасно регистрируются различными методами исследования (рис.10).

Итак, деформация стеклообразного полимера развивается крайне неоднородно, независимо от того, каким образом прикладывается нагрузка. Деформированный полимер представляет собой композицию из двух компонентов: неориентированный исходный полимер (прозрачная часть образцов на рис.10, а, б) и некие включения в виде прямолинейных полос, развивающиеся нормально оси приложенного напряжения и/или под углом $45-50^\circ$ к нему. Как видно, состаренный полимер, омоложенный нагреванием выше T_c , существенно отличается от полимера, омоложенного с помощью механического воздействия. Однако нагревание полимера, содержащего включения типа представленных на рис.10, выше его T_c также приводит к полному исчезновению этих неоднородностей, и полимер приобретает свойства не состаренного материала. Важно отметить, что наблюдаемые на рис.10 включения в деформированный стеклообразный полимер давно и хорошо известны ученым-полимерщикам. Полосы, развивающиеся в направлении, нормальном действующему напряжению, называют крейзами, а прямоли-

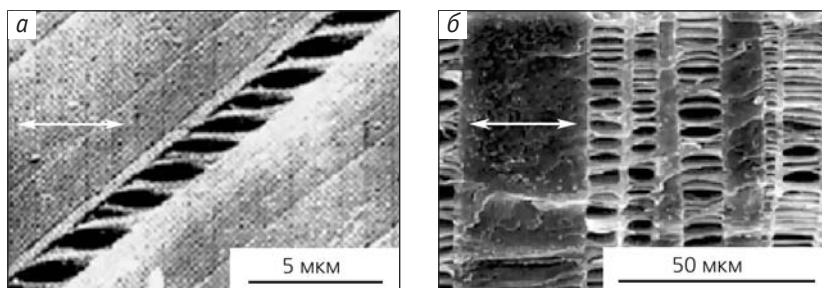


Рис.11. Электронные микрофотографии поверхности пленки ПС, в которой были реализованы полосы сдвига (а) [10], и полиэфирной пленки, содержащей крейзы (б) [9]. Белая стрелка показывает направление оси растяжения.

нейные структуры, возникающие под углом к приложенной силе, — полосами сдвига [9].

Несмотря на то что крейзы развиваются в деформированном полимере нормально оси растягивающего напряжения, а полосы сдвига — под углом (45–50°) к нему, эти образования имеют много общего. Как крейзы, так и полосы сдвига заполнены ориентированным полимером, который имеет форму тоненьких ниточек, соединяющих берега этих образований. Эти ниточки, разобщенные в пространстве, получили название фибрилл. Рисунок 11 иллюстрирует структуру такого рода. Здесь хорошо видна фибриллярная структура обоих образований. Различие заключается лишь в направлении развития полос сдвига и крейзов. Для нас принципиально подчеркнуть только одно обстоятельство: диаметр фибрилл в обоих случаях очень мал и составляет единицы или десятки нанометров.

Структурные перестройки старения

Возвращаясь к процессу старения механически омоложенного полимера, подчеркнем, что он происходит при температуре существенно более низкой, чем T_c . На рис.12 представлены кривые растяжения ПС, полученные при комнатной температуре через различные промежутки времени после механической обработки (омоложения) образца. Хорошо видно, что во времени появляется и начинает расти предел текучести, а уже через 48 ч после прокатки ПС восстанавливает при комнатной температуре все свои исходные свойства, в том числе и способность разрушаться при малых деформациях. Восстановление свойств полимера сопровождается полным исчезновением отмеченных выше структурных элементов, приносимых в него механичес-

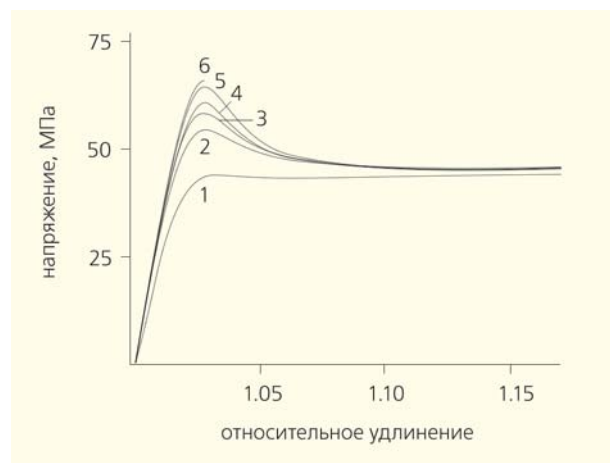


Рис.12. Кривые растяжения образцов ПС при комнатной температуре через различные промежутки времени после их обработки прокаткой. Время после обработки: 1 мин (1); 0.5 ч (2); 2 ч (3); 5 ч (4); 19 ч (5); 48 ч (6) [6].

ким воздействием (полос сдвига и/или крейзов). Как же исчезают границы раздела (т.е. как происходит залечивание) полос сдвига и крейзов при температуре, удаленной в область низких температур от T_c полимера на многие десятки градусов?

Залечивание (healing) поверхностей раздела в полимерах — давно и хорошо изученное явление [11]. Когда две плоские поверхности одного и того же полимера приводят в контакт, межфазная граница между ними обычно постепенно исчезает и материал становится монолитным. Очень существенно, что явление монолитизации наблюдается только в том случае, когда приводят в контакт полоски полимера, находящиеся выше их T_c , т.е. в высокоэластическом состоянии, в котором резко облегчена крупномасштабная молекулярная подвижность. Сегменты полимера диффундируют через границу раздела, образуют так называемую сетку зацеплений и в конце концов полностью залечивают эту границу. Хорошо известно, что для предотвращения указанного процесса резинотехнические изделия при хранении опудривают тальком. Частицы талька создают препятствия для плотного контакта полимерных поверхностей и тем самым предотвращают процесс их залечивания.

Тем не менее в случае старения полимера, подвергнутого механическому воздействию, залечивание границ раздела крейзов и полос сдвига происходит самопроизвольно при температурах, на десятки градусов более низких, чем T_c исходного недеформированного полимера (рис.12), где, казалось бы, сегментальная подвижность не может быть реализована [2]. Как такое возможно?

Размер имеет значение

Итак, возникает очередное противоречие. Действительно, с одной стороны, происходит самопроизвольное залечивание поверхностей раздела (рис.12), а с другой — оно идет при температурах, на много десятков градусов ниже T_c . Разрешить это противоречие позволяет удивительное открытие, сделанное в середине 90-х годов прошлого века. Важнейшая характеристика полимера — его температура стеклования — оказалась непостоянной величиной. Хотя из всех справочников мы узнаем, что T_c , например, полистирола составляет $\approx 100^\circ\text{C}$, на самом деле это далеко не всегда так. Приводимая в справочниках величина относится к объемному, массивному образцу полимера. Если же этот полимер измельчить до наноразмера, ситуация решающим образом изменяется.

На рис.13 представлена зависимость понижения T_c ПС от размера частиц, до которых этот полимер был измельчен. Хорошо видно, что, как только полимер измельчается до наноразмеров, его T_c начинает стремительно понижаться. Как следует из рис.13, 100-нанометровые частицы ПС имеют T_c на 60°C более низкую, чем блочный по-

лимер. Напомним, что диаметр фибрилл, заполняющих крэйзы и полосы сдвига в стеклообразном полимере, который подвергнут механическому воздействию, составляют единицы—десятки нанометров. Таким образом, «начинка» полос сдвига и крэйзов оказывается в каучукоподобном состоянии и ничто не мешает ей залечивать свои границы раздела путем взаимной диффузии сегментов макромолекул.

Рассмотренные данные позволяют сделать следующие выводы. Существуют два принципиально различных вида физического старения. Первый из них происходит во всем объеме полимера и обусловлен процессами перехода в равновесное состояние закаленных полимерных стекол. Второй связан с релаксацией неравновесной структуры в неких дискретных зонах (полосах сдвига или крэйзах), приобретаемых полимером в процессе его неупругой деформации.

* * *

Итак, представления о стеклообразном состоянии полимеров как о состоянии, в котором крупномасштабная подвижность «заморожена», оказываются устаревшими. Исследования последних десятилетий демонстрируют нам целый комплекс молекулярных перестроек, характерных для стеклообразного состояния полимеров. В частности, неупругая деформация стеклообразного полимера сопровождается зарождением и развитием особых зон (полос сдвига), которые содержат ориентированный фибриллизированный материал, диспергированный до нанометрического уровня. Поскольку полимер в столь тонких слоях имеет пониженную

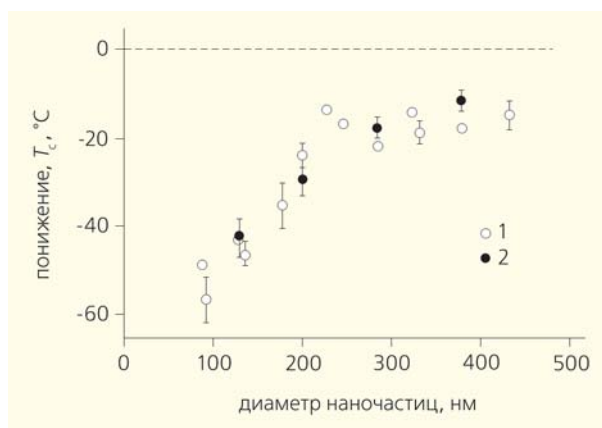


Рис.13. Зависимость величины понижения температуры стеклования ПС наночастиц, измеренное методом дифференциальной сканирующей калориметрии (1) и дилатометрии (2), от их размеров. Пунктирная линия — T_c массивного ПС [12].

температуру стеклования, по существу это означает, что в объем полимера вводится компонент, имеющий пониженную температуру стеклования и избыток межфазной поверхности.

С одной стороны, анализ представленных данных, очевидно, расширяет наши представления о природе и свойствах стеклообразных полимеров, а с другой стороны, этот анализ имеет и несомненное прикладное значение, поскольку существует необходимость адекватного прогнозирования долговременных свойств многочисленных изделий, получаемых на основе стеклообразных полимеров. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 14-03-00617-а и 15-03-03430-а) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущей научной школы (НШ-1683.2014.3).

Литература

1. Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Розенберг Б.А. Стеклование полимеров. Л., 1987.
2. Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров. М., 2007.
3. Эмануэль Н.М. Старение / Энциклопедия полимеров. Т.3. С. 479. М., 1977. С.479.
4. Sato K., Sprengel W. Element-specific study of local segmental dynamics of polyethylene terephthalate upon physical aging // J. Chem. Phys. 2012. V.137. P.104906(6).
5. Govaert L.E., Melick H.G.H. van, Meijer H.E.H. Temporary toughening of polystyrene through mechanical pre-conditioning // Polymer. 2001.V.42. №3. P.1271—1274.
6. Meije Han E.H., Govaer L.E. Mechanical performance of polymer systems: The relation between structure and properties // Prog. Polym. Sci. 2005. V.30. P.915—938
7. McKenna G.B. Mechanical rejuvenation in polymer glasses: fact or fallacy? // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. V.15. P. S737—S763.
8. Вольнский А.Л., Ефимов А.В., Бакеев Н.Ф. Структурные аспекты старения полимерных стекол // Высокомолек. соед. С. 2007. Т.49. №7. С.1317—1343.
9. Вольнский А.Л., Бакеев Н.Ф. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твердых полимеров. М., 2014.
10. Li J.C.M. Behavior and properties of shear bands // Polym. Eng Sci. 1984. V.24. №10. P.750.
11. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. М., 1960.
12. Zhang Ch., Guo Yu., Priestley R.D. Confined glassy properties of polymer nanoparticles // J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 2013. V.51. P.574—586.

Метеорологические цунами: что это такое?

А.Б.Рабинович, Я.Шепич

Корчула — один из самых больших и красивых островов Хорватии — знаменит тем, что именно здесь в 1254 г. родился великий путешественник Марко Поло. Ежегодно сюда приезжает масса туристов со всей Европы, которых привлекает яркое солнце, чистое море, уютные тихие бухточки с песчаными пляжами и живописными скалистыми берегами, тенистые сосновые леса и буйная средиземноморская растительность. В западной части, в глубине обширной клинообразной бухты, вдающейся в берег, расположен небольшой (4,5 тыс. жителей) городок Вела-Лука, который исторически служил торговым и рыболовецким портом; сейчас же это курорт и место стоянки многочисленных яхт (рис.1).



Александр Борисович Рабинович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории цунами Института океанологии им.П.П.Шириова РАН. Специалист в области цунами, приливов, динамических процессов в океане и прибрежной зоне. Главный редактор журнала «Pure and Applied Geophysics» (Birkhäuser, Switzerland).



Ядранка Шепич (Jadranka Šepić), научный сотрудник Института океанографии и рыболовства в г.Сплите (Хорватия), доктор философии (PhD) по геофизике. Основной круг интересов включает метеоцунами и связанные с ними атмосферные процессы, экстремальные колебания уровня моря.

Наводнение в Вела-Луке

Ранним утром 21 июня 1978 г. население Вела-Луки было внезапно разбужено звуками потоков воды, заливающей их дома. Люди выбежали на улицу и увидели апокалипсическую картину их города, погружающегося под воду, которая стремительно прибывала, пока не достигла уровня 1,5–2 м выше городской набережной и портовых причалов. Десятью минутами позже вода так же стремительно начала отступать. Но вместо того чтобы остановиться на своем обычном

Ключевые слова: метеорологическое цунами, атмосферное возмущение, длинноволновые колебания.

Key words: meteorological tsunami, atmospheric disturbance, long-wave oscillations.

уровне, она продолжала уходить из бухты. На территории порта полностью обнажилось дно. А потом вся картина полностью повторилась: опять потоки ревущей воды в виде бора, а затем столь же быстрое ее отступление. Заливание и осушение порта Вела-Луки непрерывно продолжалось в течение нескольких часов (рис.2). Типичный период колебаний составил около 20 мин, максимальный размах достиг 6 м. До сих пор на стенах домов в поселке видны оставленные отметины [1, 2]. К счастью, обошлось без человеческих жертв, но убыток был очень велик — свыше 7 млн долл. (по ценам 1978 г.), что составило около четверти всего годового дохода о.Корчула.

Сильные течения и значительные колебания уровня моря 21 июня 1978 г. наблюдались еще в целом ряде пунктов Адриатического побережья Хорватии, в частности, на о.Вис, в городах Ластово и Сплите. Интенсивные (до 4 м) колебания, сопровождавшиеся потоками втекающей и вытекающей воды, отмечались в Дубровнике. Однако в це-

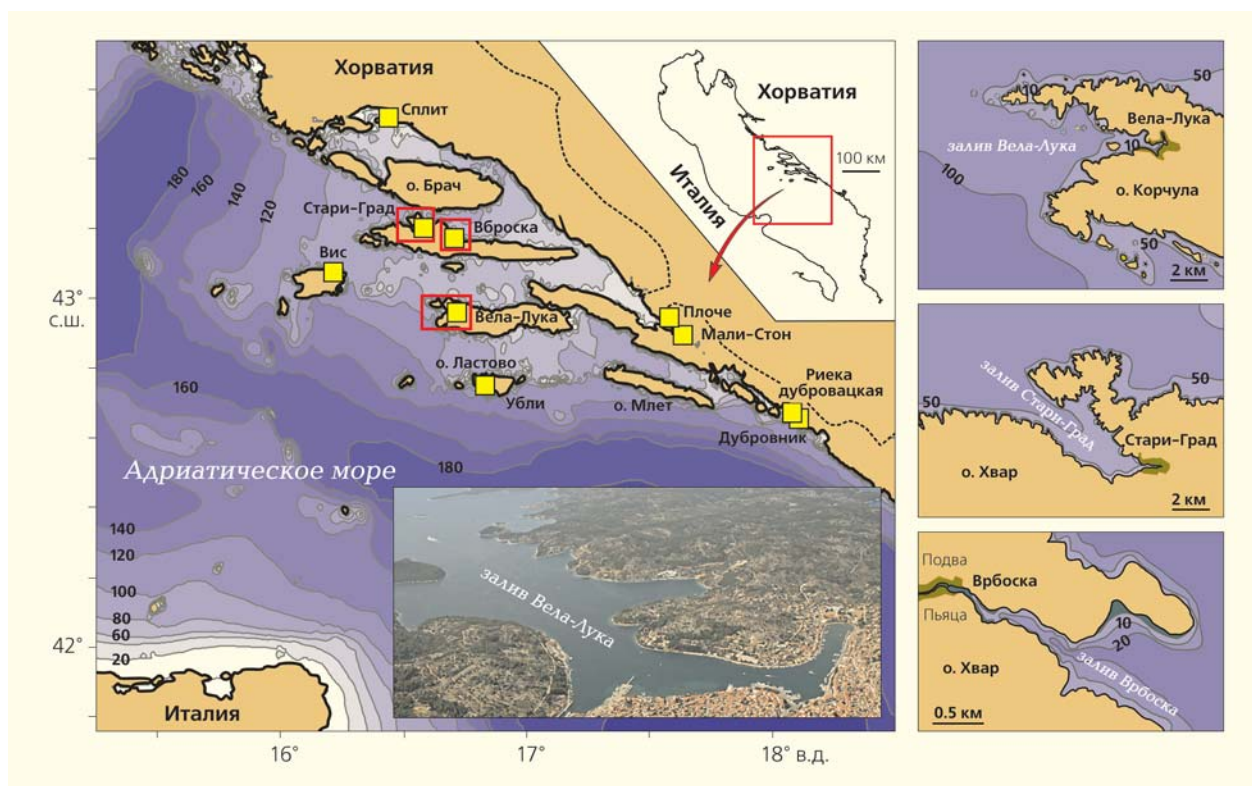


Рис.1. Карта Адриатического моря с побережьем Хорватии. Пункты, подверженные метеоцунами, показаны желтыми квадратами. На врезках сверху вниз: залив Вела-Лука, о.Корчула; заливы Стари-Град и Врбоска, о.Хвар.

лом ни в одном другом месте не наблюдались столь сильные разрушения, как в Вела-Луке.

Произошедшее событие вызвало панику у местного населения и недоумение у ученых. Катастрофическое наводнение в Вела-Луке было совершенно непохоже на известные случаи штормовых нагонов или потоков, вызванных проливными дождями или весенними паводками. Главное отличие заключалось во временном масштабе явлений. Наводнения, связанные с паводками, длятся около

недели (а иногда и дольше), штормовые нагоны — от нескольких часов до нескольких дней. В данном же случае наводнение (фаза «прилива», т.е. подъема воды) наблюдалось всего лишь 10 мин, столько же длилась и фаза «отлива». В других пунктах побережья типичный период колебаний составлял примерно столько же — от 5 до 30 мин.

По масштабам, характеру проявления и катастрофическим эффектам наводнение в Вела-Луке было аналогично волнам цунами, которые регу-



Рис.2. Наводнение в Вела-Луке 21 июня 1978 г. Слева — во время полной воды, справа — в момент максимальной осушки. Разница во времени между двумя фазами события около 10 мин.

лярно происходят в сейсмоактивных зонах Мирового океана и вызывают колоссальные разрушения [3]. Неудивительно, что и жители пострадавших населенных пунктов, и ученые, исследовавшие это явление, широко использовали термин «цунами» при описании данного события [2], тем более что накануне (20 июня 1978 г.) в Эгейском море произошло сравнительно сильное землетрясение. Однако тщательный анализ показал, что, во-первых, магнитуда данного землетрясения ($M_w = 6.4$) недостаточна для генерации столь сильного цунами. Во-вторых, нигде в районе очага (т.е. непосредственно в Эгейском море) цунами не отмечалось. И в-третьих, теоретическое время прихода волны не соответствовало фактическому времени начала наводнения в Вела-Луке и в других пунктах побережья Адриатики. Альтернативная гипотеза заключалась в том, что данное цунами вызвал оползень в центральной части Адриатического моря, но никаких его следов найти не удалось. Характер же пространственного распределения высот наблюдавшихся волн (в частности, в местах, удаленных от предполагаемого очага оползня, колебания были существенно сильнее, чем в пунктах, находящихся поблизости) противоречил известным представлениям об оползневых цунами.

Строго периодический характер вариаций уровня моря на различных участках побережья Хорватии свидетельствовал о том, что в результате некоего неизвестного внешнего воздействия в бухтах и портах возбудились собственные колебания соответствующих акваторий (сейши), которые по своей физической природе аналогичны колебаниям гитарной струны. Их доминантный период отвечал главному «тону», т.е. фундаментальному периоду конкретного бассейна. Изучение архивных материалов и опросы местных жителей показали, что значительные сейшевые колебания (хотя и не носившие катастрофического характера) наблюдались в порту Вела-Луки и ранее. Они даже имеют местное название — щига (šćiga). Более того, выяснилось, что и подобные колебания регулярно наблюдаются и во многих других пунктах побережья центральной Адриатики, например, в порту Стари-Град и в бухте Врбоска на соседнем острове Хвар (рис.1). В городке Врбоска щига даже стали частью местной легенды.

В старые времена жители Врбоски, проживающие в двух частях города, Подва и Пьяца, сильно враждовали друг с другом. А 11 марта 1614 г., в Добрую пятницу, на большом кресте в фамильном доме Ординановичей в Подве показалась кровь. Тогда члены семьи, их многочисленные соседи и местный священник решили, что крест надо немедленно перенести в церковь, расположенную на другой стороне длинной и узкой бухты. Однако в бухте разыгралась сильная щига, которая затопила мост через бухту, и жители Подвы были вынуждены идти по берегу через территорию враждебной Пьяцы. Эта процессия с кровоточа-

щим крестом объединила две части города. Люди восприняли все происшедшее как небесный знак, призывающий их к миру и добрососедству.

До сих пор для жителей Врбоски (и всего о.Корчула) Добрая пятница — главный религиозный праздник, который они широко отмечают, проводя шествие «За крестом».

Собственные колебания любой физической системы (например, собственные колебания жидкости в замкнутом или частично замкнутом водоеме) могут возбуждаться самыми различными типами внешнего воздействия. Неясным оставался вопрос: «Какой именно тип внешнего воздействия сгенерировал 21 июня 1978 г. разрушительные колебания в порту Вела-Лука и других пунктах центральной Адриатики?»

М.Ходжич, видимо, первым высказал предположение о метеорологической природе произошедшего наводнения [4]. По его мнению, бедствие вызвали свободные длинные морские волны, сформировавшиеся под действием циклона в центральной Адриатике. Однако этот циклон был довольно слабым и мало отличался от других, регулярно распространяющихся над акваторией Адриатического моря. По крайней мере, его трудно рассматривать как некое экстремальное явление, вызвавшее столь сильную реакцию. Но в этом и заключалась парадоксальность и загадочность данного события. Никаких экстраординарных явлений ни в земной коре, ни в атмосфере в то время не происходило, а самое сильное в XX в. на территории Хорватии наводнение произошло!

Важную роль в понимании возможной природы события 21 июня 1978 г. сыграла работа М.Орлича, который, также полагая, что наводнение 1978 г. было вызвано атмосферными процессами, в качестве его причины назвал цуг атмосферных гравитационных волн, который распространялся над Адриатическим морем [5]. Но, главное, Орлич указал на вероятный резонансный механизм, вызвавший экстремальное наводнение в Вела-Луке и сильные колебания в других пунктах близлежащего побережья. Позже это предположение полностью подтвердилось.

В последующие годы у хорватского побережья Адриатического моря произошел еще целый ряд сильных морских наводнений, которые по своему характеру очень напоминали событие 1978 г. Так, в 1984 и 2007 гг. подобные наводнения наблюдались в заливе Широка на о.Ист, а 27 июня 2003 г. от сильного наводнения серьезно пострадали города Стари-Град и Мали-Стон (рис.1) [6, 7]. Уникальное событие случилось 23—27 июня 2014 г.: цепочка разрушительных наводнений прокатилась от берегов Испании до Черного моря [8], при этом на побережье Хорватии самые сильные (до 2.5 м) колебания наблюдались опять именно в Вела-Луке.

В 1978 г., когда произошло катастрофическое наводнение в Вела-Луке, инструментальные наблюдения за колебаниями уровня моря и вариаци-

ями атмосферного давления были крайне немногочисленны, а имевшиеся представляли собой низкокачественные аналоговые записи с плохим разрешением по высоте и времени. Такое положение сильно ограничивало возможности исследователей. Для получения дополнительной информации использовались рассказы очевидцев, фотографии, отметки на берегу и данные любительских киносъемок. Полученные результаты и выводы носили большей частью не количественный, а качественный характер и подвергались вполне обоснованным сомнениям. Доказательная база того или иного предположения оставляла желать лучшего. За последние 10–15 лет ситуация кардинально изменилась. Во многих районах Средиземноморья (в том числе у побережья Хорватии) сейчас работают высокоточные цифровые измерители уровня моря и прецизионные микробарографы с дискретностью измерений 30 с — 1 мин. В результате удалось получить длинные серии синхронных наблюдений уровня моря и атмосферного давления и записать несколько экстремальных событий. Эти записи неопровержимо свидетельствуют о тесной связи в этом районе морских наводнений и высокочастотных флуктуаций атмосферного давления. Более того, численные модели, в которых в качестве входной функции используются подобные флуктуации, дают хорошее соответствие рассчитанных колебаний уровня моря и реально наблюдаемых. Так, Орлич 30 лет спустя вернулся к исследованию наводнения 1978 г. и смог воспроизвести и объяснить это событие, используя результаты численного моделирования [2].

Наводнение 1978 г. в Вела-Луке рассматривается как одно из наиболее ярких примеров явления, получившего название «метеорологическое цунами» (или просто «метеоцунами»). Событие в Вела-Луке экстраординарное, но оно не уникально. Существует еще целый ряд районов Мирового океана, где метеоцунами наблюдаются регулярно и порой принимают катастрофический характер.



Метеоцунами. Общие положения

Метеорологические цунами — это длинные океанские волны, которые имеют те же пространственные и временные масштабы, что и обычные волны цунами, и могут оказывать на побережье аналогичное разрушительное воздействие. Но вызываются они не землетрясениями, извержениями вулканов или подводными оползнями, а атмосферными процессами: тайфунами, ураганами, линиями шквалов, прохождением фронтальных зон, атмосферными внутренними волнами или просто скачками атмосферного давления [9].

Упоминания о волнах цунами, вызываемых атмосферным давлением и ветром, можно найти в японских работах 30-х годов прошлого века, но первым, кто предложил термин «метеоцунами», был, видимо, выдающийся австрийский океанограф А.Дефант [10]. В широкий научный обиход этот термин вошел после наших работ [11–13].

Для генерации сильного метеоцунами требуются особые условия, сочетание некоторых внешних и внутренних факторов. С одной стороны, должны присутствовать интенсивные мелкомасштабные атмосферные возмущения, распространяющиеся в определенном направлении и с определенной скоростью. В районе Средиземноморья такие условия существуют только летом, поэтому все известные метеоцунами здесь происходили в период между концом мая и серединой сентября. С другой стороны, требуется наличие специфической топографии, которая способствует усилению приходящих волн и формированию сильных собственных колебаний внутри определенной акватории. Именно по этой причине метеоцунами регулярно наблюдаются в одних и тех же портах и бухтах: это Вела-Лука и Стари-Град в Хорватии, Сьютаделья на о.Менорка (Балеарские о-ва), Мазаро-дель-Валье на западном побережье о.Сицилия (рис.3). Из других районов Мирового океана следует прежде всего упомянуть



Рис.3. Метеоцунами (риссага) в порту Сьютаделья (о. Менорка, Испания) 20 июня 2010 г. (слева) и метеоцунами (марроббио) в порту Мазарро-дель-Валье (о.Сицилия, Италия) 25 июня 2014 г.

бухту Нагасаки на о.Кюсю в Японии и порт Лонгкоу в Желтом море в Китае. При метеоцунами значительные колебания одновременно могут происходить и в соседних портах и бухтах, но обычно с меньшими высотами. В тех районах, где метеоцунами наблюдаются достаточно часто, для них существуют местные названия. На Балеарских о-вах — риссага, на побережье Сицилии — марруббио (марроббио), в Японии — абики [14].

Метеорологические цунами на восточном побережье Северной Америки

Один из районов, где регулярно отмечаются сильные длинноволновые колебания атмосферного происхождения, — Восточное (Атлантическое) побережье Северной Америки. Экстремальное, во многом уникальное событие наблюдалось здесь в конце 2004 г. [15]. 26 декабря в 00:59 UTC

в Индийском океане, у берегов о.Суматра, произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой $M_w = 9.3$. Оно породило катастрофическое цунами, которое стало одним из самых страшных природных бедствий в истории человечества — тогда погибло около 230 тыс. человек [3]. Волны цунами пересекли Индийский океан, обогнули Южную Африку и распространились в Атлантическом океане. Примерно через 32 ч после землетрясения они достигли побережья Северной Америки. Одновременно вдоль того же побережья двигался ураган, возбуждая на своем пути сильные сейшевые колебания типа метеоцунами (рис.4). Таким образом, совпали два природных разрушительных явления. Различить и разделить их достаточно сложно, но помогло то, что волны цунами достигли всего побережья практически одновременно, а метеоцунами возбуждалось последовательно с юга на север (рис.4). На границе США и Канады (станции Галифакс — точка 1 и Катлер —

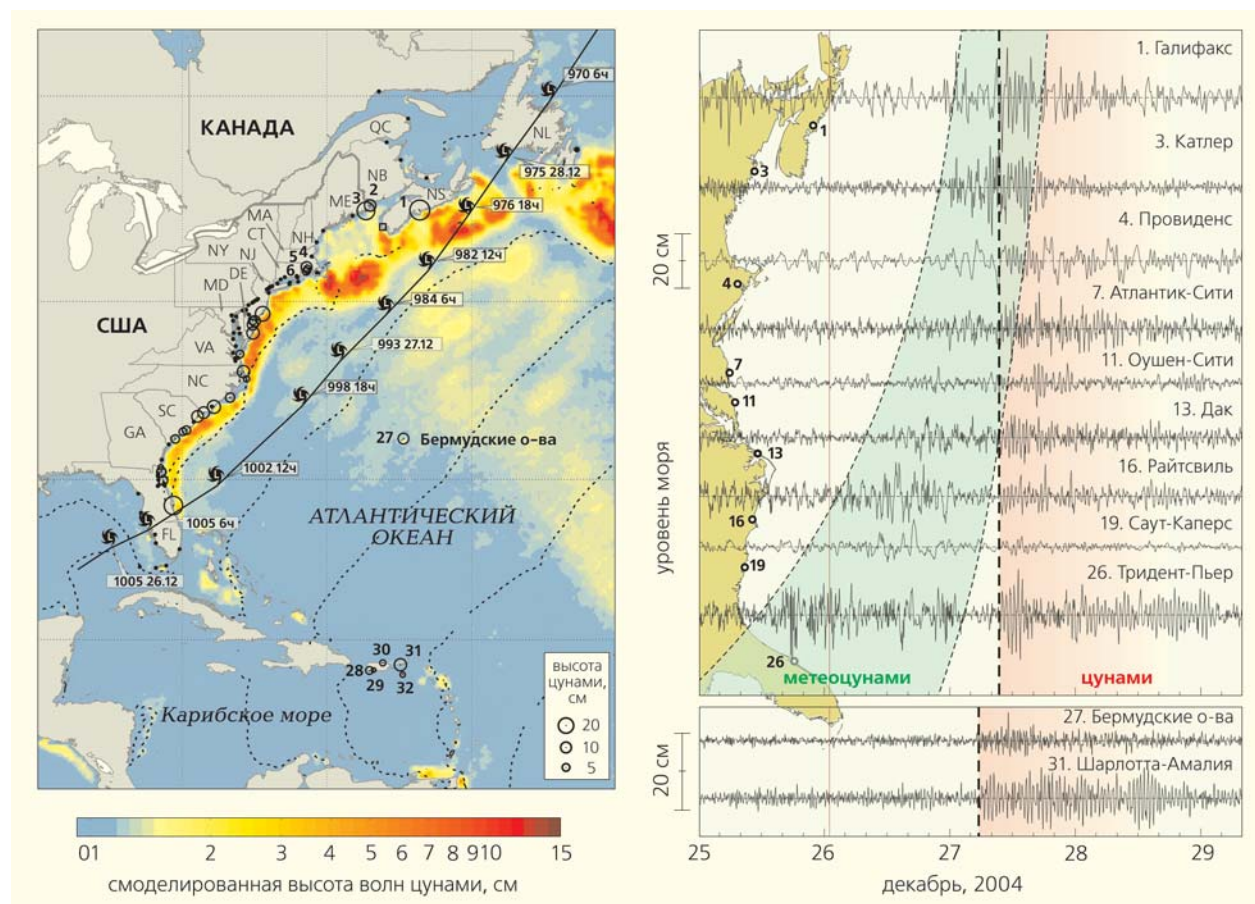


Рис.4. Суперпозиции волн метеоцунами, вызванных прохождением урагана 26—28 декабря 2004 г. вдоль берегов Северной Америки, и Суматранского цунами 26 декабря 2004 г., пришедшего в этот район из Индийского океана (слева). Черная сплошная линия — трасса движения урагана с указанными датой, временем и давлением в центре циклона (гПа). Цветом показаны высоты волн цунами согласно данным численного моделирования [3], кружками — фактические наблюдения высот волн. Здесь и далее для обозначения отдельных штатов США использована стандартная система кодировки. Приведены мареографные записи колебаний уровня моря в отдельных пунктах Атлантического побережья США, вызванных прохождением урагана и волнами цунами (справа).

точка 3) два типа колебаний наложились друг на друга, и произошло значительное усиление результирующего сигнала.

Эффективным средством для исследования нестационарных волновых процессов служит вейвлет-анализ. Частотно-временные ($f-t$) диаграммы позволяют проследить эволюцию во времени метеоцунами и цунами и оценить изменения их частотных и энергетических свойств (рис.5). На рисунке хорошо видно, что волны цунами с ярко выраженными доминантными периодами 40–60 мин дошли до всех станций 27 декабря около 9:00 UTC. Волны метеоцунами в этом отношении существенно отличались. Они включали гораздо более широкий спектр периодов (от 15 мин до 2 ч) и заметно различались по времени начала.

Рассмотрим еще одно характерное метеоцунами на этом побережье, которое было вызвано прохождением деречо — катастрофического метеорологического явления, которое регулярно в летнее время наблюдается в центральной и восточной частях США. Деречо — система исключительно интенсивных долгоживущих конвективных грозовых фронтов, распространяющихся с большой скоростью и сопровождающихся ураганными ветрами. Деречо 29 июня 2012 г. зародилось в долине р.Огайо в центральной части США и распространялось на запад со скоростью около 100 км/ч, сея разрушения на своем пути: 22 человека были убиты, свыше 5 млн остались без электричества. Задев левым крылом район Великих озер и пройдя около 1000 км, 30 июня деречо достигло Атлантического побережья США (рис.6). На Великих озерах и океанском побережье оно вызвало сильные сейшевые колебания [16].

Посмотрим на результаты вейвлет-анализа синхронных рядов наблюдений за колебаниями уровня моря и флуктуациями атмосферного дав-

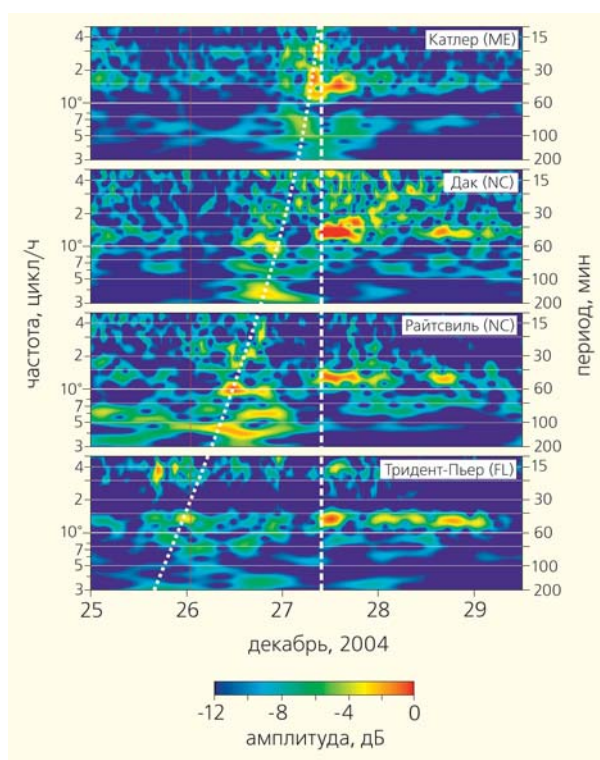


Рис.5. Частотно-временные ($f-t$) диаграммы колебаний уровня моря у побережья Северной Америки 25—29 декабря 2004 г., построенные на основе вейвлет-анализа данных.

ления для трех пунктов (рис.7), положение которых указано на рис.6: Чикаго (южное побережье оз.Мичиган), Балтимора (вершина очень длинного — больше 320 км — залива Чесапик, вдающегося далеко вглубь материка) и Атлантик-Сити (Атлантическое побережье). На диаграммах очень хорошо видна высокая корреляция колебаний

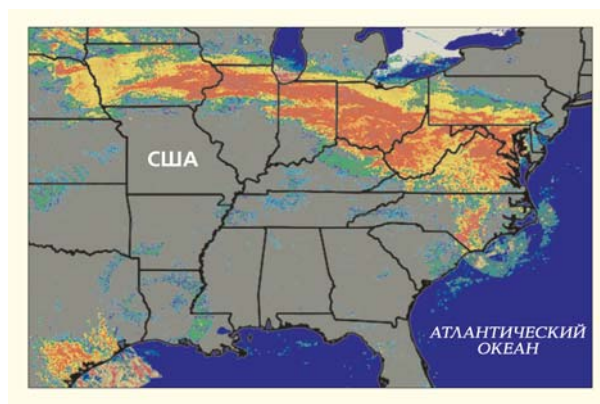
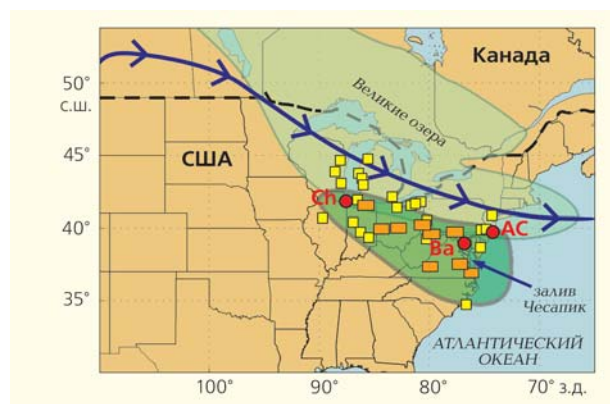


Рис.6. Карты распространения деречо 29—30 июня 2012 г. Слева — трасса и районы, пострадавшие от деречо: основная область показана темно-зеленым, районы со скоростями ветра свыше 30 м/с — салатovým. Желтыми квадратами и коричневыми прямоугольниками отмечены станции, использованные для анализа атмосферных возмущений [8]. Красными кружками отмечены станции: Чикаго (Ch), Балтимор (Ba) и Атлантик-Сити (AC), данные вейвлет-анализа которых показаны на рис.7. Справа — приведены результаты радарного зондирования атмосферы, показывающие развитие и эволюцию деречо при его распространении в сторону Атлантического побережья.

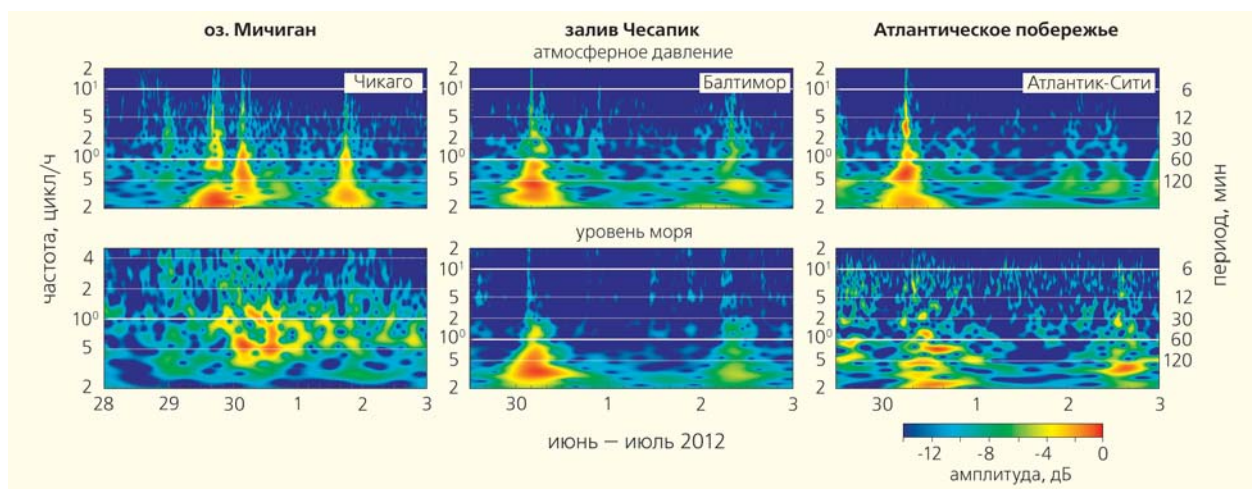


Рис.7. Результаты вейвлет-анализа ($f-t$ диаграммы) синхронных записей возмущений атмосферного давления и уровня моря при прохождении дучечо 29—30 июня 2012 г. для станций Чикаго, Балтимор и Атлантик-Сити.

уровня моря и атмосферного давления. В то же время просматривается явное влияние топографии, поддерживающей на некоторых станциях длительный «звон» сгенерированных колебаний уровня моря. Это особенно очевидно для замкнутой акватории, подобной оз.Мичиган, где возбужденные волны не убегают, а только затухают под действием трения. Отдельные энергетические полосы, хорошо выделяющиеся на $f-t$ диаграммах,

соответствуют прохождению отдельных фронтальных зон, которые сопровождаются возмущениями атмосферного давления и активным возбуждением колебаний уровня моря.

Характер пространственного распределения интенсивности атмосферных возмущений и вызванных ими сейшевых колебаний для Атлантического побережья США показан на рис.8. Для оценки степени опасности метеоцинами в отдельных

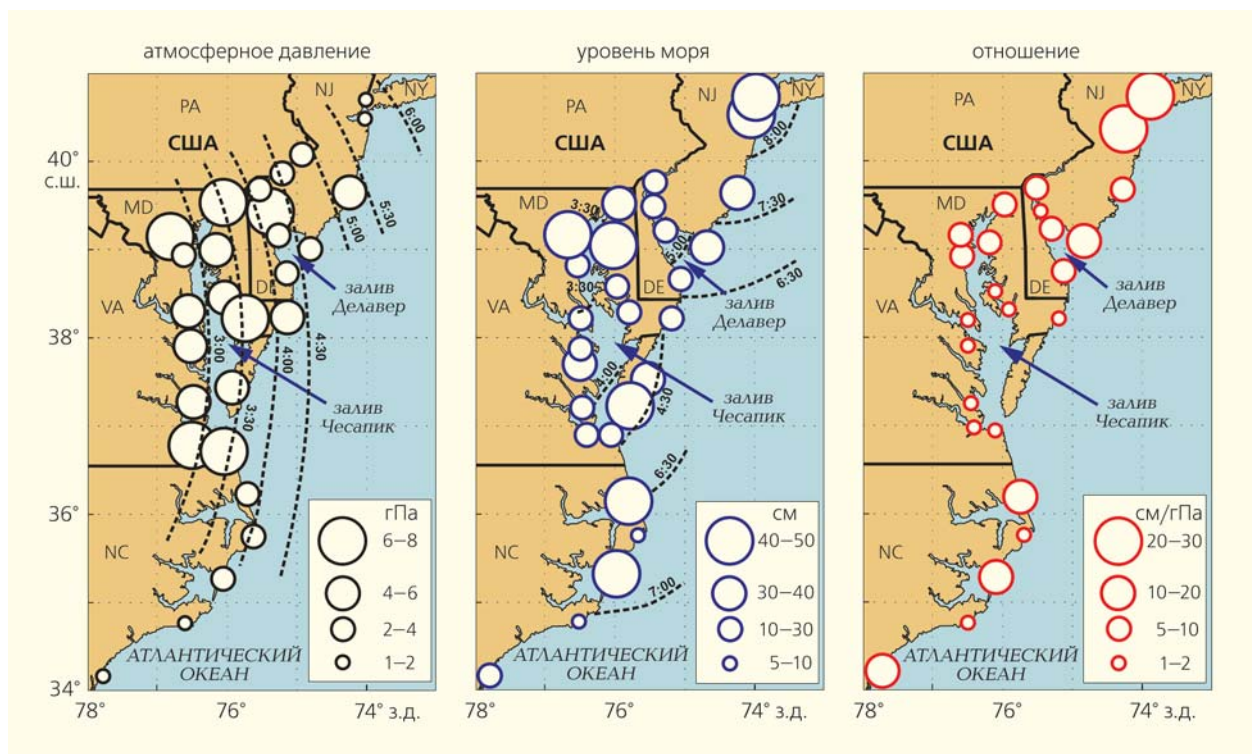


Рис.8. Интенсивность атмосферных возмущений, вызванных ими колебаний уровня моря, а также коэффициенты эффективности генерации на Атлантическом побережье США во время дучечо 29—30 июня 2012 г.

районах побережья и выделения «горячих точек» (т.е. районов максимального риска) был введен коэффициент эффективности генерации (R_1), который представляет собой отношение максимальных амплитуд возбужденных колебаний уровня моря и вызвавших их атмосферных возмущений [16]. Карты построены для события 2012 г., но они позволяют предварительно сделать некоторые более общие выводы. Так, максимальные значения коэффициента $R_1 = 25–35$ наблюдаются на северо-восточном побережье штата Нью-Джерси, где действительно неоднократно отмечались сильные сейшевые колебания, вызванные атмосферными процессами.

Спустя примерно год, 13 июня 2013 г., на Восточное побережье США обрушилось новое катастрофическое деречо, которое также сопровождалось метеоцунами. Возбужденные длинные волны были настолько сильны, что по американским новостным каналам прошло сообщение об атаке волн цунами, которой подверглось северо-восточное побережье штата Нью-Джерси и о. Лонг-Айленд (штат Нью-Йорк). Позже П. Витмор, директор Аляскинского центра предупреждения цунами, уточнил, что это были «цунамиподобные волны метеорологического происхождения», т.е. метеоцунами.

Резонансный механизм формирования метеорологических цунами

Метеоцунами, описанные в предыдущем разделе, были вызваны экстремальными метеорологическими событиями: ураганом и деречо. Однако абсолютное большинство сильнейших метеоцунами (включая наводнение в Вела-Луке) наблюдались в хорошую ясную погоду при отсутствии каких-либо видимых атмосферных катаклизмов. Последующие исследования показали, что во всех подобных случаях метеоцунами связаны с прохождением скачков атмосферного давления или пакетов атмосферных волн. Перепад давления в таких возмущениях обычно составляет 1–3 гПа (мбар), очень редко больше 5 гПа. Для сравнения: перепад давления в глубоком циклоне обычно 30–40 гПа, а в сильных тайфунах и ураганах может быть выше 80 гПа. Возмущения в 1–3 гПа люди практически не ощущают, а на лентах барографа (который в течение многих десятилетий использовался для наблюдения за изменчивостью атмосферного давления) подобные мелкомасштабные вариации почти незаметны. Именно по этой причине каждый раз, когда происходит сильное метеоцунами (особенно в районах, где ранее подобные события не отмечались), объяснения пытаются найти в подводном землетрясении, оползне, взрыве. И никто, кроме специалистов, не думает, что данное событие могли вызвать малозаметные скачки атмосферного давления. Только установка высокоточных цифровых измерителей уровня моря

и прецизионных микробарографов и получение качественных синхронных записей атмосферного давления и уровня моря позволили показать тесную взаимосвязь этих процессов. Более того, современные численные модели, в которых в качестве входа используются наблюдаемые возмущения атмосферного давления, с хорошей точностью воспроизводят реально произошедшие метеоцунами [2, 7].

И, тем не менее, до сих пор даже для многих специалистов явление метеоцунами выглядит загадочным. Известно, что в океане действует так называемый *закон обратного барометра*, согласно которому изменение атмосферного давления на 1 гПа вызывает изменение уровня моря с обратным знаком на 1 см [9]. Так, скачок атмосферного давления на 3–5 гПа должен вызывать отклик уровня высотой 3–5 см, а фактически во время сильнейших наводнений высота волн метеоцунами достигает нескольких метров, т.е. на два порядка больше. Характерный пример — разрушительное метеоцунами (риссага) 15 июня 2006 г. на о. Менорка. Резкий скачок давления около 5 гПа, распространившийся над Балеарскими о-вами (рис.9), вызвал разрушительные колебания уровня моря в порту Сьютаделья высотой до 5 м. Более 40 судов были потоплены, общий убыток превысил 30 млн евро. Отношение перепада давления и высоты волн риссага составило примерно 1:100. Столь сильная реакция океана с физической точки зрения выглядит труд-

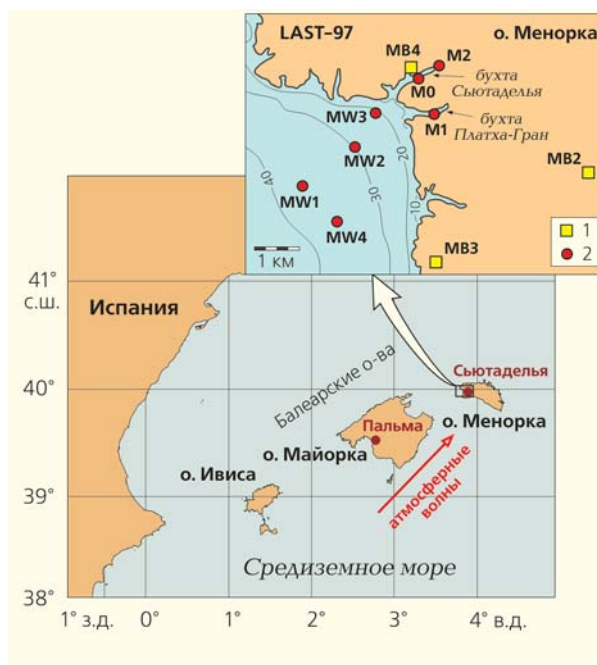


Рис.9. Район Балеарских о-вов (внизу) и схема расположения приборов, установленных во время гидрофизического эксперимента LAST-97 на шельфе и в бухтах о. Менорка. Стрелкой показано направление распространения атмосферных волн. 1 — микробарографы, 2 — донные мареографы.

нообъяснимой. Но то, что именно этот скачок давления вызвал наводнение, надежно подтверждается результатами численного моделирования [7].

Нам пришлось достаточно много заниматься исследованием волн рессага на Балеарских о-вах. Метеоцунами высотой около 1 м наблюдаются в бухте Сьютаделья каждое лето, а каждые пять-шесть лет происходят катастрофические события с высотами колебаний свыше 3 м. Волны рессага, хотя и менее сильные, фиксируются и в соседней бухте Платха-Гран на о.Менорка (рис.9), а также в бухтах о.Майорка (Санта-Понса, Са-Рапита, Порто-Колом, Польенса) и других Балеарских островов (Ивиса, Кабрера), а также на континентальном побережье Испании.

С точки зрения гидродинамики волны цунами и метеоцунами очень похожи, однако физический механизм их формирования существенно различается. Метеоцунами — резонансное явление. Значительные колебания поверхности океана могут возникнуть только тогда и там, где совпадают скорости распространения атмосферного возмущения (U) и скорости длинных океанских волн (c). Последние рассчитываются по очень простой формуле Лагранжа: $c = \sqrt{gh}$, где g — ускорение силы тяжести, а h — глубина океана. К примеру, если $h = 60$ м (характерная глубина на шельфе Балеарских о-вов), то $c \approx 25$ м/с. Атмосферные волны, распространяющиеся с такой скоростью, могут привести к резонансной генерации длинных океанских волн, что и наблюдалось в этом районе 15 июня 2006 г. Такой тип резонанса ($c \approx U$) у океанологов принято называть резонансом Праудмена [17].

Но для формирования сильного метеоцунами резонансного совпадения скоростей недостаточно. Должен сработать еще ряд факторов: резкий скачок давления в атмосферном возмущении — 2–3 гПа за 10 мин (во время наводнения 15 июня 2006 г. давление за 10 мин возросло на 5 гПа), определенное направление его распространения (для Сьютадельи — юго-западный сектор) и специфические особенности локальной топографии данного района. В частности, постепенное уменьшение глубины и узкая воронкообразная форма залива — важные условия усиления длинных волн, приходящих из открытого моря (бухты Вела-Лука, Стари-Град и Вброска на рис.1). Однако имеется еще один очень немаловажный фактор, определяющий характер и интенсивность проявления вблизи берега как обычных волн цунами, так и метеоцунами. Это резонансные особенности конкретной акватории, расположенной в вершине залива (как в Стари-Граде или Вела-Луке) или непосредственно примыкающей к берегу (как бухта Сьютадельи или бухты Малокурильская и Крабовая на о.Шикотан). Как говорилось выше, в каждой такой бухте или порту существуют стоячие колебания — сейши. Периоды собственных колебаний данной акватории определяются ее морфометрическими характеристиками. Отдельные моды та-

ких колебаний по своей физической природе аналогичны тонам музыкальных инструментов. Особую роль играет низшая фундаментальная мода, которую еще называют «модой Гельмгольца», «нулевой модой» или «модой накачки». Эта мода имеет наибольший период и единственную «узловую линию» (линию, на которой нет колебаний), находящуюся на входе в акваторию. Сама же мода представляет собой периодическое наполнение и слив внутренней полости (в данном случае бухты или гавани). В бухте Сьютаделья период фундаментальной моды 10.5 мин, а в бухте Вела-Лука — около 20. Именно эта мода обычно доминирует в прибрежных акваториях, и именно с ней связаны периодические приливно-отливные колебания (наполнение и осушение акваторий). Если период приходящих из внешнего бассейна (открытого моря) волн близок к периоду собственного колебания внутренней акватории, то в ней происходит резонансное возбуждение собственных колебаний, которое называют резонансом гавани [9, 14].

Летом 1997 г. в районе о.Менорка проводился гидрофизический эксперимент LAST-97, цель которого — выявление механизма формирования волн рессага. На западном шельфе острова установили четыре глубоководных датчика уровня моря, еще два поставили в бухте Сьютадельи и один — в соседней бухте Платха-Гран (рис.9). Кроме того, поблизости треугольником разместили три прецизионных микробарографа. В период проведения эксперимента произошли три значительных метеоцунами высотой 1.1–1.25 м [18]. На основе анализа двух первых событий и данных по атмосферному давлению с высокой точностью было предсказано третье. Эти же данные в дальнейшем использовались для верификации и отладки численной модели волн рессага и расчета события 15 июня 2006 г. [7].

Спектры колебаний уровня моря на трех станциях в бухтах и одной — на шельфе показаны на рис.10. Общее во всех спектрах — это то, что относится к спектральным особенностям шельфа и прилегающей части Средиземного моря. В частности, практически идентичная величина пика с периодом 24.4 мин на всех спектрах — явная особенность шельфа. Различия связаны с индивидуальными особенностями конкретных бухт. Главный спектральный пик с периодом 10.5 мин в бухте Сьютадельи соответствует фундаментальной моде данной бухты, 4.3 мин — первая мода (на станции М0 этот пик не виден, как раз здесь проходит узловая линия для данной моды), а 2.4 мин — вторая мода. В бухте Платха-Гран фундаментальная мода имеет период 5.5 мин, а первая — 2.2 мин. Численные расчеты модальной структуры подтверждают такую структуру собственных колебаний в этих акваториях [19]. Результаты спектрального анализа показывают, что во время метеоцунами происходит значительное увеличение спектра

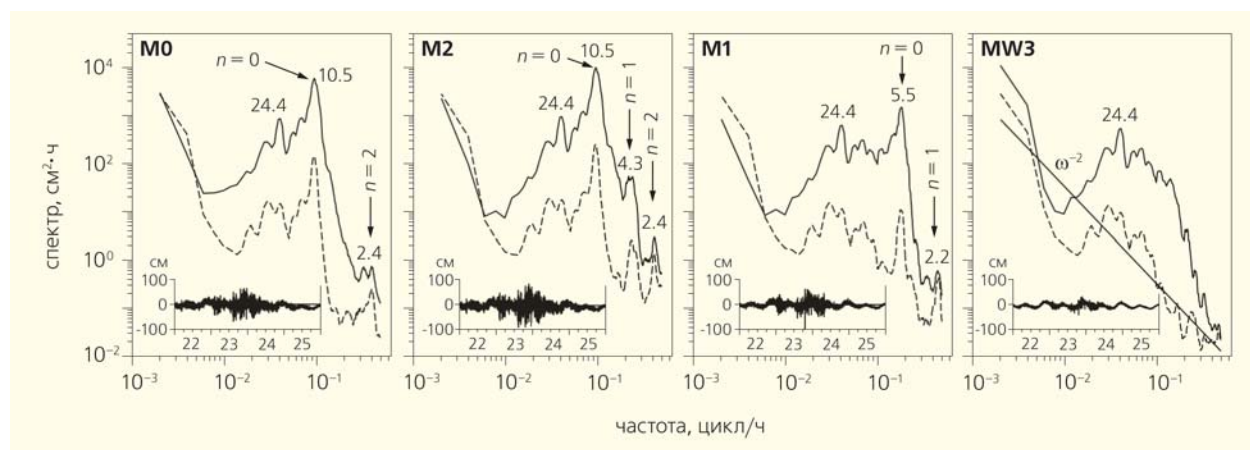


Рис.10. Спектры волн рессага и фоновых колебаний уровня моря по данным измерений эксперимента LAST-97. Положение станций приведено на рис.9. Цифрами указаны периоды колебаний (мин), стрелками отмечены отдельные моды собственных колебаний уровня моря в бухтах Сьютаделья (M0, M2) и Платха-Гран (M1). Для станции MW3, расположенной на шельфе, показан закон ω^{-2} спадаения спектров с частотой (ω), типичный для длинных волн в открытом океане.

в широком диапазоне частот (рис.10). Но главную угрозу представляет резкое усиление фундаментальной моды.

Имеется один очень важный параметр, который определяет «остроту резонанса» и степень усиления проходящих волн — добротность соответствующей акватории (Q). Она обратно пропорциональна скорости затухания колебаний: чем выше добротность, тем медленнее колебания затухают и тем сильнее усиливаются проходящие волны. И наоборот, при малой добротности входящие волны слабо усиливаются и быстро затухают. В 1961 г. американские ученые Дж.Майлс и У.Манк опубликовали статью «Парадокс гавани» [20]. Смысл ее в том, что чем сильнее мы стараемся защитить гавань от входящих ветровых волн и зыби, тем выше ее добротность и тем сильнее в ней будут проявляться и усиливаться длинноволновые колебания. В этом и заключается парадокс! Чем уже «ворота» в порт или бухту, тем выше добротность (конечно, это справедливо только до какого-то предела: если «ворота» будут слишком маленькие, то трение просто не позволит волне проникнуть в соответствующую акваторию).

В узких вытянутых заливах типа фьордов добротность определяется отношением ширины залива (b) на входе к его длине (l): $Q \approx l/b$. Бухта Сьютаделья имеет длину около 1 км и ширину около 100 м. Соответственно, $Q \approx 10$. Такая величина добротности означает, что после возбуждения требуется примерно 6.5 колебания для затухания амплитуды в e раз ($N = 2Q/\pi$). Одновременно это значение характеризует и степень усиления проходящей волны: $R \approx Q = 10$, т.е. волна, проходящая из открытого моря, в бухте Сьютаделья усиливается примерно в 10 раз. Это хорошо видно по результатам спектрального анализа (рис.10). Если считать сигнал и соответствующий спектр на

станции MW3 (шельф) входом, а на станции M2 (вершина бухты) — выходом, то энергия на частоте фундаментальной моды (т.е. на периоде 10.5 мин) возрастает на два порядка (т.е. само колебание усиливается примерно в 10 раз). Результаты спектрального анализа объясняют, почему колебания в бухте Платха-Гран существенно слабее, чем в Сьютаделье. Основная причина — убывание с частотой входного спектра длинных волн. На графиках хорошо видно, что на станции MW3 на периоде 5.5 мин энергия значительно меньше, чем на периоде 10.5 мин.

Таким образом, формирование значительного метеоцунами проходит через несколько стадий и зависит от многих факторов. Проиллюстрируем последовательность отдельных этапов на примере катастрофического события 31 марта 1979 г. в бухте Нагасаки [21]. Начальный источник метеоцунами (абики) располагался в западной части Восточно-Китайского моря (рис.11), где скачок атмосферного давления в 3 гПа сформировал возмущение поверхности моря высотой 3 см. Шельф, который почти на 600 км тянется от материкового побережья Китая на восток, имеет характерные глубины от 50 до 150 м. Им соответствуют скорости длинных волн 22—39 м/с. Скачок атмосферного давления распространялся в сторону побережья Японии со скоростью 31 м/с, т.е. со скоростью, близкой к резонансной, и «тащил» вместе с собой длинную морскую волну, постоянно подпитывая ее энергией. В процессе распространения эта волна набирала силу и при подходе к ближнему шельфу имела высоту 16 см (рис.11). На шельфе произошло дальнейшее усиление волны, и она достигла уже высоты 45 см. Во внешнем воронкообразном заливе продолжалась интенсификация волны: мареограф Незуми, расположенный на входе в бухту Нагасаки (точка 1 на врезке рис.11), заре-

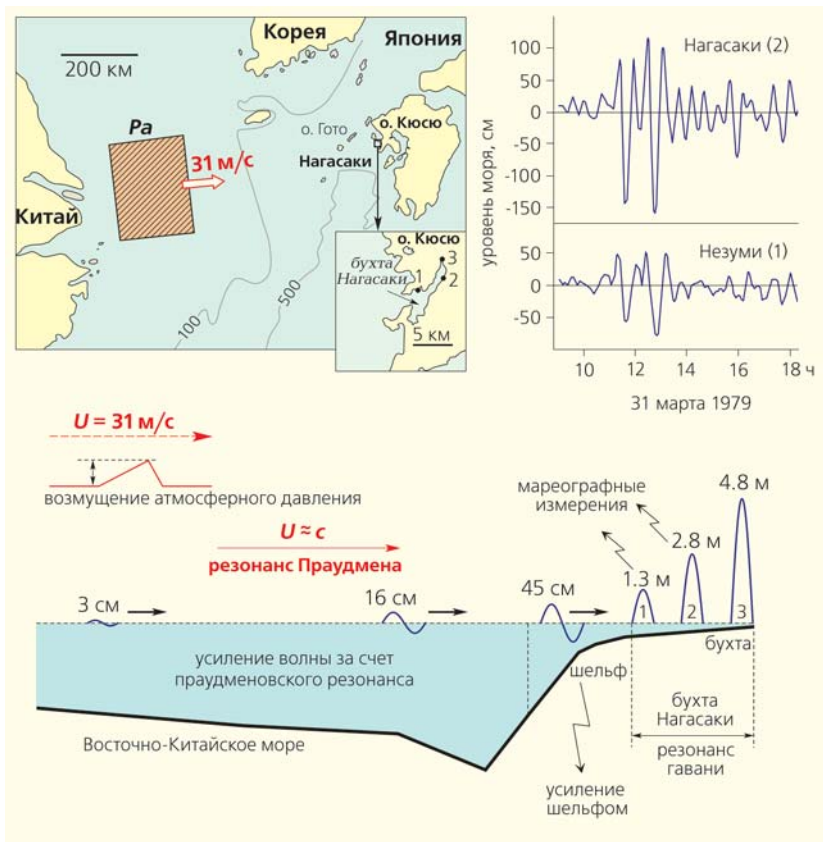


Рис.11. Схема формирования катастрофического метеоцунами (абики) в бухте Нагасаки 31 марта 1979 г. Вверху слева — северная часть Восточно-Китайского моря и район бухты Нагасаки на о.Кюсю. Заштрихованным прямоугольником показана зона, в которой сформировалось начальное отклонение уровня моря под действием атмосферного возмущения. Цифрами на врезке показано положение мареографов. Вверху справа — записи метеоцунами на мареографах Незуми (1) и Нагасаки (2). Внизу — схема последовательного усиления возбужденной волны: от 3 см в зоне источника до 4.8 м в вершине бухты Нагасаки (точка 3 на врезке).

гистрировал максимальную высоту 1.3 м, а мареограф Нагасаки внутри бухты — 2.8 м (точка 2). В вершине бухты, согласно показаниям очевидцев, фотографиям и отметкам на берегу, максимальная высота волны была 4.8 м. Три пожилые женщины погибли. Так, начальное возмущение в 3 см, пройдя несколько этапов, привело к катастрофическому колебанию в бухте Нагасаки высотой почти 5 м (рис.11). Скорости течений в бухте (а это главный поражающий фактор) превысили 15–20 узлов. В некоторых акваториях очень высокие скорости течений наблюдаются и при сравнительно небольших колебаниях уровня моря. В этом отношении просматривается очевидная аналогия между метеоцунами и явлением тягуна [9], которое представляет серьезную угрозу для ряда портов Черноморского побережья Кавказа (Туапсе, Сочи, Геленджика, Батуми, Потти и др.).

Таким образом, основную угрозу представляет не сама величина атмосферного возмущения, а острота резонанса (скорость, направление атмо-

сферного возмущения, его частотный состав и некоторые другие параметры), а также специфические условия конкретной акватории [19]. Там, где есть протяженный шельф, способствующий резонансу Праудмена (т.е. где длинные волн имеют скорости $c = \sqrt{gb}$, близкие к типичным скоростям атмосферных возмущений), а также внешняя воронка, которая обеспечивает фокусировку волн, и бухта или порт с высокой добротностью, метеоцунами происходят с большой регулярностью. Такими районами и являются бухты Вела-Лука и Стари-Град, Сьютаделья, Мазаро-дель-Валье, Нагасаки и др. Это как мина с часовым механизмом: десятки атмосферных возмущений могут проходить над соответствующим районом, не вызывая заметного эффекта, но потом возникает возмущение с параметрами, близкими к резонансным, и «мина» взрывается.

Метеорологические цунами 2014 года

Одному из авторов (А.Б.Рабиновичу) этой статьи пришлось заняться рассматриваемой проблемой около 20 лет назад. В то время даже сам термин «метеоцунами» практически не использовался. Было известно, что

в некоторых районах Мирового океана периодически наблюдаются экстремально сильные сейши (рис.12), которые носили местные имена и изучались местными специалистами изолированно, без связи с другими сходными явлениями. Конкретный физический механизм формирования экстремальных сейш оставался неясен. В частности, некоторые ученые предполагали, что основная причина их возникновения — внутренние приливные волны. Именно эта интересная, хотя и (как оказалось в дальнейшем) ложная теория стимулировала постановку донных мареографов в бухте Сьютаделья и на внешнем шельфе о.Менорка и позволила получить первые качественные записи метеоцунами (риссага). Последовавшие работы, посвященные исследованию волн риссага на Балеарских о-вах и родственных явлений в других районах Мирового океана, подтвердили атмосферное происхождение данного явления [11, 12, 19]. Термин начал понемногу «приживаться», а метеоцунами стали регистрироваться

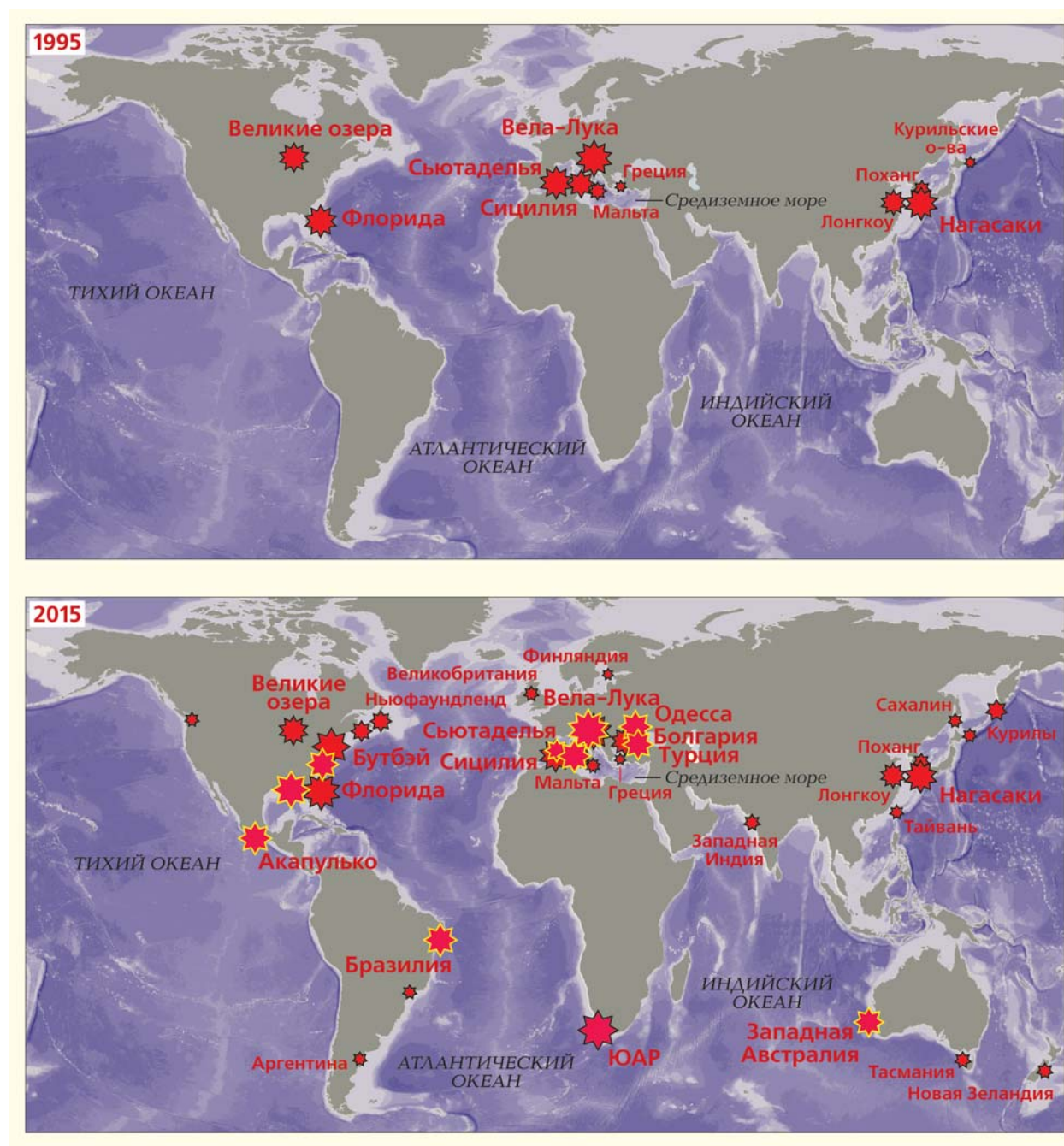


Рис.12. Районы известных метеоцунами по данным 1995 г. (вверху) и 2015 г.

во все новых и новых районах. Две причины способствовали интересу специалистов к этому явлению: большое сходство метеоцунами и обычных цунами, аналогичный характер разрушительного воздействия на побережье и наличие в существующих каталогах цунами большого количества событий «неизвестного происхождения», обусловленных, по-видимому, именно метеорологическими причинами.

Катастрофическое цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане способствовало колоссально-

му возрастанию интереса к проблеме цунами в целом. Была перестроена вся система измерений длинноволновых колебаний в океане. Непрерывные наблюдения за процессами в частотном диапазоне волн цунами стали проводиться не только в Тихом океане (где они традиционно велись), но и в других бассейнах (в частности, в Атлантическом и Индийском океанах, Средиземном и Карибском морях). Во многих районах одновременно были налажены измерения микрофлуктуаций атмосферного давления. Важная информация об

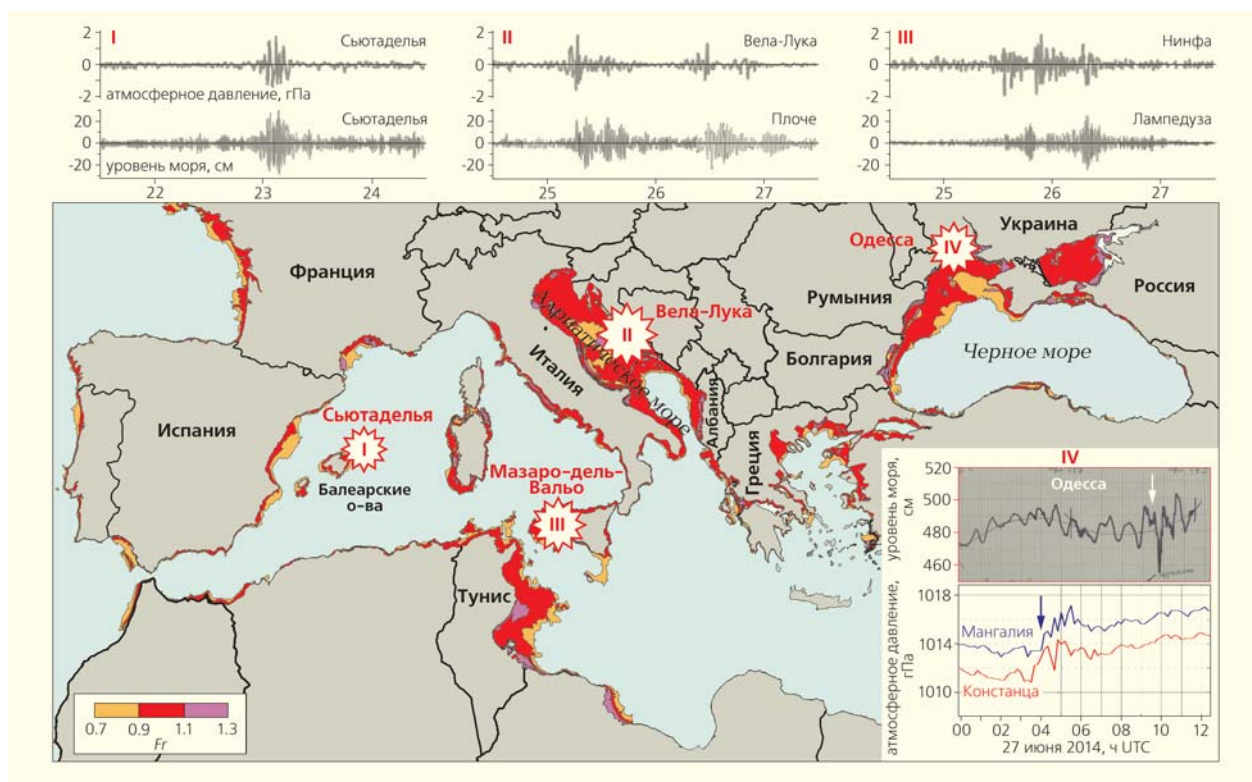


Рис.13. Карта района Средиземного и Черного морей. Звездочками отмечены пункты, где 23—27 июня 2014 г. наблюдались разрушительные метеоцунами. В левом нижнем углу приведено распределение числа Фруда, характеризующее отношение скоростей атмосферных и океанских волн. На врезках показаны записи атмосферных возмущений и метеоцунами для четырех районов: Сьютаделья (Испания), Вела-Лука (Хорватия), Мазаро-дель-Вальо (Италия) и Одесса (Украина).

аномальных явлениях, имеющих характер волн цунами, стала регулярно поступать и от населения. В итоге был получен огромный объем информации, и стало ясно, что метеорологические цунами, пусть и с разной степенью опасности, наблюдаются повсеместно (рис.12).

Необыкновенно «урожайным» в отношении метеоцунами оказался 2014 г. 9 февраля произошло сильное метеоцунами в Прайя-ду-Казино на побережье Бразилии, вызвавшее панику у населения и серьезные повреждения береговой инфраструктуры. Спустя полтора месяца метеоцунами обрушилось на пляжную зону г.Панама-Сити (штат Флорида). Несколько значительных метеоцунами произошли на западном побережье Австралии и на северном (черноморском) побережье Турции. Однако основной интерес представляет уникальная цепочка событий, прокатившаяся 23—27 июня над Средиземноморьем и северо-западной частью Черного моря (рис.13).

Многочисленные исследования, проведенные в районах Балеарских о-вов и в Адриатике, показали, что метеоцунами здесь возникают только в теплое время года и только при наличии определенных синоптических условий:

- поступления теплого и сухого воздуха из Африки на высотах ~1500 гПа (~1500 м);

- присутствия направленного с юго-запада хорошо выраженного сильного струйного течения на высотах ~500 гПа (~5000 м);

- наличия атмосферных слоев с высокой вертикальной неустойчивостью (т.е. с малыми числами Ричардсона $Ri < 0.25$) на высотах 600—400 гПа.

Именно такая ситуация и сложилась 23 июня 2014 г. над западной частью Средиземного моря (рис.14). На Балеарских о-вах даже была объявлена «желтая тревога» — предупреждение об угрозе умеренного метеоцунами [8]. Данные фактических высокоточных измерений в Сьютаделье показали прохождение сильного цуга атмосферных волн и связанных с ним колебаний уровня моря высотой до ~1 м (врезка I на рис.13). Грубые прикидки показали, что течения в бухте при этом превысили четыре узла и представляли реальную угрозу для стоящих там судов.

Далее вся атмосферная система, продолжая усиливаться, смещалась на восток, достигнув максимума развития 25—26 июня в районе Тирренского и Адриатического морей (рис.14). Сильнейшее метеоцунами, сопровождавшееся бором, наблюдалось в Мазаро-дель-Вальо (на западном побережье Сицилии). Инструментальные измерения уровня моря и атмосферного давления там не проводились, но сильные колебания были зарегист-

рированы в соседних пунктах (рис.13, врезка III). Практически одновременно сильные наводнения, вызванные метеоцунами, наблюдались у побережья Хорватии, т.е. примерно в 500 км к северу от Сицилии (рис.13). Наиболее интенсивные колебания отмечались в Вела-Луке (~2.5 м), в Стари-Граде, Врбоске и Риеке дубровацкой (более 2 м). Здесь в целом ряде пунктов были получены надежные записи проходивших пакетов атмосферных волн и связанных с ними длинноволновых колебаний уровня моря (рис.13, врезка II).

При продолжающемся смещении системы на восток заметные колебания уровня моря наблюдались на греческих островах и в Турции [8]. 27 июня весь фронт сместился на западную часть Черного моря (рис.14). Цифровые измерители атмосферного давления в Констанце и Мангалии (Румыния) зафиксировали в 04:00–06:00 прохождение сильных (>2.5 гПа) атмосферных волн, а спустя примерно 4 ч (около полудня местного времени) на пляжи Одессы обрушилась разрушительная волна высотой 1.5–2 м, получившая название «Одесское цунами». На барограмме Одесской гидрометеосерватории примерно в то же время отмечен скачок атмосферного давления. В отличие от Испании, Италии и Хорватии, где метеорологические цунами хорошо знакомы, и экстремальные волны, наблюдавшиеся 23–26 июня, сразу были названы «метеоцунами», явление в Одессе породило массу противоречивых слухов и гипотез (землетрясение, оползень, подводный взрыв, прохождение подводной лодки и др.). Подробно эти гипотезы разбирались и на страницах «Природы» [22]. Общая ситуация очень напоминала ту, которая наблюдалась в Хорватии после катастрофического наводнения в Вела-Луке в 1978 г.

Говоря о цепочке событий 23–27 июня 2014 г., не следует, конечно, думать, что некая морская волна распространилась от побережья Испании до Черного моря. Не следует также считать, что от Испании до Одессы двигалось атмосферное возмущение (типа фронтальной зоны джеречо), порождающая метеоцунами на своем пути. Метеорологические цунами преимущественно вызываются сравнительно мелкомасштабными (20–50 км) возмущениями атмосферного давления, которые возникают при определенных атмосферных ситуациях [23]. Именно такая ситуация и наблюдалась над Средиземноморьем в конце июня 2014 г. Условно ее можно назвать «кипящая атмосфера». Ведущий поток переносил и подпитывал атмосферные возмущения, а они на своем пути порождали метеоцунами.

Почему же сильные метеоцунами проявляются не повсеместно, а во вполне определенных районах? На рис.13 показано распределение числа Фруда (Fr), которое для данного случая определяется как $Fr = U/c$. Резонанс наступает, когда $Fr \approx 1.0$, т.е. скорости длинных волн и атмосферных возмущений совпадают. Все экстремальные события

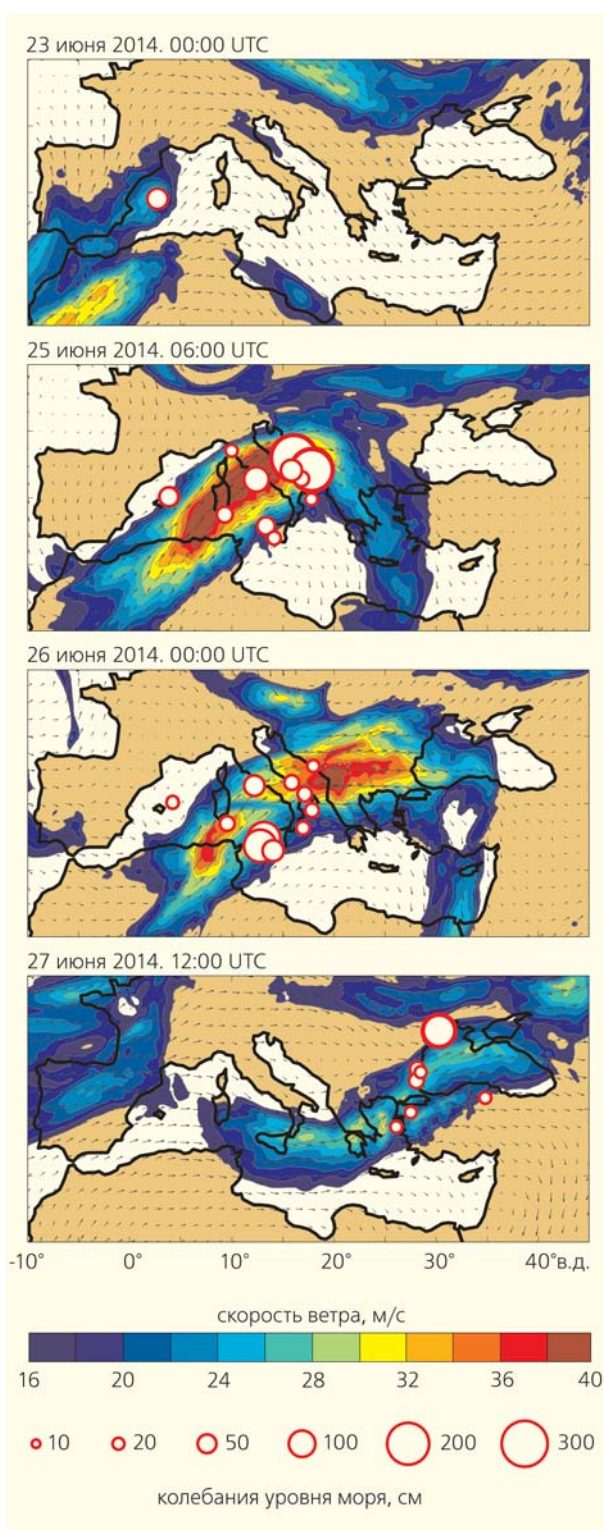


Рис.14. Распространение 23—27 июня 2014 г. над Средиземноморьем атмосферной системы с показанным направлением и скоростями ветра на горизонте 500 гПа. Ось струйного течения соответствует зоне максимальных скоростей. Красными кружками для различных пунктов показана интенсивность колебаний уровня моря (метеоцунами) с периодами меньше 3 ч.

23–27 июня 2014 г. наблюдались именно в таких «резонансных» районах [8]. Большую роль играло и расположение береговой линии относительно направления движения атмосферных возмущений. Сильные метеоцунами образуются на «наветренных» берегах. Волне в открытом море нужно пространство, чтобы сформироваться, разбежаться и усилиться. Именно по этой причине метеоцунами на хорватском побережье Адриатики гораздо сильнее, чем на итальянском, где они преимущественно формируются волнами, отраженными от противоположного (восточного) берега.

* * *

Суммируя все выше сказанное, можно сделать вывод: метеоцунами — опасное стихийное бедствие и очень интересное природное явление. Мы находимся еще в самом начале его изучения. Очевидно, что для некоторых районов Мирового океана такие события представляют очень серьезную угрозу. Но даже там, где известен только единственный случай, нужно помнить железный принцип: *Если подобное явление произошло один раз, то рано или поздно оно здесь произойдет опять!* ■

Литература

1. Vučetić T., Vilibić I., Tinti S., Maramai A. The Great Adriatic flood of 21 June 1978 revisited: An overview of the reports // *Phys. Chem. Earth*. 2009. V.34. P.894–903.
2. Orlić M., Belušić D., Janeković I., Pasarić M. Fresh evidence relating the great Adriatic surge of 21 June 1978 to mesoscale atmospheric forcing // *J. Geophys. Res.* 2010. V.115. C06011. doi:10.1029/2009JC005777.
3. Titov V.V., Rabinovich A.B., Mofjeld H. et al. The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami // *Science*. 2005. V.309. P.2045–2048.
4. Hodžić M. Occurrences of exceptional sea level oscillations in the Vela Luka Bay // *Priroda*. 1979. V.68. №2–3. P.52–53.
5. Orlić M. About a possible occurrence of the Proudman resonance in the Adriatic // *Thalassia Jugoslavica*. V.16. №1. P.79–88.
6. Vilibić I., Domijan N., Orlić, M. et al. Resonant coupling of a traveling air-pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters // *J. Geophys. Res.* 2004. V.109. C10001. doi:10.1029/2004JC002279
7. Vilibić I., Šepić J. Destructive meteotsunamis along the eastern Adriatic coast: overview // *Phys. Chem. Earth*. 2008. V.34. №17–18. P.904–917.
8. Šepić J., Vilibić I., Rabinovich A., Monserrat S. Widespread tsunami-like waves of 23–27 June in the Mediterranean and Black seas generated by high-altitude atmospheric forcing // *Sci. Rep.* 2015. V.5. №11682. P.1–5. doi: 10.1038/srep11682
9. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб., 1993.
10. Defant A. *Physical oceanography*. New York, 1961.
11. Rabinovich A.B., Monserrat S. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril islands: Descriptive and statistical analysis // *Natural Hazards*. 1996. V.13. №1. P.55–90.
12. Rabinovich A.B., Monserrat S. Generation of meteorological tsunamis (large amplitude seiches) near the Balearic and Kuril islands // *Natural Hazards*. 1998. V.18. №1. P.27–55.
13. Monserrat S., Vilibić I., Rabinovich A.B. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2006. V.6. P.1035–1051.
14. Rabinovich A.B. Seiches and harbour oscillations // *Handbook of coastal and ocean engineering* / Ed. Y.C.Kim. Singapore, 2009. P.193–236.
15. Thomson R.E., Rabinovich A.B., Krassovski M.V. Double jeopardy: Concurrent arrival of the 2004 Sumatra tsunami and storm-generated waves on the Atlantic coast of the United States and Canada // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V.34. L15607. doi:10.1029/2007GL030685
16. Šepić J., Rabinovich A.B. Meteotsunami in the Great Lakes and on the Atlantic coast of the United States generated by the «derecho» of June 29–30. 2012 // *Natural Hazards*. 2014. V.74. P.75–107. doi: 10.1007/s11069-014-1310-5.
17. Праудмен Дж. Динамическая океанография. М., 1957.
18. Monserrat S., Rabinovich A.B., Casas B. On the reconstruction of the transfer function for atmospherically generated seiches // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V.25. №12. P.2197–2200.
19. Рабинович А.Б., Монсеррат С., Файн И.В. Численное моделирование экстремальных сейшевых колебаний в районе Балеарских островов // *Океанология*. 1999. Т.39. №1. С.16–24.
20. Miles J.W., Munk W.H. Harbor paradox // *J. Waterways, Harbors Coastal Eng. Div. Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 1961. V.87. P.111–130.
21. Hibiya T., Kajiura K. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay // *J. Oceanogr. Soc. Japan*. 1982. V.38. P.172–182.
22. Никонов А.А., Флейфель Л.Д. Цунами в Одессе: природный или рукотворный феномен? // *Природа*. 2015. №4. С.36–43.
23. Thomson R.E., Rabinovich A.B., Fine I.V. et al. Meteorological tsunamis on the coasts of British Columbia and Washington // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2009. V.34. №17–18. P.971–988.

Геном неандертальца: открытые вопросы

М.С.Гельфанд

Как показывают антропологические, а теперь уже и геномные данные, неандертальцы (вопреки тому, чему нас учили в школе) — сестринская ветвь генеалогического древа современных людей по отношению к нашим непосредственным предкам, кроманьонцам. Однако анализ ДНК, выделенной из палеонтологических находок, свидетельствует о том, что отношения между неандертальцами и кроманьонцами не были чисто сестринскими.



Михаил Сергеевич Гельфанд, доктор биологических наук, член Европейской академии, заместитель директора Института проблем передачи информации им.А.А.Харкевича РАН, профессор факультета биоинженерии и биоинформатики Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — биоинформатика, сравнительная и функциональная геномика, системная биология, метагеномика.

Ключевые слова: эволюция, геномика, неандертальцы.
Key words: evolution, genomics, Neanderthals.

Гибридизация предков

После ранних работ по анализу митохондриальных геномов — сначала их фрагментов, а потом полных — и фальстарта с ядерным геномом, оказавшимся загрязненным современной ДНК, в 2010 и 2014 гг. были опубликованы качественные последовательности неандертальского генома из ископаемых останков, найденных в хорватской пещере Виндия* и в Денисовой пещере на Алтае [1–5]. Параллельно неожиданным образом разворачивалась история с геномом еще одного обитателя Денисовой пе-

щеры** — денисовца, который оказался представителем третьей ветви рода *Homo*, чуть более близкой к неандертальцу, чем к кроманьонцу [6–8].

Анализ неандертальского генома дал ответ на вопрос, давно обсуждавшийся палеонтологами: скрещивались ли пришедшие из Африки кроманьонцы с давно жившими в Евразии неандертальцами перед тем, как вытеснить их. Археологические и антропологические свидетельства не были однозначными. Находили черепа, совмещавшие неандертальские и кроманьонские черты, обнаруживали культурные заимствования кроманьонцев у неандертальцев, а в каких-то пещерах — неандертальские слои, лежавшие поверх кроманьонских. Однако все эти находки были оспорены тем или иным способом, и ситуация оставалась неопределенной. Сопоставление же геномов неандертальца и современных людей показало, что примерно 2% генома каждого современного европейца и азиата имеет неандертальское происхождение (а в африканских популяциях неандертальские аллели отсутствуют) [5]. У всех нас эти фрагменты разные, поэтому можно их собрать, проанализировав множество современных геномов, и реконструировать геном нашего неандертальского пращура (химерный, так как весьма вероятно, что произошло несколько событий межвидовой гибридизации).

* В 1974–1986 гг. в хорватской пещере Виндия обнаружили несколько десятков фрагментов черепов, челюстей и костей посткраниального (лежащего ниже головного отдела) скелета как минимум 12 неандертальцев.

** В 1984 г. в Денисовой пещере на Алтае в разных слоях, датированных 60 и 120 тыс. лет назад, нашли два зуба. В 2008 г. в другом слое археологи обнаружили фалангу мизинца кисти и зуб человека, жившего 50–30 тыс. лет назад. В 2010 г. в том же слое обнаружили еще и фалангу пальца стопы.

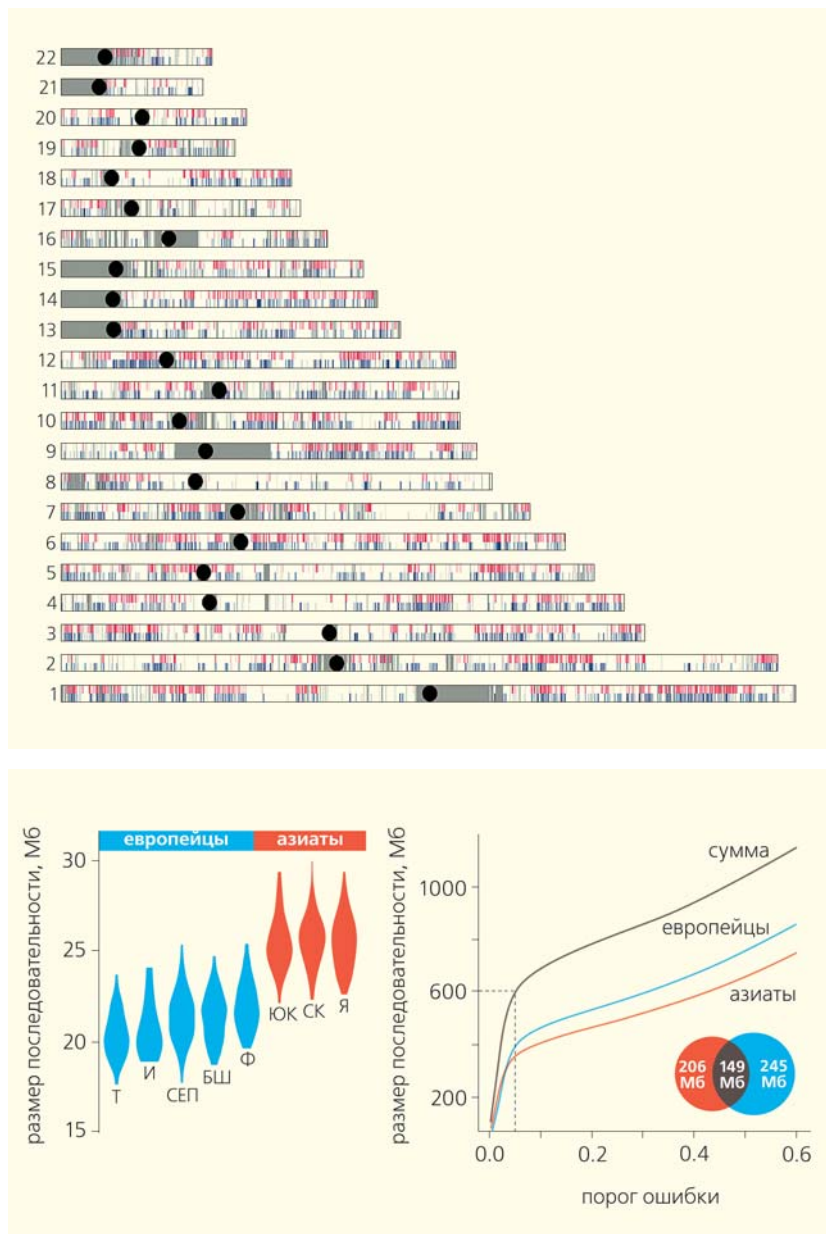


Рис.1. Неандертальское наследие в геномах современных европейцев (синие фрагменты, линии, фигуры) и азиатов (красные) [9]. Вверху представлено распределение неандертальских фрагментов в геномах современных людей (хромосомы пронумерованы). Серые участки — не прошедшие критерии фильтрации; черные точки — центромеры. Внизу слева показано распределение суммарного размера неандертальских последовательностей в индивидуальных геномах представителей нескольких современных популяций европейцев и азиатов. Плотность распределения (ширину полосы) рассчитывали для следующих групп: 98 тосканцев (Т); 14 иберийцев (И); 85 североамериканцев европейского происхождения (СЕП); 89 британцев и шотландцев (БШ); 93 финнов (Ф); 100 человек из Южного Китая (ЮК); 97 человек из Северного Китая (СК); 89 японцев (Я). Внизу справа — зависимость размера объединения неандертальских фрагментов по всей выборке в геномах современных европейцев и азиатов от порога ошибки перепредсказания (процентной доли фрагментов, ложно предсказанных как неандертальские). Диаграмма Венна показывает размер общих и специфичных для европейцев и азиатов неандертальских последовательностей при ошибке перепредсказания 5%.

Оказалось, что таким способом удастся восстановить около 20% генома нашего неандертальского предка [9]. Кстати, он, похоже, генетически ближе всего к неандертальцу из Мезмайской пещеры* на Северном Кавказе [5]. Авторы соответствующей статьи не обсуждают наблюдаемый парадокс: в то время как у каждого отдельного азиата неандертальская доля генома чуть выше, чем у европейца, объединение азиатских фрагментов оказывается меньшим, чем европейских (рис.1). Это противоречит высказанной в ряде работ гипотезе о дополнительной гибридизации предков азиатов с неандертальцами [9, 10]. Вопрос остается открытым, и к нему стоит вернуться после усовершенствования биоинформатических методов (например, после создания таких, которые бы учитывали частоты неандертальских вариантов генов в современных популяциях) и получения нового материала. В частности, следует учесть возможность различий в популяционной истории европейцев и азиатов и в режиме естественного отбора после их расхождения.

Другая неожиданность возникла при сопоставлении денисовского генома с современными. Оказалось, что геномы коренных жителей Новой Гвинеи и Австралии помимо неандертальских фрагментов содержат участки денисовского происхождения — от 3 до 5% [7, 8]. Эти оценки все время пересматриваются — видимо, из-за недостаточного количества современных геномов, доступных для анализа. Реконструкция генома гибридизовавшегося денисовца — еще одна задача на будущее.

Рассуждая о том, какую часть современных геномов составляют неандертальские (или денисовские) варианты, правильно-

* В 1993 г. в пещере Мезмайская на Северном Кавказе археолог Л.В.Голованова нашла скелет неандертальского младенца. Позже в вышележащем слое обнаружили фрагменты черепа второго ребенка.

нее и точнее было бы говорить о доле *идентифицируемых* фрагментов, потому что она сильно зависит от алгоритма биоинформатического анализа (в том числе и от установленных порогов). Так, еще в одной работе неандертальский и современный геномы перекрывались приблизительно на 30% [11]. Известно, что средний размер неандертальских фрагментов со временем (по мере удаления от прародителя) уменьшается вследствие рекомбинации. В какой-то момент их уже невозможно идентифицировать: участки становятся слишком короткими, чтобы количество идущих подряд позиций с неандертальскими аллелями было статистически значимо. Однако этот же феномен укорочения позволяет использовать распределение длин неандертальских фрагментов для того, чтобы датировать время гибридизации.

В геноме кроманьонца из Усть-Ишима (Омская обл.), жившего 45 тыс. лет назад, выявили долю неандертальских аллелей чуть большую, чем у современных людей ($2.3 \pm 0.3\%$ против $1.9 \pm 0.2\%$ у азиатов и $1.7 \pm 0.1\%$ у европейцев — по одному и тому же методу оценки) [12]. Однако неандертальские фрагменты у этого кроманьонца гораздо протяженнее: их длина больше, чем в современных геномах, в среднем в 2–4 раза. Подсчеты показывают, что гибридизация случилась 60–50 тыс. лет назад, т.е. за 400–200 поколений до усть-ишимца, кость которого была независимо датирована стандартными методами. Похожий результат получился при исследовании генома кроманьонца из Костёнок (Воронежская обл.), который жил примерно 36 тыс. лет назад [13]. Чуть большая, чем в современных геномах, доля неандертальских аллелей образует существенно более длинные непрерывные фрагменты. Кстати, похожую, хотя немного менее точную датировку (65–47 тыс. лет назад) получили с помощью анализа неравновесного сцепления* неандертальских вариантов генов в современных геномах [14].

Самый же удивительный пример такого рода — последовательность ДНК, извлеченной из 40-тысячелетней челюсти, которую в 2002 г. нашли в румынской пещере Пештера ку Оасе (рис.2) [15]. Неандертальские фрагменты в этом геноме настолько длинные, что позволяют утверждать: прадедушка (в крайнем случае прапрадедушка или прапрапрабабушка) носителя челюсти был неандертальцем. Впрочем, популяция, к которой он принадлежал, не внесла вклад в современное генетическое разнообразие в Европе: она оказалась тупиковой ветвью и не оставила потомков.

* Неравновесное сцепление — феномен повышенной (по сравнению с ожидаемой при случайном распределении) частоты одновременной встречаемости комбинации двух вариантов генов. Оно может быть обусловлено не только их тесным генетическим сцеплением, но и наличием адаптивного преимущества конкретной комбинации.



Рис.2. Нижняя челюсть (40 тыс. лет) человека из румынской пещеры Пештера ку Оасе — представителя популяции, оказавшейся тупиковой ветвью эволюции [16].

Выше было сказано, что неандертальские аллели отсутствуют в африканских популяциях, а денисовские обнаруживаются только в австронезийских. Это не совсем точно. В геномах масаев (представителей одного из самых известных племен Восточной Африки) имеется небольшая доля неандертальских аллелей, однако их наличие объясняется контактами предков масаев с европейцами, которые и занесли эти варианты. Проверили это так: проанализировали соседние с неандертальскими полиморфные (вариабельные) участки ДНК — и оказалось, что они имеют европейское происхождение [10]. Аналогично в геномах современных азиатов и некоторых американских индейцев есть небольшая примесь денисовских вариантов генов, но ее склонны объяснять контактами с предками папуасов [17, 18].

Чтобы найти неандертальский вклад в современные геномы, их сравнивают с геномами неандертальцев. А если бы последние не были известны — возможно ли было бы идентифицировать архаичные участки? Да, ведь неандертальский фрагмент в современном европейском геноме обладает статистическими особенностями: в нем существенно больше отличий от гомологичных участков геномов большинства других европейцев и азиатов и особенно от участков геномов всех африканцев. Это позволяет распознавать предковые места генома, ища те, которые имеют большое число уникальных вариантов. Чтобы протестировать такой метод, можно поискать неандертальские фрагменты, забыв про известные геномы, а потом сравнить результаты со случаем, когда применяют стандартный подход. Точность распознавания при этом оказывается меньше, но ненамного [9].

А теперь применим этот подход к геномам африканцев. Вдруг в Африке тоже происходило что-то интересное? Похоже, что именно так: в геномах нескольких этнических групп обнаруживаются фрагменты, сильно отличающие своих хозяев от остального человечества [19]. Таких

участков всего три, и длина их невелика (десятки тысяч нуклеотидов), но они могут быть свидетельством гибридизации африканских кроманьонцев с неизвестными гоминидами.

Материнское наследство

Митохондриальные геномы наследуются строго по материнской линии. Как и в случае с неандертальцем, для денисовца последовательность митохондриального генома опубликовали раньше (хотя и всего на полгода), чем ядерного [6–8]. Оказалось, что на филогенетическом дереве, построенном по митохондриальным геномам, денисовцы сильно удалены от неандертальцев и кроманьонцев: расхождение митохондриальных линий денисовцев и общих предков неандертальцев и кроманьонцев случилось около 1 млн лет назад. Антропологических материалов мало, поэтому, исходя из митохондриальной последовательности денисовцев, их первоначально отнесли к рано отделившейся ветви рода *Homo*. Лишь после определения последовательности ядерного генома стало ясно, что это сестринская ветвь по отношению к неандертальцам, а история митохондрий отражает интрогрессию*, а не историю вида как такового.

* Интрогрессия — приобретение генов другого вида при спонтанной межвидовой гибридизации и последующем возвратном скрещивании гибрида с одним из родительских видов.

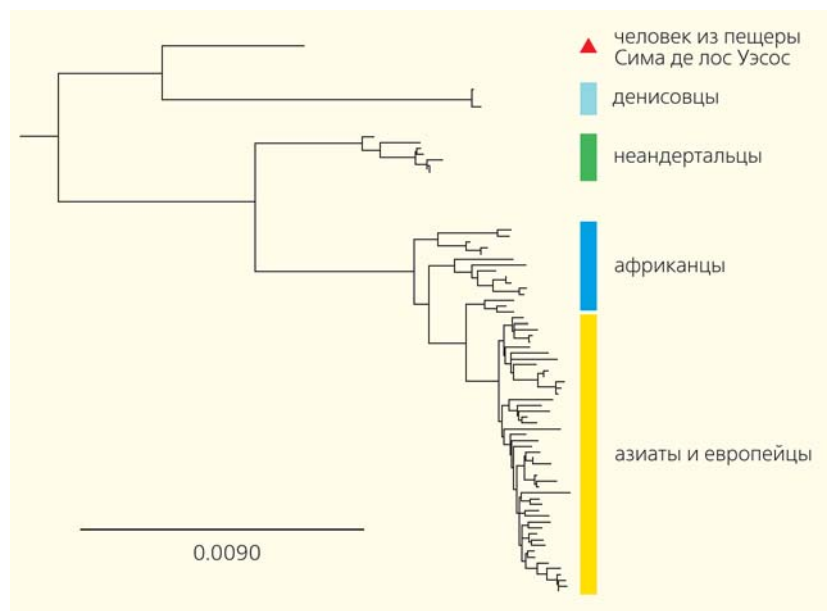


Рис.3. Филогенетическое дерево, построенное по полным митохондриальным геномам современных азиатов и европейцев (желтый цвет), современных африканцев (синий), неандертальцев (зеленый), денисовцев (голубой) и человека из пещеры Сима де лос Уэсос (красный) [20]. Масштаб для ветвей дерева — число нуклеотидных замен на одну позицию (т.е. количество замен, деленное на длину последовательности).

Следует отметить, что мы знаем денисовцев всего из одной популяции, и поэтому неясно, до какой степени можно обобщать такое наблюдение. Тем не менее оно показывает, что денисовцы гибридизовались с древней ветвью рода *Homo*. Следы этой гибридизации можно видеть и в ядерном геноме, однако они пока не были исследованы систематически [8]. Это будет сделано, как только (и если) станут доступны новые денисовские геномы.

Ближайшим же родственником денисовцев по материнской линии оказался человек из пещеры Сима де лос Уэсос** в Испании, живший более 300 тыс. лет назад (рис.3) [20]. Его ядерный геном пока не определен. Хочется надеяться, что совершенствование экспериментальных методик и/или накопление образцов рано или поздно позволят это сделать. Будет крайне интересно сравнить его с геномом денисовца, чтобы найти интрогрессивные участки. Однако, как уже было сказано, их можно искать и из внутренних соображений: во-первых, как фрагменты повышенной гетерозиготности (можно предположить, что в них один из вариантов — денисовский, а второй — интрогрессивный) и, во-вторых, как места с повышенной локальной концентрацией отличий от неандертальца и кроманьонца.

Вернемся ненадолго к взаимоотношениям кроманьонцев, неандертальцев и денисовцев, реконструируемым по ядерным геномам. Ближайший родственник гибридизовавшегося неандертальца — неандерталец из пещеры Мезмайская на Северном Кавказе, и расхождение между ними существенно меньше, чем между алтайским денисовцем и тем денисовцем, вклад которого мы видим в геномах австронезийцев [5]. Пока не обнаружено интрогрессии в обратном направлении, т.е. вклада кроманьонцев в геномы неандертальцев и денисовцев. Впрочем, это может быть тривиальным следствием того факта, что известно относительно небольшое число геномов древних людей. Наконец, пока ничего не сказано про то, к какому из изученных неандертальцев ближе тот, чей вклад есть в геноме человека из Пештера ку Оасе, хотя, казалось бы, это относительно простой вопрос [15].

** В 1992–1993 гг. в испанской пещере Сима де лос Уэсос антропологи обнаружили несколько черепов и сотни других костей вероятных ранних предков неандертальцев. Находки продолжились и в последующие годы, суммарно найдены кости как минимум 28 индивидов.

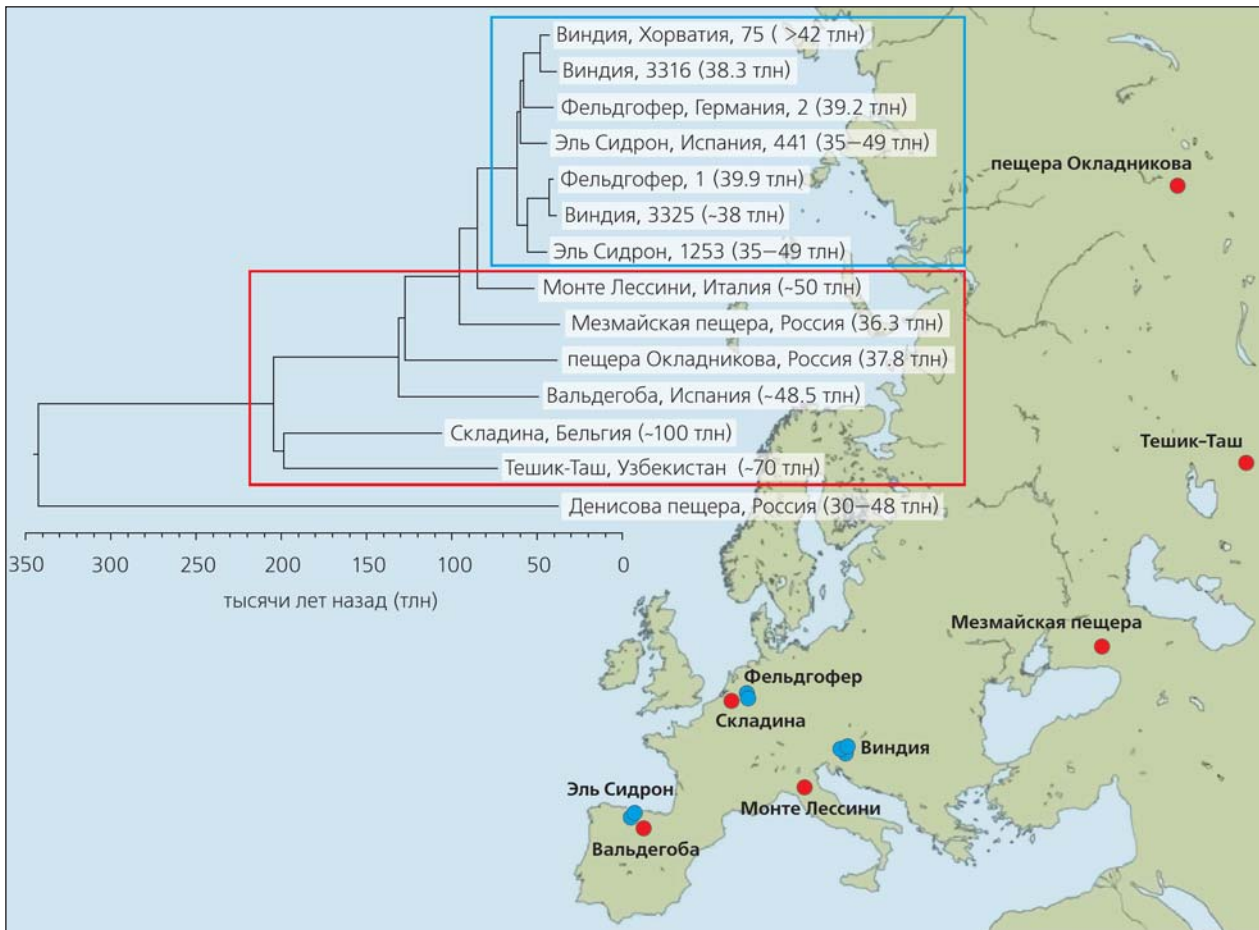


Рис.4. Филогенетическое дерево, построенное по фрагментам митохондриальных геномов неандертальцев, и карта, показывающая места (пещеры) палеоантропологических находок [21]. Синий цвет соответствует «молодым» европейским неандертальцам, красный — азиатским и «старым» европейским. На филогенетическом дереве числа перед скобками обозначают номера, присвоенные фрагментам, найденным в одном месте, но принадлежавшим разным людям.

Известно более 10 относительно протяженных фрагментов митохондриальных геномов неандертальцев, поэтому предварительные выводы о структуре популяции можно делать лишь со всеми оговорками о недостаточности данных и об осторожности с обобщением митохондриальной истории на историю вида. Примечательно, что митохондрии неандертальцев, живших в Европе менее 48 тыс. лет назад, очень похожи, в то время как азиатские и более древние европейские митохондрии существенно разнообразнее [21]. При этом кости, из которых выделяли ДНК для определения этих геномов, были найдены в различных частях Европы — как в южной (Испании, Хорватии), так и в северной (Германии) (рис.4). Видимо, это означает, что большинство групп европейских неандертальцев вымерли примерно 50 тыс. лет назад, в период пика оледенения, а потом произошло повторное заселение Европы потомками выжившей группы. Следует отметить, однако, что в соответствующей статье время расхождения митохондриаль-

ных геномов неандертальцев и денисовца — 350 тыс. лет назад, что существенно меньше оценок, приведенных другими учеными. Впрочем, это не влияет на сделанные выводы, поскольку датировки образцов получены и традиционными археологическими методами, независимо от молекулярной реконструкции.

Существует еще один способ исследовать древние митохондриальные геномы. Дело в том, что ядерные геномы человека содержат большое количество нефункциональных фрагментов митохондриального генома. Такие участки накапливают случайные мутации, однако в силу особенностей механизмов репликации и репарации ДНК это происходит существенно медленнее, чем накапливаются замены в самом митохондриальном геноме. Тем самым, такие фрагменты оказываются своего рода геномными окаменелостями, которые сохраняют отпечаток митохондриального генома, существовавшего в момент его встраивания в ядерный геном. Для одного из фрагментов это случилось почти 3 млн лет назад [22].

Какими они были?

Неандертальцы были светлокожими, с рыжими волосами и светлыми глазами. Об этом нам поведал вариант гена *MC1R*, кодирующего меланокортиновый рецептор 1-го типа, который отвечает за пигментацию у людей [23]. Некоторые неандертальцы могли чувствовать горький вкус фенилтиокарбамида — вещества, которое 70% современных людей считают горьким, а остальные безвкусным. У неандертальца из испанской пещеры Эль Сидрон* обнаружили соответствующий аллель гена рецептора горького вкуса *TAS2R38* (*TAS2R38* (TAS2R Receptor 2 member 38)) [24]. Денисовцы, наоборот, имели темную кожу и коричневые волосы [8]. Ген амилазы — фермента слюны, катализирующего гидролиз крахмала, — не был дублирован ни у денисовцев, ни у неандертальцев; такое приспособление к питанию растительной пищей было только у кроманьонцев [25]. Кстати, похожая дубликация произошла у собак при их одомашнивании [26]. Зато и у денисовцев, и у неандертальцев имеется мутация в гене рецептора к лептину *LEPR* (*LEPR* (LEP Receptor)), влияющего на метаболизм бурого жира и, стало быть, адаптацию к холоду (у азиатов в этом гене другая мутация) [27].

Интересные результаты дает также сопоставление нескольких неандертальских геномов. Неандертальцы из пещеры Эль Сидрон селились патрилокально, т.е. жена и дети жили в племени мужа [28]. Мы знаем это, потому что среди группы обитателей этой пещеры, живших примерно в одно время, у женщин обнаружили несколько вариантов гипервариабельной области митохондриального генома, а у всех мужчин она была одной и той же, — значит, племя принимало женщин со стороны. Качество прочтения некоторых ядерных геномов таково, что мы можем различить аллели, находящиеся на гомологичных хромосомах, и тем самым изучать уровень гетерозиготности (среднее количество отличий) и участки гомозиготности (тождественные участки генома, возникающие в результате близкородственных браков). Оказалось, что генетическое разнообразие в группах денисовцев и неандертальцев было меньше, чем в группах современных людей [8, 24]. Как следствие, отрицательный (очищающий) отбор был ослаблен, поэтому во всех трех хорошо исследованных геномах неандертальцев наблюдается повышенное число слабавредных аллелей (для денисовца подобный анализ не проводился) [29]. При этом генетические расстояния между представителями названных групп были существенно больше, чем для современных этнических

* В 1994 г. в испанской пещере Эль Сидрон спелеологи случайно нашли неандертальские скелетные останки. С 2000 г. там велись систематические раскопки, в ходе которых было обнаружено более 1.5 тыс. костей, принадлежавших как минимум 11 индивидам.

групп. Наконец, в геноме алтайского неандертальца обнаружили относительно длинные участки гомозиготности, что свидетельствует о преобладании близкородственных браков (средней степени родства — примерно как у двоюродных или троюродных братьев и сестер) [29]. В совокупности с повышенным числом слабавредных мутаций это может означать заметный генетический груз. Кстати, у денисовцев, живших чуть раньше в той же пещере, повышенной доли участков гомозиготности не наблюдается [8].

Что они дали нам

Анализировать неандертальский вклад в современные геномы можно по-разному. Концептуально самый простой подход — изучать неандертальские аллели отдельных генов, их частоты в современных популяциях. Также можно исследовать, какие функциональные группы генов имеют повышенную долю в реконструированной части неандертальского генома. И наконец, можно проверить, не повышена ли в выбранных группах генов средняя частота неандертальских аллелей в той или иной современной популяции. В реальности эти методы применяют в разных сочетаниях.

Среди функциональных групп генов выделяют три. Во-первых, это гены, от которых зависят структура и цвет кожи и волос:

- *BNC2*, ген, кодирующий фактор транскрипции в кератиноцитах (высокая частота неандертальского аллеля у европейцев);
- *KRT6A/KRT5*, кластер кератиновых генов (высокая частота у европейцев и азиатов);
- *POU2F3*, ген, кодирующий фактор транскрипции, влияющий на деление и дифференцировку кератиноцитов (высокая частота у азиатов);
- *SCL45A2* и *HERC2*, аллели, определяющие светлую кожу (европейцам они достались от неандертальцев);
- *MC1R*, ген, определяющий цвет кожи (неандертальский вариант распространен у азиатов, особенно у тайваньцев);
- *HYAL2*, ген, отвечающий за адаптацию к ультрафиолетовому излучению (высокая частота неандертальского варианта у азиатов) [9, 11, 30–32].

Эволюционная трактовка этих наблюдений довольно проста. Когда темнокожие кроманьонцы, предки евроазиатов, ушли из Африки на север и гибридизовались с неандертальцами, уже приспособленными к жизни в условиях существенно более слабого (другая широта) и редкого (иной климат) солнечного излучения, они получили неандертальские варианты соответствующих генов, оказавшиеся адаптивными.

Во-вторых, неандертальские и денисовские варианты часто встречаются в генах, определяющих работу иммунной системы [33–36]. Это можно объяснить в рамках той же логической схемы.

В Азии и Европе кроманьонцы встретились как с новыми патогенами и паразитами, так и с приспособившимися к ним неандертальцами. Отсюда — неандертальские варианты

- гена *STAT1*, влияющего на активность врожденного иммунитета (в Меланезии часты и неандертальские, и денисовские варианты);

- кластера генов *OAS*, противостоящих вирусным инфекциям (у многих европейцев и азиатов — от неандертальцев, у австронезийцев — от денисовцев);

- некоторых аллелей генов главного комплекса гистосовместимости класса I.

Наконец, доля неандертальских вариантов непропорционально велика среди генов катаболизма липидов, причем только у европейцев [37]. Либо шел отбор, связанный с особенностями диеты европейцев (больше мяса в их рационе, особенно до появления в Европе сельского хозяйства), либо это объясняется специфичностью липидного катаболизма в их мозге. В пользу первой гипотезы говорит повышенная у мексиканцев частота неандертальских вариантов фрагмента, включающего гены *SCL16A11* и *SCL16A13*, которые участвуют в метаболизме липидов в печени [38]. В пользу второй — тот факт, что экспрессия генов липидного катаболизма и концентрации связанных с ним метаболитов отличают европейцев от азиатов и африканцев [37]. Наши собственные предварительные результаты показывают, что в геномах кетов (представителей малочисленного коренного народа Сибири), диета которых ближе к европейской (не современной, конечно, а доисторической), а этническое происхождение — к китайскому, доля неандертальских вариантов среди генов катаболизма липидов мала, а значит, это также свидетельствует в пользу второй гипотезы.

Видимо, самый яркий пример интрогрессии отдельного гена — *EPAS1*. Это ген, который кодирует транскрипционный фактор, участвующий в кислородозависимой регуляции некоторых других генов. Практически у всех жителей Тибета *EPAS1* представлен аллелем денисовского происхождения, обеспечивающим приспособление к жизни на большой высоте (рис.5) [30]. Вопрос о том, получен ли он непосредственно в результате гибридизации или через предков австронезийцев, остается открытым. Также интересно, какие варианты этого гена присутствуют в геномах неандертальцев.

Чем мы от них отличаемся

В геномах современных людей имеются большие области, в которых неандертальские варианты полностью отсутствуют. В геномах европейцев и азиатов найдено соответственно 4 и 14 таких участков длиной больше 10 млн нуклеотидов [10]. Они обогащены функциональными (в частности



Рис.5. Варианты гена *EPAS1* [30]. Строки — это индивидуальные геномы денисовца (зеленый цвет), тибетцев (красный) и китайцев (желтый); столбцы отображают полиморфные позиции (всего 95). Серыми и черными клетками изображены предковые и производные аллели соответственно. Точками помечены позиции, общие для тибетцев и денисовца.

регуляторными) элементами и генами, экспрессирующимися в семенниках. Первое говорит о том, что против многих неандертальских вариантов действовал естественный отбор, а второе — о повышенной мужской стерильности потомков смешанных пар.

Пожалуй, интереснее всего то, что в одной из таких «пустынь» находится ген *FOXP2*, отвечающий за развитие речи [9]. При этом последовательности кодируемого белка у неандертальцев и кроманьонцев совпадают, однако у последних имеется замена в интроне 8, влияющая на сайт связывания фактора транскрипции POU3F2, консервативный в геномах позвоночных [39]. Это делает привлекательной гипотезу, согласно которой развитие речи у современного человека как-то связано с изменениями в уровне экспрессии *FOXP2*.

Среди генов, эволюция которых ускорилась в линии современного человека после расхождения с неандертальцами и денисовцами, оказалось много таких, которые регулируют пигментацию кожи (с низкими частотами производных аллелей в Африке и высокими — вне ее) [24]. Неожиданным образом среди таких генов оказались и связанные с гиперактивностью и агрессивным поведением, причем во всех популяциях современного человека.

Перспективы

Дальнейший прогресс в изучении древней ДНК, видимо, будет связан как с анализом все новых образцов, так и с совершенствованием экспериментальных и вычислительных методов. Постановка вопроса о популяционной генетике неандертальцев уже не кажется абсурдной. По мере получения полных геномов представителей разнообразных современных этнических групп, особенно из Южной и Юго-Восточной Азии, Океании, Австралии, можно будет детальнее исследовать неандертальское и денисовское наследие в геноме кромашонца. Вероятно, можно будет использовать частоты неандертальских и денисовских аллелей в различных популяциях, чтобы оценить количество событий гибридизации в истории разных этнических групп, определить направление эволюционного отбора и функциональное значение неандертальских и денисовских аллелей генов из различных систем, реконструировать геномы гибридизовавшихся неандертальцев и денисовцев. Увеличение разнообразия доступных африканских геномов улучшит разрешающую способность методов поиска фрагментов, интрогрессировавших из неизвестного источника.

Прогресс в этой области науки напоминает наступление танковыми клиньями: за публикаци-

ей каждого нового генома (прорыв) следует ряд работ, в которых уточняются детали, проводятся дополнительные сопоставления и т.п. (пехота). Примеры вопросов, которые пока остаются без ответа (хотя некоторые данные для разрешения этих загадок есть), приведены выше. На наших глазах возникает целая индустрия, анализирующая вклад неандертальцев в различные функциональные системы и группы генов или, наоборот, изучающая варианты этих генов в геномах неандертальцев и денисовцев (например, кроме уже обсужденных, публиковались результаты исследований рецепторов запахов, ретровирусов и т.д.). Это вполне естественно: генетику, изучающему конкретный ген или их группу, должно быть любопытно, что происходит с ним или с ними в предковых (совсем необязательно неандертальских) геномах.

Важно, что анализ древней ДНК не ограничивается неандертальцами. Сопоставление геномов возрастом несколько тысяч лет с современными проясняет историю заселения Европы и Америки. Огромный интерес представляют работы по истории одомашнивания животных, в частности собак, коров и лошадей; по анализу древних патогенов и бактерий из вечной мерзлоты; по популяционной истории млекопитающих, например медведей и мамонтов. ■

Автор благодарен фондам «Династия» и «Эволюция» и проекту «Энергия науки» сети информационных центров по атомной энергии за поддержку научно-популярных лекций, подготовка к которым помогла лучше осознать изложенный материал, а также студентам 4-го курса (набора 2011 г.) факультета биоинженерии и биоинформатики МГУ им.М.В.Ломоносова за активную работу в журнальном клубе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-24-00155).

Литература

1. Krings M., Stone A., Schmitz R.W. et al. Neandertal DNA sequences and the origin of modern humans // *Cell*. 1997. V.90. P.19–30. doi:10.1016/S0092-8674(00)80310-4
2. Bebar D.M., Oven M. van, Rosset S. et al. A «Copernican» reassessment of the human mitochondrial DNA tree from its root // *Am. J. Hum. Genet.* 2012. V.90. P.675–684. doi:10.1016/j.ajhg.2012.03.002
3. Noonan J.P., Coop G., Kudaravalli S. et al. Sequencing and analysis of Neandertal genomic DNA // *Science*. 2006. V.314. P.1113–1118. doi:10.1126/science.1131412
4. Green R.E., Krause J., Briggs A.W. et al. A draft sequence of the Neandertal genome // *Science*. 2010. V.328. P.710–722. doi:10.1126/science.1188021
5. Prüfer K., Racimo F., Patterson N. et al. The complete genome sequence of a Neandertal from the Altai Mountains // *Nature*. 2014. V.505. P.43–49. doi:10.1038/nature12886
6. Krause J., Fu Q., Good J.M. et al. The complete mitochondrial DNA genome of an unknown hominin from southern Siberia // *Nature*. 2010. V.464. P.894–897. doi:10.1038/nature08976
7. Reich D., Green R.E., Kircher M. et al. Genetic history of an archaic hominin group from Denisova Cave in Siberia // *Nature*. 2010. V.468. P.1053–1060. doi:10.1038/nature09710
8. Meyer M., Kircher M., Gansauge M.T. et al. A high-coverage genome sequence from an archaic Denisovan individual // *Science*. 2012. V.338. P.222–226. doi:10.1126/science.1224344
9. Vernot B., Akey J.M. Resurrecting surviving Neandertal lineages from modern human genomes // *Science*. 2014. V.343. P.1017–1021. doi:10.1126/science.1245938
10. Wall J.D., Yang M.A., Jay F. et al. Higher levels of Neandertal ancestry in East Asians than in Europeans // *Genetics*. 2013. V.194. P.199–209. doi:10.1534/genetics.112.148213
11. Sankararaman S., Mallick S., Dannemann M. et al. The genomic landscape of Neandertal ancestry in present-day humans // *Nature*. 2014. V.507. P.354–357. doi:10.1038/nature12961

12. Fu Q., Li H., Moorjani P. et al. Genome sequence of a 45,000-year-old modern human from western Siberia // *Nature*. 2014. V.514. P.445–449. doi:10.1038/nature13810
13. Seguin-Orlando A., Korneliusen T.S., Sikora M. et al. Genomic structure in Europeans dating back at least 36,200 years // *Science*. 2014. V.346. P.1113–1118. doi:10.1126/science.aaa0114
14. Sankararaman S., Patterson N., Li H. et al. The date of interbreeding between Neandertals and modern humans // *PLoS Genet*. 2012. V.8. e1002947. doi:10.1371/journal.pgen.1002947
15. Fu Q., Hajdinjak M., Moldovan O.T. et al. An early modern human from Romania with a recent Neanderthal ancestor // *Nature*. 2015. V.524. P.216–219. doi:10.1038/nature14558
16. Gibbons A. Ancient DNA pinpoints Paleolithic liaison in Europe // *Science*. 2015. V.348. P.847. doi:10.1126/science.348.6237.847
17. Raghavan M., Steinrücken M., Harris K. et al. Genomic evidence for the Pleistocene and recent population history of Native Americans // *Science*. 2015. V.349. aab3884. doi:10.1126/science.aab3884
18. Qin P., Stoneking M. Denisovan ancestry in East Eurasian and Native American populations // *Mol. Biol. Evol.* 2015. V.32. P.2665–2674. doi:10.1093/molbev/msv141
19. Hammer M.F., Woerner A.E., Mendez F.L. et al. Genetic evidence for archaic admixture in Africa // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2011. V.108. P.15123–15128. doi:10.1073/pnas.1109300108
20. Meyer M., Fu Q., Aximu-Petri A. et al. A mitochondrial genome sequence of a hominin from Sima de los Huesos // *Nature*. 2014. V.505. P.403–406. doi:10.1038/nature12788
21. Dalén L., Orlando L., Shapiro B. et al. Partial genetic turnover in neandertals: continuity in the East and population replacement in the West // *Mol. Biol. Evol.* 2012. V.29. P.1893–1897. doi:10.1093/molbev/mss074
22. Ouchbinnikov I.V., Kholina O.I. Genome digging: insight into the mitochondrial genome of *Homo* // *PLoS One*. 2010. V.5. e14278. doi:10.1371/journal.pone.0014278
23. Lalueza-Fox C., Römpler H., Caramelli D. et al. A melanocortin 1 receptor allele suggests varying pigmentation among Neanderthals // *Science*. 2007. V.318. P.1453–1455. doi:10.1126/science.1147417
24. Lalueza-Fox C., Gigli E., de la Rasilla M. et al. Bitter taste perception in Neanderthals through the analysis of the *TAS2R38* gene // *Biol. Lett.* 2009. V.5. P.809–811. doi:10.1098/rsbl.2009.0532
25. Perry G.H., Orlando L. Ancient DNA and human evolution // *J. Hum. Evol.* 2015. V.79. P.1–3. doi:10.1016/j.jhevol.2014.12.002
26. Axelsson E., Ratnakumar A., Arendt M.L. et al. The genomic signature of dog domestication reveals adaptation to a starch-rich diet // *Nature*. 2013. V.495. P.360–364. doi:10.1038/nature11837
27. Sazzini M., Schiavo G., De Fanti S. et al. Searching for signatures of cold adaptations in modern and archaic humans: hints from the brown adipose tissue genes // *Heredity*. 2014. V.113. P.259–267. doi:10.1038/hdy.2014.24
28. Lalueza-Fox C., Rosas A., Estalrich A. et al. Genetic evidence for patrilocal mating behavior among Neandertal groups // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2011. V.108. P.250–253. doi:10.1073/pnas.1011553108
29. Castellano S., Parra G., Sánchez-Quinto F.A. et al. Patterns of coding variation in the complete exomes of three Neandertals // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2014. V.111. P.6666–6671. doi:10.1073/pnas.1405138111
30. Huerta-Sánchez E., Jin X., Asan et al. Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA // *Nature*. 2014. V.512. P.194–197. doi:10.1038/nature13408
31. Ding Q., Hu Y., Xu S. et al. Neanderthal origin of the haplotypes carrying the functional variant Val92Met in the *MC1R* in modern humans // *Mol. Biol. Evol.* 2014. V.31. P.1994–2003. doi:10.1093/molbev/msu180
32. Ding Q., Hu Y., Xu S. et al. Neanderthal introgression at chromosome 3p21.31 was under positive natural selection in East Asians // *Mol. Biol. Evol.* 2014. V.31. P.683–695. doi:10.1093/molbev/mst260
33. Mendez F.L., Watkins J.C., Hammer M.F. A haplotype at *STAT2* introgressed from Neandertals and serves as a candidate of positive selection in Papua New Guinea // *Am. J. Hum. Genet.* 2012. V.91. P.265–274. doi:10.1016/j.ajhg.2012.06.015
34. Mendez F.L., Watkins J.C., Hammer M.F. Global genetic variation at *OAS1* provides evidence of archaic admixture in Melanesian populations // *Mol. Biol. Evol.* 2012. V.29. P.1513–1520. doi:10.1093/molbev/msr301
35. Mendez F.L., Watkins J.C., Hammer M.F. Neandertal origin of genetic variation at the cluster of *OAS* immunity genes // *Mol. Biol. Evol.* 2013. V.30. P.798–801. doi:10.1093/molbev/mst004
36. Abi-Rached L., Jobin M.J., Kulkarni S. et al. The shaping of modern human immune systems by multiregional admixture with archaic humans // *Science*. 2011. V.334. P.89–94. doi:10.1126/science.1209202
37. Kbrameeva E.E., Bozek K., He L. et al. Neanderthal ancestry drives evolution of lipid catabolism in contemporary Europeans // *Nat. Commun.* 2014. V.5. P.3584. doi:10.1038/ncomms4584
38. SIGMA Type 2 Diabetes Consortium, Williams A.L., Jacobs S.B. et al. Sequence variants in *SLC16A11* are a common risk factor for type 2 diabetes in Mexico // *Nature*. 2014. V.506. P.97–101. doi:10.1038/nature12828
39. Maricic T., Günther V., Georgiev O. et al. A recent evolutionary change affects a regulatory element in the human *FOXP2* gene // *Mol. Biol. Evol.* 2013. V.30. P.844–852. doi:10.1093/molbev/mss271

Краниология Франца Галля

С.В.Васильев, Е.В.Веселовская, О.М.Григорьева, А.П.Пестряков

Данная статья — третья в цикле публикаций «Природы»*, посвященном историческим деятелям прошлого, в отношении которых антропологическая наука располагает особым источником информации — черепом. Описание внешности и биологических особенностей в целом вносит важную информацию в документальный портрет, в наше представление о личности.

Для многих имя знаменитого немецкого врача и анатома Ф.Галля ассоциируется с френологией (от греч. φρήν — душа, нрав, характер, ум и λόγος — слово, учение) — устаревшим антропологическим учением (или даже псевдонаукой в современном понимании), напрямую связывающим психические свойства личности с особенностями строения черепной коробки**. Кстати, это название появилось позже, сам Галль называл свое учение краниологией, впервые введя это понятие в научный оборот.

Однако вклад Галля в науку вовсе не исчерпывается френологией. Будучи человеком весьма профессионально образованным, он во многом опережал свое время. Тогда еще полагали, что высшие движения души берут начало в сердце, а дурное настроение вырабатывается где-то в районе селезенки. Именно Галль научно обосновал постулат, что центр всей психической деятельности человека — головной мозг.

Свой череп ученый завещал науке. На основе его подробного изучения в работе представлена антропологическая характеристика внешности знаменитого анатома, выполнена графическая реконструкция его прижизненного внешнего облика.

Историческая справка

Франц Йозеф Галль (Franz Joseph Gall) родился 9 марта 1758 г. в немецком городке Тифенбруне.

* Васильев С.В., Веселовская Е.В., Пестряков А.П. Антропологическое исследование черепа последнего инки (2015. №1. С.42—50); Веселовская Е.В., Хартанович М.В. История создания портретной реконструкции С.П.Крашенинникова (2015. №6. С.46—52).

** Мещеряков Б.Г., Зинченко В.Л. Большой психологический словарь. СПб., 2003. С.531.

© Васильев С.В., Веселовская Е.В., Григорьева О.М., Пестряков А.П., 2016

После окончания гимназии он изучал медицину в Страсбурге. Затем, в 1781 г., он переехал в Вену, где в 1785 г. окончил медицинский факультет Венского университета. Получив врачебный диплом, Франц Йозеф вскоре приобрел широкую известность как практикующий врач, а еще больше — как блестящий лектор, заинтересовавший широкие круги венской интеллигенции. Основная заслуга Галля состоит в том, что он привлек внимание научной общественности к мозгу как органу, регулирующему все психические функции. Своими исследованиями он разрушил бытовавшие в то время ошибочные представления и подтвердил многие старые правильные взгляды, тем самым заложив теоретическую основу для дальнейшего изучения мозга и его психических функций [1].

Идеи Галля на рубеже XVIII и XIX вв. казались новаторскими. Его по праву можно считать ведущим специалистом своего времени по неврологии. Будучи практикующим врачом, он обратил внимание на то, что характер психических расстройств зависит от локализации места повреждения мозга. Благодаря скрупулезным анатомическим изысканиям и обширной врачебной практике ученый установил, что в мозгу находятся центры, которые отвечают за такие функции организма, как речь, зрение, ориентация в пространстве, память и т.д. Галль перенес это представление и на интеллектуальные, и на нравственные черты личности: он считал, что в мозгу должны существовать центры, отвечающие за честность, преданность, способность любить и верить в Бога. Он был убежден, что форма черепа отражает, насколько развит тот или иной участок мозга, а значит, что по форме головы человека можно судить о его достоинствах и тайных пороках.

Галль с большим увлечением собирал коллекции черепов людей и животных, изучал разнообразие размеров и форм самих черепов и составляющих их отдельных костей. Свое учение он назвал краниологией, т.е. наукой о черепах (от греч. κρανιον — череп, черепная коробка). Таким образом, Галля можно считать одним из основателей краниологии, обширного раздела современной антропологии, изучающего вариации размеров и формы человеческого черепа.



Сергей Владимирович Васильев, доктор исторических наук, заведующий Центром физической антропологии Института этнологии и антропологии РАН. Круг интересов в антропологии — от вопросов морфологии и таксономии в эволюции рода Ното и проблем этологии приматов до задач формирования ряда народов мира. Член Государственной комиссии по изучению останков последнего императора России Николая II и членов его семьи.



Елизавета Валентиновна Веселовская, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник и руководитель лаборатории антропологической реконструкции того же института. Область научных интересов — антропологическая реконструкция, идентификация личности по костным останкам, морфология человека, эволюционная антропология.



Ольга Михайловна Григорьева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник того же института. Изучает проблемы эволюции лицевого и мозгового отделов черепа человека, краниологической дифференциации современного населения Земли. Занималась исследованием этологии приматов. Специалист в области антропологической реконструкции лица по черепу.



Александр Петрович Пестряков, кандидат исторических наук, старший научный сотрудник того же института. Специалист по этнической антропологии народов Средней Азии и Кавказа. Автор краниологической классификации современного населения Земли, отличной от расовых схем разнообразия современного человечества.

Ключевые слова: череп, краниология, реконструкция.
Key words: skull, craniology, reconstruction.

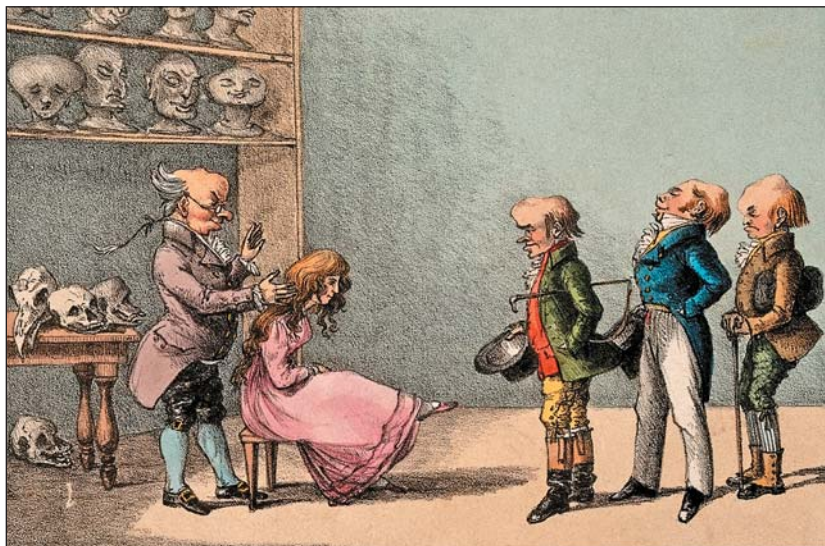
На основе верных по сути наблюдений Галль делал далекоидущие и труднодоказуемые выводы, однако это его не смущало. Он и его ученик И.Шпруцгайм искренне верили в собственную правоту. На основе предложенной концепции они пытались привязать духовные особенности индивидуума к определенным отделам мозга, что, по их мнению, должно было отражаться на строении поверхности черепа. Согласно таким взглядам, развитие того или иного психического свойства личности связано с развитием конкретного участка мозга, что, в свою очередь, должно вызывать изменение со-

ответствующей части поверхности черепной коробки. Эти изменения могли выражаться в наличии выпуклостей (или «шишек») и других особенностей рельефа поверхности головы, по которым можно было бы судить о личностных характеристиках и психических свойствах индивидуума [1].

В дальнейшем это учение получило название «френология», хотя сам Галль подобный термин не употреблял и даже возражал против него. Позже несостоятельность концепции была доказана и опытами, и наблюдениями, но за ученым навсегда осталась честь открытия некоторых новых фактов, касающихся анатомии и физиологии мозга. В конце XVIII в. френология начала завоевывать широкую популярность. Так, например, знаменитый немецкий поэт и естествоиспытатель И.В.Гёте высоко оценивал учение Галля с точки зрения практического применения и занимательности. Ученый стал даже героем карикатур. Свое продолжение френология получила в работах известного итальянского судебного медика-криминалиста Ч.Ломброзо, чье учение о существовании особого типа внешности преступников также не поддерживается современной наукой.

Галль считал, что психические черты человека зависят именно от организации мозга, а независимость духа от тела — это выдумка метафизиков. Такие взгляды угрожали церковным догмам того времени. Поэтому под давлением католического духовенства и при содействии императора Наполеона I Бонапарта правительство Австро-Венгрии в 1802 г. запретило ему читать публичные лекции и предложило покинуть Вену.

В том, что у Галля и его ученики были не только сторонники, но и серьезные противники, частично виноват был и он сам. Так, проводя исследования в прусских тюрьмах, он безапелляционно судил об уровне развития врожденных преступных на-



Карикатура «Френолог». Подпись под рисунком: «Франц Йозеф Галль изучает голову молодой миловидной девушки, пока три джентльмена ждут своей очереди». Раскрашенная литография работы Е.Н., 1825.

Здесь и далее иллюстрации из Wellcome Library



Карикатура на Галля. Название рисунка: «Франц Йозеф Галль за измерением головы лысой элегантно одетой пожилой леди, чей любимый пудель в это время примеряет ее парик на стуле». Раскрашенная акватинта Ф.К.Ханта (F.C.Hunt) по рисунку Э.Ф.Ламберта (E.F.Lambert), 1823 (?).

клонностей конкретных заключенных, в том числе и малолетних преступников. Берлинский врач И.Вальтер писал о Галле: «Фанатик советует навечно заточить ребенка, который украл лишь раз, но якобы имеет воображаемый орган воровства!»*

* Новиков К. Академия мертвых наук // Коммерсантъ Деньги. 2007. №4 (610). С.73.

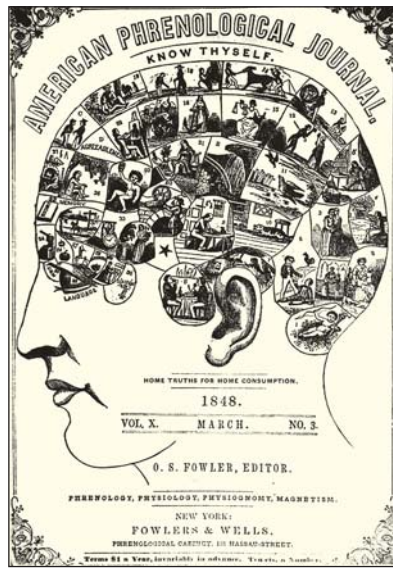
После долгих странствий по европейским странам Галль в 1807 г. перебрался в Париж, где слава его достигает апогея. Но здесь он вновь впал в немилость Бонапарта, так как позволял себе высказывания о малой вместимости черепной коробки императора и его неспособности к философскому мышлению. В результате Наполеон запретил ему выступать с публичными лекциями во всех учебных заведениях Парижа.

В 1808 г. Галль представил в Парижскую академию наук свой большой труд «Исследование нервной системы вообще и мозга в частности» (в русском варианте с этой книгой можно познакомиться по переводу И.М.Кондакова [2]). Многие ученые дали на него положительные рецензии. Однако Наполеон, имея привычку влезать во все сферы, даже те, где он был дилетантом, скептически отозвался об авторе. По слухам, он удивлялся, зачем изучать анатомию у немца, разве нет своих (т.е. французских) ученых? Поэтому, в силу национально-политических причин и личных обид это фундаментальное исследование не увидело свет. Даже само членство Галля во Французской академии наук стало невозможным.

Тем не менее, целый ряд ведущих ученых Франции, в частности лейб-медик императора Ж.-Н.Корвизар и знаменитый натуралист Ж.Сент-Иллер дали высокую оценку научной деятельности Галля. Знаменитый Ж.Кювье настойчиво просил его не медлить с публикацией своих открытий, представляющих огромную научную ценность. Благодаря этому с 1810 по 1820 г. вышло в свет сочинение Галля «Анатомия и физиология нервной системы» в четырех томах, с большим тщательством выполненным атласом в 100 таблиц. Составлена подробная анатомическая карта мозга, где к каждому его участку была привязана конкретная психическая черта личности. В книге Галль обосновал важность лобных долей мозга для интеллектуального развития, а также отстаивал идею зависимости интеллекта от абсолютных размеров мозга.

Для развития идей френологии доктор Галль не ограничивался изучением только поверхности черепа. Извилины больших полушарий мозга — вот где, как он считал, локализованы центры умственных и нравственных свойств человека. Поскольку растущий мозг давит на внутреннюю поверхность черепной коробки и таким образом отпечатывается на ней, очевидно, что форма черепа отражает главные особенности своего содержимого. Исходя из подобных представлений, Галль разработал теорию соответствия между топографией мозга и черепа, с одной стороны, и интеллектуальными и эмоциональными свойствами его владельца, с другой [3].

Для анатомических исследований мозга Галль придумал собственный метод его рассечения и, по словам крупного немецкого анатома и врача И.Х.Рейля, который был его слушателем, достиг весьма солидных познаний в этой области. Позже Рейль признавался, что, присутствуя на анатомической демонстрации Галля, он в течение часа узнал о строении мозга гораздо больше, чем за всю предыдущую жизнь. В работе «Анатомия и физиология нервной системы» Галль дал описание результатов своих изысканий по анатомии головного мозга, чем существенно обогатил знания этого раздела медицинской науки.



Обложка «American Phrenological Journal» (1848. V.X. №3) с френологической картой соответствия отделов мозга и личностных качеств.

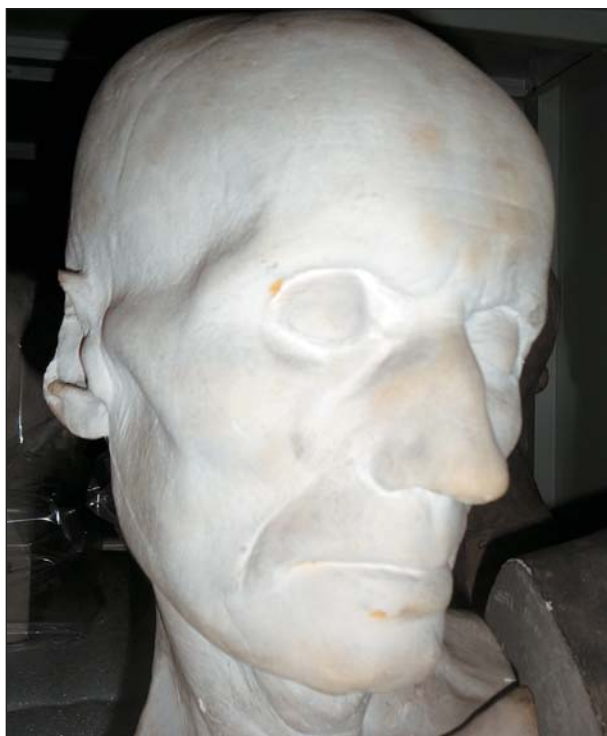
3 апреля 1828 г. у Галля произошло кровоизлияние в мозг, а 22 августа того же года он умер в г.Монруже, расположенном юго-западной Парижа. Отказавшись от духовника, он распорядился, чтобы его тело не выставляли в церкви. Галль был похоронен на известном кладбище Пер-Лашез без головы, которую завещал для пополнения своей коллекции.

Галль стал предтечей теории мозговых локализаций, а следовательно, и современной неврологии. Основные его заслуги перед наукой следующие. Он сформулировал важный принцип необходимого соотношения между органом и его функциями, из чего следовало, что всякое изменение органа неизбежно сказывается на перемене его функций. Определяя мозг как орган психической деятельности, Галль, естественно,

способствовал распространению материализма в науке. Эта заслуга получила свое выражение в надписи на медали, выпущенной в Берлине в его честь: «Он нашел инструмент души». Галль положил начало антропометрии (т.е. измерению параметров человеческого тела: роста, веса, длины конечностей, длины и ширины черепной коробки и т.д.) и антропоскопии (т.е. описанию особенностей человеческого тела и его отдельных частей: формы головы, цвета кожи, цвета



Портреты Галля — гравюры (слева направо): Ж.Беллиарда (Zéphirin Félix Jean Marius Belliard), В.В.Маннхайма (W.Wurmell Mannheim) и Ф.Марадан (François Maradan).



Посмертная маска Галля. Музей человека в Париже.
Фото С.В.Васильева

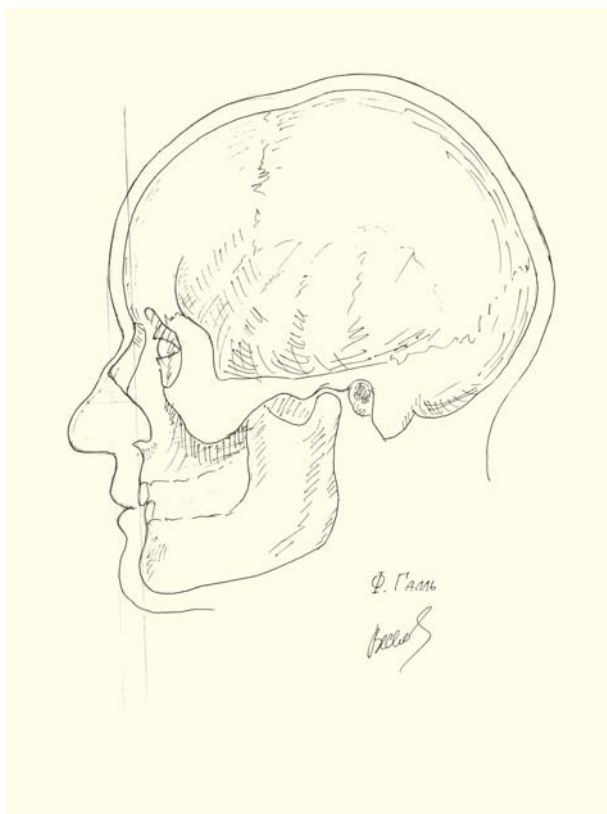
глаз, типа телосложения и т.д.) — научным методом, сыгравшим важную роль в становлении современной антропологии, в том числе и палеоантропологии, а также некоторых разделов медицины. Его научная деятельность дала толчок целому ряду дальнейших анатомических изысканий. Например, его френологическая карта с полным правом может считаться предтечей цитоархитектоники мозга.

Ошибка критиков Галля состояла в том, что они не дифференцировали работы ученого по френологии от исследований анатома и нейрофизиолога, специалиста в области анатомии центральной нервной системы. Вспоминая сегодня Франца Галля, мы отдаем должное выдающемуся врачу и смелому исследователю.

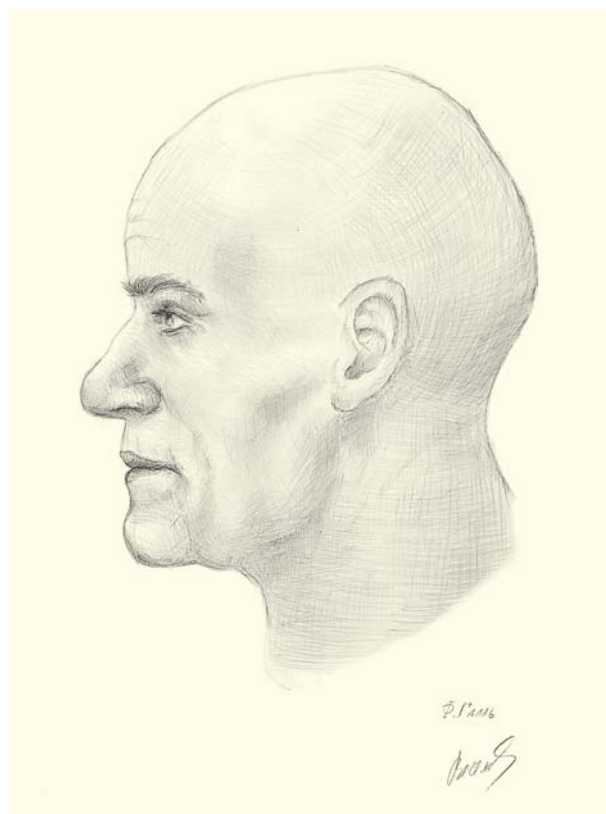
Методика и результаты

Для антропологической характеристики черепа Франца Галля применялись классические методы современной антропологии: краниметрия (программа измерения черепа) и краниоскопия (программа описания черепа).

Для восстановления внешности Франца Галля по его черепу использовали последние достижения метода антропологической реконструкции,



Контурная реконструкция по черепу Галля.
Автор Е.В.Веселовская.



Графическая реконструкция, профиль.
Автор Е.В.Веселовская.

основы которого заложил М.М.Герасимов. Ключевые принципы методики и современные ее уточнения подробно изложены в предыдущих публикациях настоящего цикла и в ряде специальных работ по антропологической реконструкции [4–6].

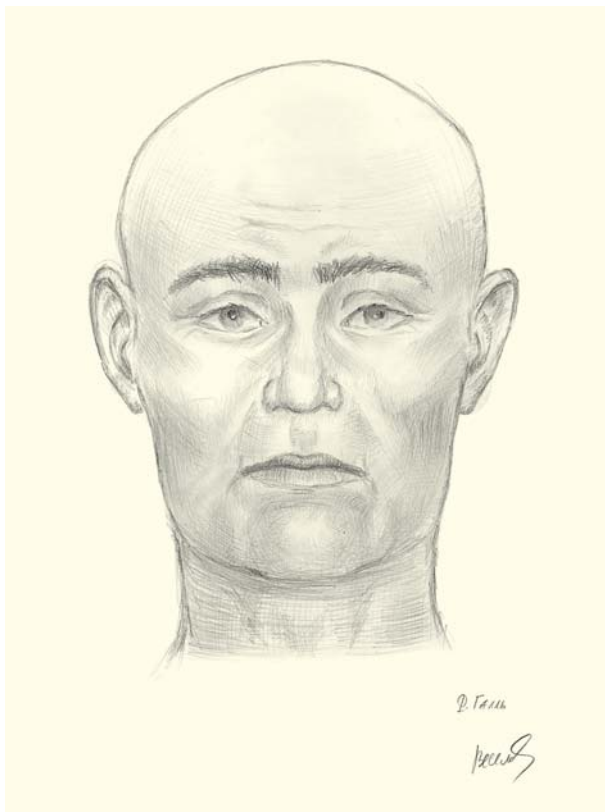
Описание мозговой части черепа. Форма черепной коробки при взгляде сверху пятиугольная — наибольшая ширина черепа сдвинута назад и попадает на заднюю треть. Довольно сильно развиты лобные и особенно теменные бугры. Именно их развитие и определяет пятиугольную форму мозговой коробки. Череп может быть описан как укороченный и относительно широкий — брахикранный, по высоте небольшой. Лоб прямой и визуальнo довольно широкий. Абсолютные размеры наименьшей и наибольшей ширины лба входят в категорию очень больших. Хорошо развит надбровный рельеф. Теменные бугры расположены высоко. Затылок широкий со значительно выраженным рельефом, заметно развит наружный затылочный выступ.

Описание лицевого скелета. Лицевая часть черепа широкая и относительно невысокая. Углы горизонтальной профилировки относятся к категории средних, т.е. лицо по европеоидным меркам профилировано не сильно. Орбиты невысокие и относительно неширокие. Верхний край

орбиты притупленный. Надглазничные каналы не замкнуты (в виде вырезки). Форма верхнего края глазниц округлая. Нижний край глазниц имеет несколько припущенный латеральный край.

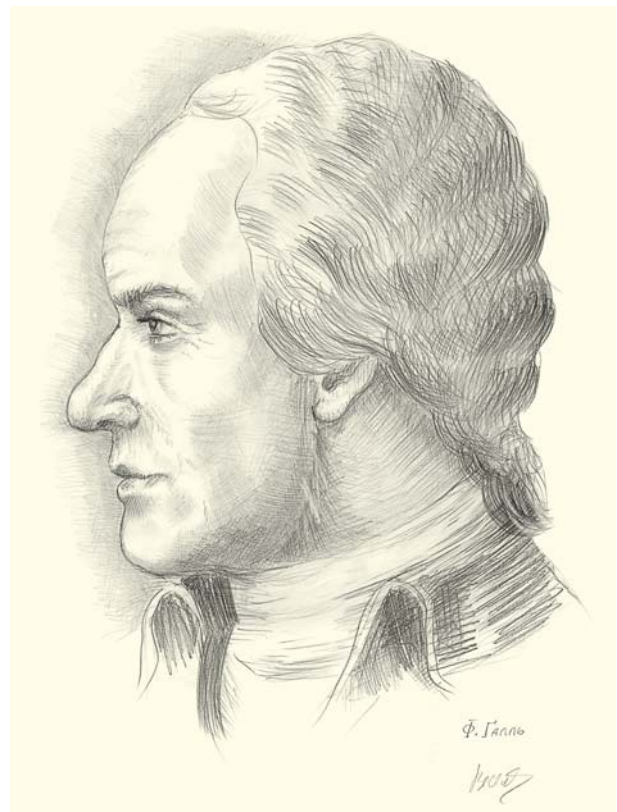
В абсолютных размерах нос высокий и широкий. Угол выступления носа большой. Переносье высокое.

Реконструкция внешнего облика. Некоторое представление о внешности знаменитого анатома можно составить, познакомившись с его прижизненными портретами. Также есть посмертная гипсовая маска лица. Одного взгляда на картины достаточно, чтобы заметить, как невнимательны художники к отдельным элементам лица. Судя по одному портрету, у Галля был очень крупный нос с бульбообразным кончиком и вздутыми высокими крыльями. На другом портрете художник наградил его неестественно огромным лбом, видимо, отдавая дань уважения к научным заслугам. В данном случае наиболее ценную информацию о реальной внешности Галля дает посмертная маска. Однако очень быстро после смерти происходит падение тургора мягких тканей, которые как бы оползают вниз под действием силы тяжести. Таким образом, при лежачем положении трупа ткани передней части лица перераспределяются к периферии, в область скуловых дуг и ветви нижней челюсти. К тому же на посмертной маске лицо часто выглядит бо-



Графическая реконструкция, анфас.

Автор Е.В.Веселовская.



Портретная реконструкция, профиль.

Автор Е.А.Просикова.

лее исхудавшим, в отличие от реального образа, который могли помнить современники, особенно если смерть наступает в результате изнуряющего заболевания. Известно, что после инсульта ученый проболел около пяти месяцев и, конечно, сильно исхудал. Действительно, на посмертном слепке мы видим крайне изможденного человека с обострившимся носом и обтянутыми кожей скулами.

Использование разработанной в лаборатории антропологической реконструкции Программы краниофациального соответствия позволяет дополнить графический портрет детальным описанием прижизненного облика в терминах «словесного портрета». Итак, внешность Франца Галля можно описать следующим образом. Голова крупных размеров, в лобно-затылочном направлении короткая, свод высокий. Форма головы между округлой и куполообразной, теменная часть несколько выгнута вверх. Вертикальная профилировка носовая, т.е. при взгляде на лицо в профиль бросается в глаза сильное выступание носа по отношению к остальным отделам.

Горизонтальная профилировка значительная. Лицо крупное, по ширине среднее. Лоб высокий и широкий, визуальное впечатление огромного лба создается наличием залысин. В профиль лоб имеет несколько выпуклую форму, направлен вертикально. Надбровный рельеф выражен слабо. В связи с этим переносье неглубокое. Небольшой размер глазниц и их конфигурация предполагают не крупные размеры глаз в сочетании с достаточной глубокой посадкой глазных яблок. Складка верхнего века выражена в средней степени, примерно одинаково по всей своей длине. Форма бровей ближе к прямой с незначительным изгибом в дистальной части. Разрез глазных щелей горизонтальный.

Скулы не выдаются в стороны, средних размеров. Нос невысокий, сильно выступающий. В отношении профиля спинки можно заключить сле-

дующее. Конфигурация носовых костей и абрис грушевидного отверстия выявляют наличие небольшой горбинки в верхней трети общей длины носа. Абрис кончика отчетливо обособлен. Поскольку прижизненный контур носа строится в соответствии с контуром грушевидного отверстия, то на профильном обводе черепа чуть ниже носочелюстного шва можно заметить легкую выпуклость, которая при зеркальном отображении дает обособление кончика. Интересно, что некоторые портреты фиксируют такую необычную форму спинки носа. Эти же особенности можно проследить на фотографии посмертной маски при ракурсе в три четверти. Увы, нам не удалось достать ее профильное изображение, на котором это можно было бы увидеть более отчетливо. Ширина носа в крыльях и на протяжении всей спинки средняя. Положение подносового шипа на черепе свидетельствует о горизонтальном направлении основания носа. Однако с возрастом нос имеет тенденцию немного опускаться под действием гравитации.

Галль умер в возрасте 70 лет, к этому времени он потерял значительную часть зубов. Большинство из оставшихся зубов было утрачено посмертно. Это несколько затрудняет восстановление области рта. Судя по сохранившимся альвеолярным отросткам челюстей, прикус мог быть ножницеобразным или даже крышевидным, при котором фиксируется выступание вперед верхней губы относительно нижней. Подбородок широкий и невысокий, выступает вперед значительно, форма его между квадратной и округлой.

Произведенные нами исследования позволили создать научную реконструкцию облика великого анатома и художественный портрет, выполненный на основе произведенной реконструкции. На изображениях Галль сознательно показан в несколько более молодом возрасте, чем на момент смерти. ■

Литература

1. Шойфет М.С. Сто великих врачей. М., 2005.
2. Галль Ф. Исследование о нервной системе. СПб., 1816.
3. Каннабих Ю. История пути френологических идей и личная судьба их творца. К столетию смерти Галля. Клиническая медицина. 1929. Т.7. №2.
4. Васильев С.В. Три сюжета об идентификации исторических личностей методами физической антропологии // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Геоархеология. Этнология. Антропология. 2012. №1. С.246—265.
5. Веселовская Е.В. Краниофациальные пропорции в антропологической реконструкции // Этнографическое обозрение. 2015. №2. С.83—98.
6. Веселовская Е.В., Балужева Т.С. Новые разработки в антропологической реконструкции // Вестник антропологии. Вып.22. М., 2012. С.22—42.

Заповедные маршруты Кабардино–Балкарии

М.А.Газаев,

доктор химических наук

Л.С.Мурзамуратова, Ю.Г.Статовая

Кабардино-Балкарский государственный высокогорный заповедник

На территории Кабардино-Балкарской Республики действуют 35 особо охраняемых природных территорий, относящихся к разным категориям. Они занимают 92% всей площади республики, и это неудивительно, ведь ее значительная часть лежит в высокогорьях Северного Кавказа. Больше всего здесь государственных природных заповедников, немало и памятников природы, созданных для охраны отдельных точечных объектов.

Самые крупные и всемирно известные охраняемые территории республики — национальный

парк «Приэльбрусье» и Кабардино-Балкарский государственный высокогорный заповедник. О его научной работе, охране природы и уникальных животных, обитающих на его территории, уже известно читателям «Природы»*. Здесь же мы хотим рассказать о том, какие природные памятники посетители заповедника смогут увидеть своими глазами, сколькими маршрутами им удастся пройти, почему Северный Кавказ так притягивает любите-

* См.: Газаев М.А., Атабиева Ф.А., Тогузаева Л.А. Заповедное высокогорье // Природа. 2013. №4. С.57–61; Газаев М.А., Тогузаева Л.А., Атабиева Ф.А. Восточнокавказский тур — краса и гордость заповедника // Природа. 2013. №8. С.56–62.

© Газаев М.А., Мурзамуратова Л.С., Статовая Ю.Г., 2016



Экологическая тропа к леднику Безенги.

Фото М.М.Газаева



Схема экологической тропы.

лей спорта и что мы делаем для того, чтобы как можно больше наших гостей смогли насладиться уникальной природой заповедного высокогорья.

Напомним, что Кабардино-Балкарский заповедник расположен в высокогорьях Главного Кавказского и Бокового хребтов, в верховьях рек Черек-Балкарский, Черек-Безенгийский, Хазнидон, Чегем и др. Более трети площади заповедника занимают ледники.

За последние годы здесь изменилось многое. Большим событием стало открытие в 2003 г. отдела экологического просвещения и экскурсионной деятельности. Одно из значимых направлений его работы — организация и проведение экологических

экскурсий. Сотрудники отдела разрабатывают и постоянно модернизируют их программы, занимаются установкой информационных стендов, издаются буклеты и памятки с описанием маршрутов и правилами поведения на территории заповедника.

Кроме экскурсий важной задачей отдела считается создание экологических троп. Первая в республике и самая высокогорная в России экотропа была торжественно открыта в заповеднике 2 июля 2014 г. Гостям предлагается пройти по Безенгийскому ущелью на высоте 2200 м над ур.м. Тропа начинается от научного стационара заповедника и тянется к подножию ледника Уллу-Чиран (Безенги) — крупнейшего во всей Европе (его длина 17.6 км, площадь 36.2 км²), ледяного короля Кавказа, как называют его местные жители. Здесь из огромного грота, из-под многометровой толщи льда, с шумом вырывается река: это исток Черек-Безенгийского. На маршруте протяженностью 650 м обустроены две остановки, а заканчивается он на площадке, где установлены беседка и смотровая вышка. Туристы могут познакомиться с ландшафтным разнообразием, высотной поясностью, флорой и фауной высокогорья, а также увидеть знаменитый ледник. Вдоль всего маршрута расположены информационные стенды, описывающие природные и биологические особенности местности.

Пока новую экологическую тропу посещают около 250 человек в год. В это число входят альпинисты, местные жители, а главное — школьники. Им сотрудники отдела экологического просвещения стараются привить любовь к родному краю и бережное отношение к природе.

В 2015 г. при участии волонтерского отряда «Поиск» во главе с Л.Н.Скуратовой в заповеднике была

открыта еще одна экологическая тропа под названием «Сюеме-Су» и благоустроена тропа на ледник Мижирги. Подобные пешеходные экологические тропы планируется открыть в Чегемском ущелье в районе Верхней Балкарии, а также в ущелье Башиль.

Отдел экологического просвещения старается совершенствовать формы и методы работы с посетителями. В пос.Кашхатау открыты экспозиционный зал и так называемый визит-центр для гостей заповедника. Таким центрам отводится важная роль в воспитании экологической культуры и вовлечении местного населения в практическую деятельность по охране природы. В визит-центре функционируют выставки (в том числе передвижные), демонстрирующие красоту и богатство ландшафтов высоко-



Ледник Безенги.

Фото М.М.Газаева

горя. В скором времени в административном здании откроется музей природы, где часть экспозиции будет представлена в интерактивном виде. В 2014 г. разработан и запущен сайт заповедника*, на котором ведется регулярное обновление новостной ленты. Под руководством начальника отдела экологического просвещения М.М.Газаева разрабатываются и внедряются в деятельность заповедника электронные карты, которые будут использоваться в работе всех его отделов.

В последние годы создано несколько документальных фильмов, демонстрирующих красоту, богатство и разнообразие заповедной природы. Их авторы — сотрудники заповедника и съемочные группы различных телекомпаний. Фильмы активно используются во время организации выставок и проведения тематических занятий с детьми. В 2014 г. в заповеднике открылся экологический кинотеатр.

Заповедник традиционно принимает участие в таких всероссийских акциях, как «Марш парков», «День птиц» и «Белая тропа». Подобные мероприятия — эффективное средство привлечения внимания людей к проблемам заповедного дела. Экологические акции и праздники обычно проводятся совместно с различными образовательными учреждениями, в них участвуют представители органов власти и средства массовой информации. Сотрудники отдела экологического просвещения проводят семинары для преподавателей учебных заведений, организуют круглые столы по вопросам охраны природы и деятельности заповедника, совместно разрабатывают и реализуют эколого-просветительские и природоохранные проекты и мероприятия.

Кроме экологических в заповеднике издавна существуют и другие маршруты, о которых нельзя не упомянуть. Близ языка ледника Уллу-Чиран, на высоте 2500 м над ур.м., расположен альпинистский учебно-спортивный лагерь «Безенги», созданный еще в 1950-х годах. Альплагерь находится на пересечении двух ущелий, ведущих к Северному массиву и знаменитой Безенгийской стене — высочайшему участку Главного Кавказского хребта. «Безенги» в переводе с балкарского означает «место, откуда сошел ледник». Это удивительный по красоте и грандиозности регион Кавказа. Отсюда начинаются наиболее сложные, знаменитые маршруты горных восхождений, ведь в районе «Безенги» возвышаются все пятитысячники Северного Кавказа, кроме Эльбруса и Казбека. Сюда

приезжают самые опытные альпинисты из России и других стран. За сложность маршрутов и суровость горных вершин альпинисты называют этот регион «Малые Гималаи».

Не менее, чем Кабардино-Балкарский заповедник, знаменита еще одна охраняемая территория в горах Северного Кавказа — национальный парк «Приэльбрусье»**. Он расположен в наиболее высокогорной части Большого Кавказа, в верховьях рек Малка и Баксан, здесь находится массив Эльбрус высотой 5642 м. На юго-западе национальный парк примыкает к государственной границе с Грузией.

По горам и перевалам Приэльбрусья проложено немало популярных туристических и альпинистских маршрутов. Здесь много турбаз, лагерей альпинистов, гостевых хижин и приютов. Приэльбрусье славится живописными ущельями, и самое крупное из них — Баксанское. В Кабардино-Балкарии это единственное ущелье, где асфальтированная дорога поднимается до высоты 2340 м над ур.м., подходя буквально вплотную к Эльбрусу и Главному Кавказскому хребту. Здесь, в 3 км от пос. Терскол, находится «Азау» — самая нижняя из четырех станций канатной дороги, ведущей вверх по склонам Эльбруса. Надо сказать, что несколько лет назад старую маятниковую дорогу, построенную еще в 1969 г. и переставшую справляться с большим наплывом посетителей, продублировали линии современных гондольных подъемников.

В национальном парке проложено более десятка тематических маршрутов протяженностью от 4 до 15 км. Например, в окрестностях станций «Азау» и «Старый Кругозор» (3000 м над ур.м.) ту-

** <http://elbruspark.com/>



Альплагерь «Безенги».

* <http://zapovednikkbr.ru/>

Фото Р.Ю.Гетокова



Новый подъемник гондольного типа на склонах Эльбруса. Подъем к станции «Старый Кругозор».

Здесь и далее фото Т.А.-К.Моллаева

ристы могут увидеть исток р.Баксан в узком ущелье, ледники Большой и Малый Азау, питающие реку, ущелье Терскол с одноименным ледником, знаменитые «бараньи лбы» — сглаженные и отполированные движением ледника скалы, альпийские луга с редким по красоте разнотравьем.

Со станции «Гарабаши» (3850 м) можно отправиться выше, на «Приют одиннадцати» (4200 м), узнать историю этого знаменитого места — гостиницы для альпинистов, основанной более 100 лет назад и долгие годы считавшейся самой высокогорной в Европе. От «Приюта одиннадцати» открывается, пожалуй, самая величественная панорама Главного Кавказского хребта.

Проложены маршруты в ущелье Адыл-Су, где туристы могут увидеть ледники Джанкуат и Баш-

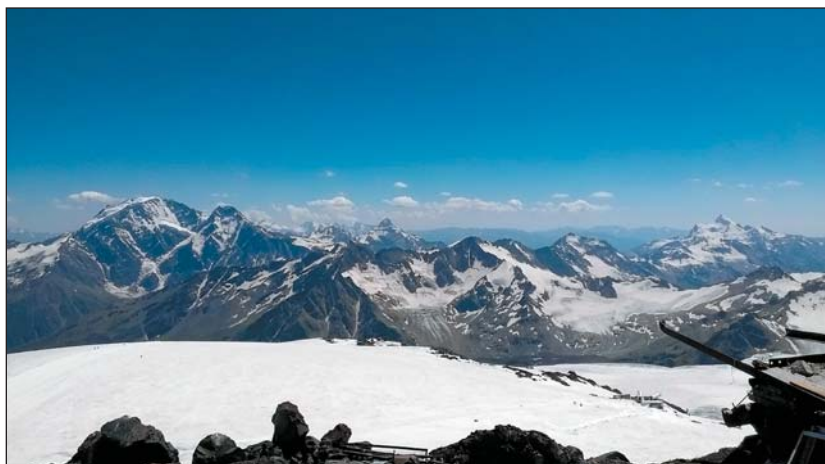
кара, приледниковые озера и исток р.Адыл-Су. Тропа ведет и в ущелье р.Шхельды к знаменитому леднику. От пос.Эльбрус можно отправиться в ущелье Ирик, где находятся удивительные останцы из песчаника, названные песчаными замками.

С горы Чегет, где также работает канатная дорога, открывается великолепный вид на Эльбрус и верховья Баксанского ущелья. С другой стороны высится гора Донгуз-Орун с ледником, названным Семеркой за характерные очертания. Оказавшиеся на Чегете летом могут полюбоваться цветущими рододендронами — гордостью национального парка. Отсюда же можно спуститься к оз.Донгуз-Орун-Кель с водой изумительного сине-зеленого цвета.

Из Кисловодска можно попасть в долину нарзанов, которая находится в месте слияния рек Хасаут и Малка. Здесь на небольшой площади расположено 20 источников. Своими минеральными родниками славится и урочище Джилы-Су, расположенное в верховьях р.Малки у северного подножия Эльбруса. Поляна нарзанов есть также в долине Баксана.

В Приэльбрусье действует несколько музеев. Национальный парк сотрудничает с районным краеведческим музеем в г.Тырныаузе. Несколько лет назад здесь открылся экспозиционный зал «Природа и мы». В нем собрано немало интересных материалов, рассказывающих о природном комплексе Приэльбрусья, его флоре и фауне. Есть там чучела диких животных (горного тура, медведя, волка, рыси, лисы и др.) и птиц. Музей проводит экскурсии, знакомит гостей с многообразием природных ресурсов национального парка, с его научной и природоохранной деятельностью. Интерес к музею у посетителей неизменно высок.

Большое внимание национальный парк уделяет сотрудничеству со средствами массовой информации, природоохранными и общественными организациями. Ведется работа с местным населением: дошкольниками, школьниками, молодежью и студентами, педагогами, а также с посетителями Приэльбрусья. Национальный парк участвует в организации и проведении таких традиционных акций, как «Марш парков», «День Зем-



Панорама Кавказа от «Приюта одиннадцати».

ли», «Всемирный день окружающей среды», «День птиц» и др. 17 октября 2014 г. на территории парка была открыта экологическая тропа «Лесная мозаика» — от пос. Эльбрус в ущелье Адыл-Су.

На станции «Мир» (3500 м) уже много лет работает Музей обороны Приэльбрусья. На поляне Азау открыт природно-мемориальный музей Эльбрусской учебно-научной базы географического факультета МГУ. В пос. Тегенекли действует Альпинистско-охотничий музей им. В.С. Высоцкого. Посещение парка можно совместить с визитом в астрономическую и нейтринную обсерватории. Кроме того, при въезде в парк в Баксанском ущелье создается историко-культурная зона с сетью исторических и этнографических экскурсий и маршрутов, а также мастерских по народным ремеслам.

Вдоль всей долины Баксана туристов сопровождают памятники старины, в том числе стоянки древнего человека. Одна из наиболее известных — грот Сосруко, обнаруженный в 1954—1955 гг. С.Н. Замятниным и П.Г. Акритасом. Грот расположен на левом берегу Баксана, недалеко от пос. Лашкута. Эта пещерная стоянка заселялась неоднократно, но ее основные археологические находки отнесены к мезолиту. Здесь найдены многочисленные кости диких животных (кабана, серны, благородного оленя, зайца, барсука и т.д.). Видимо, большую роль в жизни обитателей грота играла охота. Недалеко от Сосруко известна и другая древняя стоянка — грот Бадыноко.

Приэльбрусье — всемирно известный центр горнолыжного спорта. Зима здесь продолжается более полугода, на лето же приходится всего около месяца. Воздух высокогорья легко пропускает солнечные лучи, но сам прогревается мало, поэтому в горнолыжный сезон здесь часто можно загорать на снегу (а летом с заходом солнца приходится одеваться теплее). Основные трассы проложены на склонах Эльбруса и Чегета*. Здесь много интересного для

* Вот уже несколько лет в горнолыжном комплексе (на полянах Азау и Чегет) круглый год работают веб-камеры, с помощью которых можно наблюдать за происходящим на горных склонах в режиме реального времени.



Поляна нарзанов в долине р. Баксан.

любителей активного зимнего отдыха, в том числе экстремального. Так, для спортсменов — любителей острых ощущений здесь даже предложат так называемый хели-ски. Вертолет доставляет лыжников или сноубордистов на седловину между двумя вершинами Эльбруса, а оттуда начинается головокружительный спуск по снежной целине. На склонах Эльбруса оборудовано множество лыжных трасс, перепад высот на которых в целом превышает 2000 м. Горнолыжные трассы Чегета (особенно его северный склон) считаются самыми сложными в мире. Приэльбрусье принимает у себя туристов со всей России и из-за рубежа, и популярность этого многообразного и удивительного края растет с каждым годом.

Еще две охраняемые территории Кабардино-Балкарии, о которых хотелось бы рассказать, находятся на берегах Чегема. Его извилистая и глу-



Горнолыжная трасса на склоне Эльбруса.



Долина р.Чегем.

Фото Р.Б.Каркаева



Нижнее Голубое озеро.

Фото Л.С.Мурзамуратовой

бокая теснина — одно из красивейших ущелий республики. Отвесные стены, бурные водные потоки, громады гор и скальных вершин — все это создает своеобразный колорит Чегемского ущелья. Именно здесь расположен знаменитый памятник природы — Чегемские водопады (Су-Аузу). Недалеко от начала теснины, на ее левом берегу, со скалы высотой 30 м срывается самый полноводный водопад — Девичья Коса (Адай-Су). А далее, где дорога переходит по мосту на левый берег Чегема, с противоположной стороны реки открывается вид на отвесную стену с основным каскадом водопадов. Потоки воды низвергаются с большой высоты, разлетаясь при падении в пыль и брызги. Удивительно красивы водопады и зимой. От г.Нальчика к Чегемским водопадам ведет хорошая дорога. В любое время года сюда прибывают экскурсионные автобусы из многих городов Северного Кавказа.

Другой примечательный памятник природы Кабардино-Балкарии — Голубые озера — пять карстовых водоемов, расположенных примерно в 30 км к югу от Нальчика, в долине Черек-Балкарского, в 6 км выше по течению от слияния его с Черек-Безенгийским. Одно из них, Нижнее Голубое, находится на высоте 809 м над ур.м. и считается одним из глубочайших карстовых озер в мире. Его глубина составляет 258 м (измерения проводились еще в 1928 г. с помощью веревки с грузом). В озеро не впадает ни одна река, а вытекает из него около 8 тыс. м³ воды в сутки. Интересно, что температура воды в озере постоянна в любую погоду и составляет 9°C. Здесь нет

рыбы, а из представителей фауны известен только мелкий рачок гаммарус.

В 2005 г. на Нижнем Голубом озере при поддержке администрации Черекского р-на и правительства Кабардино-Балкарии создан научно-исследовательский подводный центр. Он был оснащен необходимым водолазным оборудованием. Здесь планировалось ведение постоянного мониторинга подводной экосистемы озера, но исследования так и не начались ввиду отсутствия финансирования. Единственным проектом по изучению озера стал «Blue Lake Awareness» (2012). Его цель состояла в том, чтобы показать всему миру красоту и уникальность озера и привлечь специалистов к его исследованию.

Начиная с 2005 г. подводный центр посетило свыше 10 тыс. человек. Здесь проходили обучение более 300 дайверов, неоднократно организовывались тренировки водолазов и специалистов МЧС. На озере было поставлено несколько рекордов погружений в высокогорных условиях — человек опускался под воду на 180, 195 и 209 м. Подводный центр на Нижнем Голубом озере по праву считается уникальным, не имеющим не только российских, но, пожалуй, и мировых аналогов.

Не секрет, что многие туристы, посетив Кабардино-Балкарию, увидев своими глазами ее невероятные горные пейзажи, познакомившись с ее историей и культурой, испытывают неодолимое желание вновь вернуться в эти места. Этому способствует и традиционное гостеприимство народов Кавказа — обычай, унаследованный от предков и неукоснительно соблюдающийся и сегодня. ■

Владимир Фортков: уравнение состояния в науке

23 января 2016 г. исполняется 70 лет Владимиру Евгеньевичу Форткову — директору Объединенного института высоких температур РАН, президенту РАН. Будучи всегда сторонником конструктивных преобразований в академии, Фортков возглавил ее в сложное время, когда под угрозой оказалось само ее существование. Поздравляя Владимира Евгеньевича с юбилеем, желаем ему успеха не только в дальнейшей научной деятельности, но и в трудной борьбе по защите академической науки. В этом столь важном для всех нас деле ему, пилоту, горнолыжнику, участнику глубоководных погружений, полярных экспедиций, призёру чемпионатов по парусному спорту, обогнувшему на яхте мысы Горн и Доброй Надежды, пересекшему под парусом Атлантический океан, поможет стойкий характер, закаленный в экстремальных путешествиях. А о научных достижениях юбиляра, имеющего индекс цитирования статей около 7500 и интегральный индекс Хирша 49, расскажут известные физики.

академик С.С.Герштейн

*Институт физики высоких энергий
Протвино*

академик Л.М.Зеленый

Институт космических исследований РАН

член-корреспондент РАН Э.Е.Сон

*Объединенный институт высоких температур
Москва*

С первых шагов в науке В.Е.Форткова привлекали фундаментальные проблемы, которые относились к самым разным областям. Позже в кругу его интересов к общим вопросам физики присоединились прикладные задачи, связанные с энергетикой, космосом, вопросами обороны и др. Не пытаясь охватить все работы ученого, которые полно отражены в его статьях и монографиях, расскажем лишь о некоторых, намечающих «научную траекторию» юбиляра.

Температура неидеальной плазмы

Первая работа Форткова (ставшая дипломной, защищенной в Московском физико-техническом институте) была связана с классической задачей из термодинамики плотной плазмы. В то время (1965—1967) теории неидеальной плазмы еще не существовало, а экспериментальные исследования можно было проводить на ударных трубах, сжимая газ с наименьшим потенциалом ионизации — цезий. К сожалению, такой эксперимент не дает полной информации о теплофизических свойствах вещества: измеряются скорость ударной волны (D), давление (p) и плотность (или удельный объем V), но не температура. По измеренным данным можно построить так называемое калорическое уравне-

ние состояния среды $E = (p, V)$, которое в термодинамическом смысле неполно, так как внутренняя энергия E не является полным термодинамическим потенциалом по отношению к переменным p и V . Для построения замкнутой термодинамики необходима дополнительная информация о температуре $T = T(p, V)$ или энтропии $S = S(p, V)$. Динамические же методы исследования основаны на измерении параметров газодинамического движения, которые не дают сведений о термических либо энтропийных характеристиках среды. Найти температуру из калорического уравнения состояния — фундаментальная проблема, которую поставил Э.Ферми и позже Я.Б.Зельдович; она известна как задача Ферми—Зельдовича. Термодинамические дифференциальные уравнения позволяют по регистрации любых двух из пяти параметров: E , p , V , D , u (u — массовая скорость вещества) определить гидро- и термодинамические характеристики исследуемого вещества. Наиболее легко и точно базисными методами измеряется скорость ударной волны D , а выбор второго измеряемого параметра зависит от конкретных условий эксперимента. Ферми и Зельдович предложили строить термодинамически полное уравнение состояния непосредственно по результатам динамических измерений, без введения априорных соображений о свойствах и характере исследуемого вещества, исходя из первого закона термодинамики и известной из эксперимента зависи-



В.Е.Фортов в альма-матер — на Физтехе, 2013 г.

мости $E = E(p, V)$. Необходимый для расчета аналитический вид зависимости $E(p, V)$ студент Фортов находил по экспериментальным данным в форме степенных полиномов или дробно-рациональных функций. Точность полученного решения в зависимости от экспериментальных погрешностей и погрешностей в начальных данных определялась методом Монте-Карло — численно моделировалась вероятностная структура процесса измерения. Данный метод носит общий характер — он свободен от ограничивающих предположений о свойствах, характере и фазовом составе исследуемой среды, так как использует первые принципы механики сплошной среды (законы сохранения и основное термодинамическое тождество). Эта термодинамическая универсальность позволила по единой методике построить уравнения состояния широкого спектра конденсированных сред и описать с их помощью фазовые превращения. Особенно эффективным метод оказался для изучения термодинамики неидеальной плазмы на основе экспериментов по ударному и адиабатическому сжатию насыщенных паров металлов основной и переходной групп, ионных кристаллов, окиси кремния и вольфрама. Теорию, метод расчета и компьютерную реализацию определения температуры на основе калорических данных и разработал дипломник. Анализ погрешностей термодинамических соотношений показывает, что в случае сильносжимаемых («газовых») сред целесообразно осуществлять регистрацию плотности ударно-сжатого вещества. Тогда же для этого была разработана методика, основанная на измерении поглощения «мягкого» рентгеновского излучения плазмой цезия, аргона и воздуха. При меньшей сжимаемости системы (конденси-

рованные среды) приемлемые точности обеспечиваются путем регистрации скорости u . Так исследовались состояния ударно-сжатого вещества, вырожденной плазмы металлов и плотной больцмановской плазмы аргона и ксенона.

Позднее коллектив под руководством Фортова выполнил эксперименты по динамическому воздействию на плазму ударных волн разной интенсивности — варьировалась мощность источников возбуждения. Кроме того, использовались разнообразные способы выбора параметров исходных состояний: изменение начальных температур и давлений (плазма инертных газов, цезия, жидкостей), применение мелкодисперсных мишеней в целях увеличения эффектов необратимости.

www.mipt.ru

Итак, в динамических методах диагностики, основанных на общих законах сохранения, задача определения калорического уравнения состояния $E = E(p, V)$ сводится к измерению кинематических параметров движения ударных волн и контактных поверхностей, т.е. к регистрации расстояний и времен, что может быть выполнено с высокой точностью.

Термодинамический портрет вещества

Уже с самого начала мы столкнулись с понятием «уравнение состояния вещества», важнейшим для нашего рассказа. Напомним, что уравнение состояния — это функциональная зависимость между термодинамическими параметрами, описывающими состояние вещества, его основная количественная характеристика, которая позволяет применять общий формальный аппарат термодинамики и динамики сплошных сред к физическим объектам и процессам чрезвычайно разнообразной природы — от тепловых машин и биологических структур до ультраэкстремальных условий Большого взрыва и релятивистских адронных столкновений. Графический образ этой зависимости — хорошо всем знакомые фазовые диаграммы, показывающие, что представляет собой вещество в той или иной области параметров. Если законы сохранения (массы, импульса и энергии) в максимально общем математическом виде отражают наиболее фундаментальные свойства симметрии пространства-времени, то уравнение состояния вводит в этот общий формализм конкретную количественную специфику определенного состояния вещества — газа, жидкости, твер-

дого тела, электромагнитной и кварк-глюонной плазмы, излучения ядерной материи и др. Уравнения состояния необходимы для понимания и описания самых разных процессов, вплоть до явлений при экстремально высоких концентрациях энергии — стадиях Большого взрыва, а также в астрофизических объектах (нейтронных звездах, черных дырах и т.п.) на конечных стадиях их эволюции, когда под действием гравитационного сжатия и термоядерного энерговыделения реализуются ультравысокие давления и температуры ядерного вещества. Интерес к описанию вещества в экстремальных условиях имеет и практическое значение, так как именно с продвижением вверх по шкале температур и давлений рабочих тел связано повышение эффективности энергетических устройств. Уравнение состояния рабочих тел тепловых машин — научная основа теплофизики высоких температур и современной энергетики.

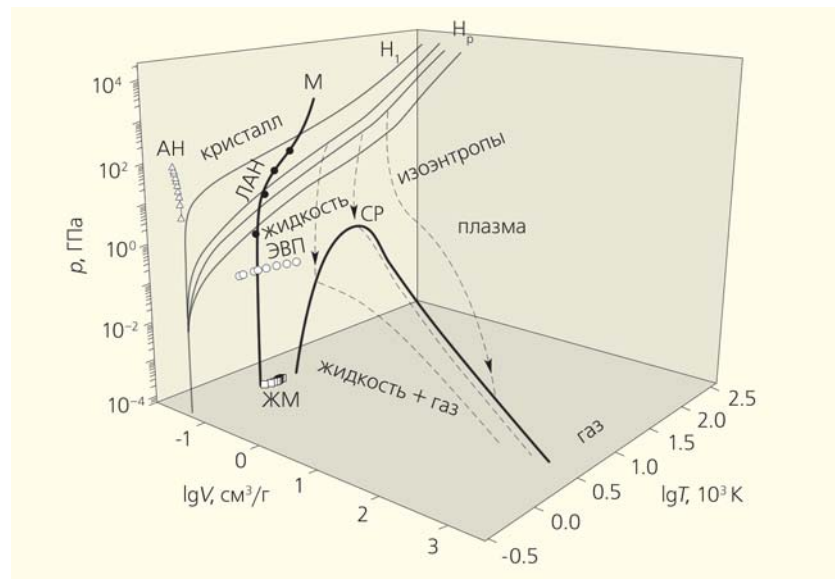
Необходимость расчета термодинамических характеристик различных веществ возникает при решении практически любой задачи современной физики высоких плотностей энергии — реализации идеи управляемого термоядерного синтеза, проектирования мощных магнитогидродинамических и магнитокумулятивных генераторов, расчета динамики сильных ударных волн, противометеоритной защиты космических аппаратов, определения строения и эволюции звезд и планет и многих других. Все они наряду с задачами перспективной технологии высоких давлений (синтеза алмазных фаз графита и нитрида бора, взрывной, электронно-лучевой и лазерной сварки и обработки металлов и т.п.) служат мощным стимулом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований, имеющих целью как продвижение в область новых участков фазовой диаграммы, так и получение детальных данных в уже освоенном диапазоне параметров.

Требования к адекватному и детальному описанию термодинамических свойств вещества резко повысились при рассмотрении нестационарных газодинамических явлений, поскольку прогресс в численных методах на базе новых ЭВМ петафлопной и эксафлопной производительности привел к разработке эффективных разностных схем расчета. При этом точность газодинамических расчетов определяется погрешностями не только в решении уравнений сохранения, но и (даже в первую

очередь) в уравнениях состояния среды, выполняющих роль «замыкающих» для полной системы уравнений движения. В этой области под руководством и при непосредственном участии Фортова разработаны наиболее сложные трехмерные нестационарные газодинамические пакеты решения фундаментальных и прикладных проблем физики и энергетики.

Уравнение состояния строится либо по результатам экспериментов, либо методами статистической физики. Основная трудность последовательного теоретического расчета уравнения состояния — корректный учет сложного по структуре межчастичного взаимодействия в квантово-механической задаче многих тел при любых значениях константы связи и любом типе статистики. Это сложная фундаментальная проблема, несмотря на впечатляющие успехи современных беспараметрических методов молекулярной динамики Монте-Карло.

По этой причине приходится рассматривать упрощенные модели, область применимости которых ограничена и устанавливается в каждом конкретном случае либо на основе внутренних характеристик модели, либо путем сравнения с более точными решениями или с результатами эксперимента. Последний путь, очевидно, более конструктивен, так как известны многочисленные примеры (теория Ван-дер-Ваальса, интегральные



Фазовая диаграмма урана, построенная с помощью полуэмпирического многофазного уравнения состояния. Обозначены жидкое, газовое и плазменное состояния, граница фазового перехода газ—жидкость с критической точкой (СР), кривая плавления (М), адиабаты динамического (ударного) сжатия (адиабаты Югонио) сплошного (H_s) и пористых (H_p) образцов и траектории изоэнтропического расширения (штрих), измерения термического расширения жидкого металла (ЖМ) и изобарического электровзрыва проводников (ЭВП), а также области, исследуемые при сжатии в алмазных наковальнях при комнатной (АН) и конечных (ЛАН) температурах.

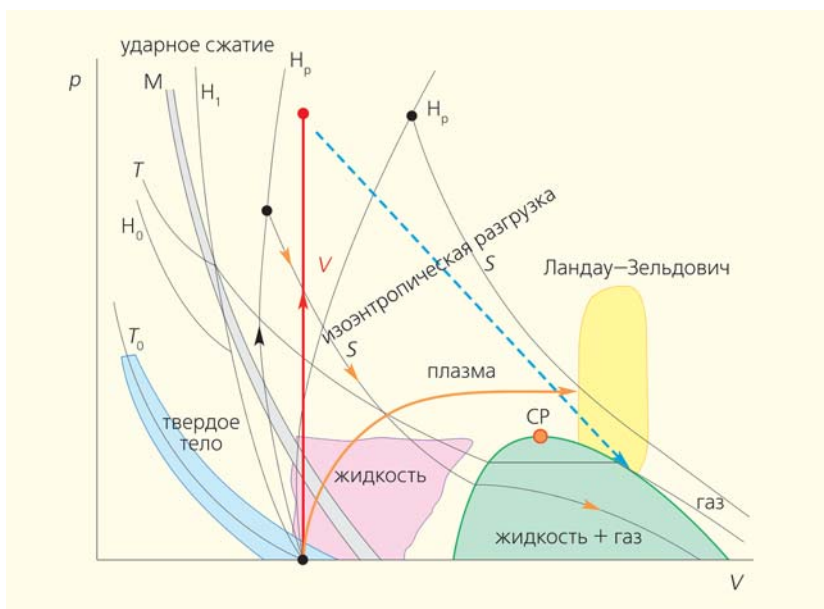
уравнения, неидеальная плазма и т.п.), когда фактическая область применимости моделей значительно превосходит границы, определяемые малостью соответствующих безразмерных параметров и критериев.

На следующем этапе развития термодинамических моделей имеющиеся экспериментальные данные привлекаются для выбора основных числовых параметров в функциональных зависимостях, построенных на основании точных решений или упрощенных моделей. Полученные таким образом полуэмпирические модели применяются для описания и формулировки адекватных моделей «нулевого» приближения в особо сложных ситуациях (при рассмотрении жидкостей, твердых тел, плотной электромагнитной и кварк-глюонной плазмы, ядерной и нейтронной материи), не допускающих выделения малого параметра теории возмущений. Успех построения полуэмпирических моделей проверяется как степенью воспроизведения возможно более широкого числа разнородных экспериментальных данных, так и возможностью экстраполяции вычислений. Ясно, что для полуэмпирических моделей эксперимент — не только необходимое дополнение, но и фактическая основа их существования.

Чтобы продемонстрировать важность эксперимента, в качестве небольшого отступления вспомним историю, начавшуюся в 1943 г., когда Л.Д.Ландау и Я.Б.Зельдович опубликовали работу о метал-

лизации паров металлов в закритической области. Они обратили внимание на то, что в этой области вещество в зависимости от плотности может вести себя и как диэлектрик, и как проводник, и поставили задачу о линии перехода металл—диэлектрик вблизи критической точки паров металлов. Тогда уже было известно, что пары металлов могут резко менять свою электропроводность в узкой зоне, поэтому в статье было высказано предположение о связи термодинамического фазового перехода газ—жидкость с переходом металл—диэлектрик. Эта гипотеза требовала экспериментальной проверки в закритической области. Но в то время подобных опытов не было, и задача оставалась нерешенной в течение десятков лет. Считалось, что попасть в закритическую область можно только двумя способами — из газовой или конденсированной фазы. В начале 70-х годов стали интенсивно изучаться металлические свойства плазмы, и Фортов развил другой метод, основанный на так называемых адиабатах разгрузки. При ударном сжатии твердых металлов вещество попадает в область существенно выше критической точки. Искусство состоит в том, что при ударном сжатии нужно попасть в такую точку фазовой диаграммы вещества, чтобы в дальнейшем при адиабатическом расширении пройти исследуемую закритическую область. В работах Фортова были исследованы электропроводность и оптические свойства паров металлов в закритической области.

Наконец, значительная часть диаграммы состояний вещества, важная для практических приложений, недоступна пока ни для теоретических, ни для экспериментальных методов. В этой ситуации существует почва для самых разнообразных гипотез, формулируемых обычно на языке эвристических моделей, которые представляют собой экстраполяцию в сильно неидеальную область результатов упрощенных физических представлений, полученных для случая малых неидеальностей. Будучи сугубо качественными, такие модели часто предсказывают появление новых фаз и состояний с экзотическими свойствами — «плазменных» кристаллов и жидкостей, плазменных фазовых переходов и фазовых переходов при деконфайнменте кварков, электрически заряженных фаз в нейтронных звездах, неконгруэнтных фазовых переходов и др. Это делает остро необходимым экспериментальную проверку столь интригующих возможностей.



Фазовая диаграмма металлов, исследуемая динамическими методами. Обозначены области, достигаемые как в статическом эксперименте при комнатных температурах (T₀), так и при ударном сжатии сплошных (H₁) и пористых (H₂) образцов при однократном (H₁) и двукратном (H₂) сжатии. Указаны путь изохорического нагрева (V) тяжелоионным и лазерным облучением и траектории изоэнтропического расширения («разгрузки»). В околоскритической области показана зона гипотетического перехода металл—диэлектрик, предсказанного Ландау и Зельдовичем.

В цикле работ Фортова по теплофизическим свойствам веществ проведены сравнительный анализ различных термодинамических моделей и обсуждение пределов их применимости в широком диапазоне параметров. Основное внимание было уделено описанию состояний, представляющих сейчас наибольший интерес для физики высоких концентраций энергии, которые либо уже достигнуты, либо в обозримом будущем могут быть получены в контролируемых условиях на Земле, либо реализуются в астрофизических объектах на разных этапах их эволюции.

Экстремальные состояния

Экстремальные состояния вещества возникают как в природных, так и в техногенных ситуациях: при воздействии мощных ударных, детонационных и электровзрывных волн, концентрированного лазерного излучения, электронных и ионных пучков, в мощных химических и ядерных взрывах в недрах планет и звезд, при гиперзвуковом движении тел в плотных атмосферах планет, при высокоскоростном ударе, при импульсном испарении лайнеров пинчей в магнитокумулятивных генераторах и во многих иных ситуациях, характеризующихся предельно высокими давлениями и температурами. Эти параметры превышают нормальные земные в тысячи и миллионы раз. В послевоенные годы интерес к таким состояниям возник в связи с созданием атомного оружия и атомных реакторов. В ядерных зарядах порождаемые мощными ударными волнами высокие плотности энергии используются для инициирования цепных ядерных реакций в сжатом ядерном топливе, а в термоядерных зарядах и в микромишенях управляемого термоядерного синтеза высокоэнергетические состояния — основной инструмент для сжатия, разогрева термоядерного топлива и инициирования в нем термоядерных реакций синтеза. Эксперименты с веществом в экстремальном состоянии очень дорогостоящи. К сожалению, оказалось, что хорошо разработанные к тому времени ударно-волновые методы неэффективны для получения сильно сжатого вещества из-за принципиальных ограничений на ударно-волновое сжатие — не более чем в 4–6 раз, в зависимости от эффективного показателя адиабаты. Фортов сумел использовать опыт предшественников и объединить сотрудников академических институтов, ядерного научного центра Сарова и коллективы, занимающиеся термоядерным инерционным синтезом при лазерном и пучковом сжатии мишеней, а также использовать результаты подземных ядерных испытаний. В конце концов применение более мощных и изолированных систем кумуляции энергии — химических и ядерных взрывчатых веществ, пороховых, легкогазовых и электродинамических «пушек», потоков заряженных частиц, лазерного и рентгеновского

Большая часть работ по ударным волнам в России проводится сегодня в Черноголовке одним из учеников Я.Б.Зельдовича — академиком В.Е.Фортовым и его талантливыми коллегами. В.Е.Фортов уникален, чем-то аналогичен П.В.Бриджмену в создании совершенно новой области физики — динамической физики плотной плазмы. В течение многих лет существовало мнение, что некоторые состояния плазмы не могут быть получены экспериментально; это были экстремально плотные состояния, вплоть до состояния критической плотности и температуры до нескольких электронвольт. Используя методы ударно-волнового сжатия посредством высокоскоростных ударников для детального изучения изоэнтроп расширения путем регистрации давления в сочетании с измерениями электропроводимости и спектроскопическими методами, а также экспериментами в районе сотен Мб, используя ядерные взрывы, В.Е.Фортов открыл обширную перспективу pV -пространства, прежде неисследованного, и обеспечил новое поколение теоретиков результатами экспериментов, о которых они ранее и не мечтали. Один известный в США ученый в области ударных волн сказал, что «он опередил исследования в области ударных волн на ближайшие 10 лет».

Р.Н.Киллер,

бывший начальник физического отдела Ливерморской национальной лаборатории им.Э.Лоуренса (США)
(цит. по: УФН. 1995. Т.165. №5. С.595—598)

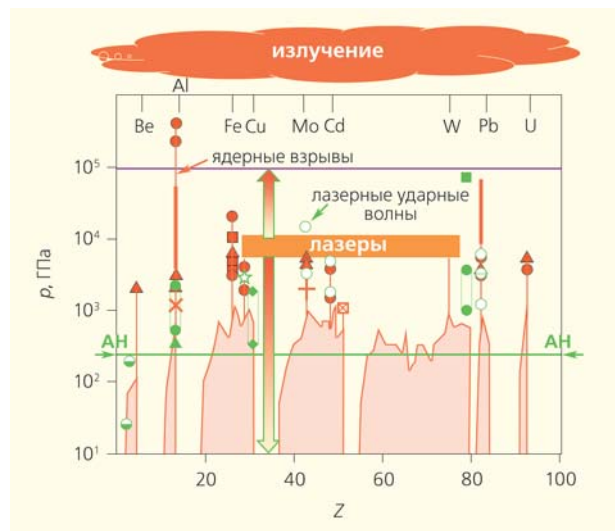


Рис.4. Диаграмма рекордных давлений для металлов, достигнутых в «лабораторных условиях». В экспериментах удалось охватить почти всю таблицу Менделеева. По оси абсцисс отложен заряд ядер от водорода до тяжелых металлов. Показаны результаты динамических экспериментов в ударных волнах, в подземных ядерных взрывах, при магнитном сжатии вещества и при сжатии вещества мощными лазерами.

излучений — позволило поднять скорость метания ударников на три-четыре порядка величины, а давление в ударной волне — на 6—8 порядков, иначе говоря, были достигнуты давления мегабарно-гигабарного диапазона и «ядерные» плотности энергии вещества.

Экспериментальные исследования наряду с численным моделированием дали возможность существенно продвинуться в область физики экстремальных состояний. Здесь Фортов — признанный не только в России, но и в мире лидер науки, так как результаты работы коллектива под его руководством превосходят мировые достижения. В частности, такие успехи, как ионизация давлением в сильно сжатом водороде, изучение электропроводности и оптических свойств плазмы экстремальных состояний, в основном достигнуты именно в этой группе.

Благодаря современным мощным источникам локальной концентрации энергии объектом лабораторных исследований стали состояния вещества с недоступными ранее экстремально высокими давлениями и температурами, соответствующими новым областям фазовой диаграммы. Масштабы реализуемых природой или человеком состояний вещества способны поразить самое смелое воображение. На дне Марианской впадины (11 км) давление достигает 1.2 кбар, в центре Земли — 3.6 Мбар, в центре Юпитера ≈ 40 —60 Мбар, в центре Солнца $p \approx 240$ Гбар, $T \approx 1.6 \cdot 10^3$ эВ, плотности $\rho \approx 150$ г/см³, в остывающих звездах — белых карликах $p \approx 10^{10}$ — 10^{16} Мбар, $\rho \approx 10^6$ — 10^9 г/см³, $T \approx 10^3$ эВ. В мишенях управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы $p \approx 200$ Гбар, $\rho \approx 150$ —200 г/см³, $T \approx 10^8$ эВ. Нейтронные звезды — элементы пульсаров, черных дыр, источников γ -всплесков и магнитаров — имеют, по-видимому, рекордно высокие параметры: для мантии: $p \sim 10^{19}$ Мбар, $\rho \approx 10^{11}$ — 10^{14} г/см³, $T \approx 10^4$ эВ; для ядра: $p \approx 10^{22}$ Мбар, $\rho \approx 10^{14}$ г/см³ при гигантской индукции магнитного поля — от 10^{11} до 10^{16} Гс. Изучение и описание этих экзотических состояний составляет предмет бурно развивающейся научной дисциплины — физики высоких плотностей энергии. При этом под нижней границей «высоких плотностей энергии» обычно понимают плотности, сравнимые с энергией связи конденсированного вещества 10^4 — 10^5 Дж/см³, что соответствует энергии связи валентных электронов в несколько электронвольт и давлениям примерно от 100 кбар до 1 Мбар. Эти давления значительно превосходят пределы механической прочности материалов и делают необходимым учет их сжимаемости, а следовательно, и гидродинамического движения при импульсном энерговыделении.

И хотя предельные давления лабораторной плазмы пока отличаются от максимальных астрофизических значений на 20—30 порядков, этот разрыв стремительно сокращается, а физические процессы в лаборатории и космосе часто демон-

стрируют поразительное разнообразие и вместе с тем глубокие аналогии, свидетельствующие как минимум о единстве физических принципов поведения вещества в широчайшем диапазоне плотностей (42 порядка) и температур (до 10^{13} К).

Важно, что наряду с фундаментальными постоянно расширяется круг технических проблем, связанных с физикой экстремальных состояний. Эти состояния вещества определяют работу импульсных термоядерных реакторов с инерционным удержанием горячей плазмы, мощных взрывоманитных и магнитогидродинамических генераторов, энергоустановок и ракетных двигателей с газофазными ядерными реакторами, плазмохимических и СВЧ-реакторов, плазмотронов и мощных источников оптического и рентгеновского излучения. Тесно связана с высокоэнергетической плазмой физика приэлектродных, контактных и электровзрывных процессов при вакуумном пробое; такая плазма определяет работу мощных импульсных ускорителей, генераторов СВЧ-излучений и плазменных коммутаторов. В энергетических устройствах будущего сильно сжатая и разогретая плазма будет использоваться в качестве рабочего тела, подобно водяному пару на современных тепловых электростанциях.

Вообще говоря, высокие плотности энергии определяют поведение вещества в обширной области фазовой диаграммы, занимая область от твердого тела и жидкости до нейтрального газа, покрывая фазовые границы плавления и кипения, а также область перехода металл—диэлектрик. Проблема перехода металл—диэлектрик сейчас получила значительное развитие в экспериментах по многократному (квазиизоэнтропическому) ударно-волновому сжатию диэлектриков, их металлизации и по открытым недавно плазменным фазовым переходам в мегабарном диапазоне давлений, а также по диэлектризации сильно сжатых простых металлов.

Секреты детонации

Крайняя форма экстремального состояния вещества — взрыв, и одна из центральных проблем, в анализ которой Фортов внес значительный вклад, — физика ударных и детонационных волн. С середины 50-х годов, когда в научной печати появились первые работы по экспериментальному изучению свойств конденсированных веществ при экстремально высоких давлениях, и до настоящего времени исследования в этой области значительно расширились и дали существенные результаты. Нужные параметры среды достигаются за счет воздействия мощных ударных волн. Изучение физических процессов, сопровождающих ударно-волновое сжатие конденсированных сред, неотделимо от исследования их фундаментальных свойств. Воздействуя ударной волной, удалось эксперимен-



Уникальная камера для проведения взрывов при высоких давлениях, сваренная из сверхпрочных корпусов подводных лодок. В мире их только две, вторая разработана тем же коллективом и поставлена в Японию в Исследовательский центр. Сейчас используется для многих целей, в том числе для решения проблем безопасности водородной энергетики.

тально определить ударное сжатие большинства элементов и многих химических соединений в очень широких диапазонах давлений, найти высокотемпературные кривые плавления и кипения, получить сильно неидеальную плазму, обнаружить неизвестные ранее электронные перестройки в металлах и фазовые превращения при интенсивных быстрых деформациях, исследовать ряд других интересных явлений, происходящих в области экстремально высоких параметров, которые недоступны для других опытных методов. Знание ударно-волновых свойств различных материалов, их широкодиапазонных уравнений состояния необходимо для решения ряда научно-технических задач, включающих высокоскоростные соударения, перспективные проекты военной и мирной атомной энергетики и многое другое. Из результатов, полученных за последние 30–40 лет коллективом под руководством Фортова, нужно отметить работы, касающиеся ударного сжатия металлов, сжатия химически реагирующих сред и детонации конденсированных взрывчатых веществ, которые используются для возбуждения ударных волн. Были модифицированы известные и разработаны новые экспериментальные методы, в том числе созданы метательные устройства для реализации высоких давлений. Большое внимание уделялось реальным режимам детонации индивидуальных и смесевых мощных взрывчатых веществ. Расчетные модели ударного сжатия конденсированных веществ позволили аппроксимировать экспериментальные данные по ударной сжимаемости в форме широко-

диапазонных ударных адиабат. Были установлены справочные данные для 80 веществ, выявлены шесть металлов, рекомендуемых в качестве ударно-волновых эталонов, которым отвечают наиболее точные ударные адиабаты. Измерения ударной сжимаемости пористых образцов железа, меди, никеля и вольфрама были проведены и в лабораториях, и в условиях подземных ядерных взрывов. Последние отвечают в настоящее время предельным возможностям эксперимента и существенно расширяют исследованную область фазовой диаграммы этих материалов. Изучались распространение ударных волн в твердых телах, полиморфные превращения при ударном сжатии и устойчивость ударных волн в веществах с фазовыми переходами.

В задачах газодинамического моделирования с помощью расчетных моделей, описывающих распространение ударных волн в твердых телах, были проанализированы основные эффекты — релаксация напряжений и сдвиговая прочность металлов, проявляющиеся в ударных волнах и волнах разрежения. Это позволяет описать ударно-волновое деформирование металлов как существенно неравновесный процесс развития упруго-пластического течения за фронтом ударной волны. Кроме того, были развиты подходы к описанию сжатых и плазменных состояний вещества, в том числе на основе модифицированной модели типа Ван-дер-Ваальса.

В итоге коллектив под руководством Фортова создал концепцию разрушения материалов при экстремальных и высокоскоростных нагрузках,

которая, в частности, применена к разрушению крупногабаритных конструкций под действием интенсивных динамических воздействий. Концепция основана на критериальном подходе к величине упругой энергии деформации в феноменологической модели, которая позволяет описать динамические разрушения и оценить для них предельные нагрузки, приводящие к ним.

Космос как лаборатория

Наряду с вопросами, представляющими прагматический земной интерес, Фортов постоянно уделяет внимание ультраэкстремальным астрофизическим и ядерно-физическим приложениям, где на состояние вещества существенное влияние оказывают мощные гравитационные и магнитные поля, релятивизм, тепловое излучение, превращения ядерных частиц и нейтронизация нуклонов, деконфайнмент кварков и т.д. Так, Владимир Евгеньевич был одним из инициаторов и организаторов крупного проекта российско-европейского сотрудничества FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) по созданию в Германии ускорителя для исследований столкновений антипротонов и ионов и образующейся при этом кварк-глюонной плазмы.

Астрофизические же данные кроме чисто фундаментальной ценности привлекательны как бесплатный «экспериментальный» источник физической информации для построения моделей уравнений состояния в условиях, далеко выходящих за пределы возможностей лабораторного эксперимента. Получение в лабораторных или квазилабораторных условиях экстремальных «космических» параметров потребовало бы совершенно нереальных экономических усилий.

В свою очередь, исследование плазмы высоких энергий сейчас имеет не только практический, но и фундаментальный аспект, так как подавляющая часть материи во Вселенной находится именно в этом экзотическом состоянии. По современным оценкам, около 95% массы (без учета темной материи) — это плазма обычных и нейтронных звезд, пульсаров, черных дыр и планет-гигантов Солнечной системы, а также открытых недавно сотен планет вне Солнечной системы. Прежде чем стать звездой, вещество Вселенной проходит все круги разнообразных физических превращений: от кварков и элементарных частиц к сложным молекулам и вновь к атомам и частицам; от релятивистских энергий к абсолютному нулю и вновь к состоянию высокоэнергетической и плотной плазмы; от гигантских плотностей к глубокому вакууму и снова к плотностям атомного ядра и кваркам. Поэтому наши фундаментальные знания относительно структуры, эволюции и истории Вселенной напрямую зависят от понимания поведения материи при всех ее трансформациях, вплоть до ультравысоких концентраций энергии, что

формирует не только конкретные физические модели, но и мировоззренческие концепции современного естествознания. Ведь, последовательно наращивая доступные для изучения высокие плотности энергии на Земле и в космосе, мы движемся в прошлое на «машине времени» к сингулярным условиям Большого взрыва — момента рождения Вселенной ~15 млрд лет назад. Особое значение имеет разработка моделей уравнений состояния ранней Вселенной после Большого взрыва, где для описания начальных стадий реализуются наиболее экстремальные — «планковские» условия.

Итак, примеры исследований в области экстремальных состояний вещества доказывают, что сегодня это одна из самых «горячих» и интенсивно развивающихся фундаментальных научных дисциплин, находящаяся на стыке физики плазмы, нелинейной оптики, физики конденсированного состояния, ядерной, атомной и молекулярной физики, релятивистской и магнитной гидродинамики. Несмотря на чрезвычайное разнообразие объектов, экспериментальных и астрофизических ситуаций, все они объединены определяющей ролью высоких плотностей энергии в их физическом поведении. И комплексный подход к изучению проявлений в природе универсальных законов, развиваемый школой Фортова, может служить современным эталоном научных изысканий.

Пылевая плазма

Хотя объем данной статьи ограничен, нельзя не упомянуть о еще одной тематике, которая интересует Владимира Евгеньевича — пылевой плазме. Ионизованном газе, содержащем заряженные частицы конденсированного вещества. Часто такую плазму называют комплексной, коллоидной или плазмой с конденсированной дисперсной фазой. Наличие пылевых частиц в плазме может существенно влиять на ее химический и зарядовый состав, электрофизические и оптические свойства, на теплообмен и массоперенос и т.д. Пылевая плазма широко распространена в природе — например, в верхних слоях атмосферы, в космосе: в планетных кольцах, хвостах комет, межпланетных и межзвездных облаках. Кроме того, она образуется в ряде технологических процессов — в частности, в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы. Пылевые частицы в плазме могут заряжаться потоками электронов и ионов, а также путем фото-, термо- или вторичной эмиссии электронов и приобретать значительный отрицательный или положительный электрический заряд. Такие заряженные частицы эффективно взаимодействуют как между собой, так и с внешними электрическими или магнитными полями. Совместное действие электрических сил с процессами диссипации кинетической энергии пылевых частиц в слабоионизованной плазме может приводить к формированию как

квазистационарных плазменно-пылевых структур (подобных жидкости или твердому телу), так и к сложным колебательным или хаотическим режимам. Дело в том, что кулоновский параметр взаимодействия, определяемый отношением потенциальной энергии взаимодействия частиц к их кинетической энергии, здесь может быть очень велик — больше 10^6 , так как заряды пылевых частиц бывают значительными, а кинетическая энергия — малой. В этих условиях кулоновская система кристаллизуется. Впервые упорядоченные системы пылевых частиц были обнаружены только в середине 90-х годов прошлого века почти одновременно несколькими научными группами: сначала в плазме ВЧ-емкостного разряда, а затем — в термической плазме, плазме тлеющего разряда постоянного тока, плазме индукционного ВЧ-разряда, фотоиндуцированной и ядерно-возбуждаемой пылевой плазме, в плазме продуктов горения.

Начиная с середины 90-х годов Фортов активно занялся работами по пылевой плазме — сначала в лабораторных условиях, затем на космической станции «Мир», а с 2001 г. на Международной космической станции (МКС). Для регистрации пылевых частиц были использованы скоростные видеокамеры, которые удобны для наблюдения относительно больших по размерам объектов, что значительно упрощает применение бесконтактных методов для их диагностики и позволяет проводить исследование на кинетическом уровне. Так удалось реализовать принципиально новые методы диагностики параметров пылевых частиц и плазмы.

Лабораторная пылевая плазма — хорошая экспериментальная модель для изучения различных физических процессов в системах взаимодействующих частиц, которые представляют широкий интерес как в области физики неидеальной плазмы, так и в других областях естественных наук, таких как физика конденсированных сред, химия, биология, физика атмосферы и т.д. С началом экспериментальных исследований в условиях микрогравитации открылись новые возможности для изучения свойств пылевой плазмы, так как в космосе проще, чем на Земле, наблюдаются плазменные кристаллы, поскольку здесь нет силы тяжести, противодействующей кристаллизации. Подобные эксперименты позволяют изучать широкий круг физических явлений — зарядку частиц аэрозоля, эффекты поляризации разноименных зарядов, динамику пылевых частиц и др., наблюдение которых невозможно в лабораториях на Земле. Наиболее интересна ситуация, когда пылевые частицы при сильном взаимодействии образуют жидкостную или кристаллическую структуру, а исследования возможны на кинетическом уровне.

Пылевые частицы могут не только преднамеренно вводиться в плазму, но и образовываться самопроизвольно в результате различных физико-химических процессов. Широкая распространенность плазменно-пылевых систем, а также целый



Космонавт С.К. Крикалёв проводит эксперимент на аппаратуре «Плазменный кристалл-3» на Международной космической станции. Создать сложную научную аппаратуру для МКС нелегко, так как нужно выдерживать ограничения по объему, весу, энергетике и в то же время обеспечить уникальные эксперименты в условиях микрогравитации. Сейчас в кооперации с Роскосмосом, Европейским космическим агентством и НАСА проводится уже четвертая экспедиция с целью получения новых данных о коллективных свойствах сильно неидеальных кулоновских систем.

ряд свойств пылевой плазмы делают ее чрезвычайно привлекательным и интересным объектом исследования. Пыль, приобретающая в плазме электрический заряд, представляет собой ее дополнительный заряженный компонент. Однако свойства такой плазмы значительно богаче свойств обычной многокомпонентной системы электронов и ионов различного сорта. Пылевые частицы служат центрами рекомбинации плазменных электронов и ионов, а иногда и источником электронов в результате термо-, фото- и вторичной электронной эмиссии. Тем самым пылевой компонент может существенно влиять на ионизационное равновесие. Заряд его частиц не является фиксированной величиной, а определяется параметрами окружающей среды и может изменяться как во времени, так и в пространстве. Кроме того, заряд флуктуирует даже при постоянных параметрах плазмы, поскольку зарядка — процесс стохастический. Вследствие большого заряда пылевых частиц потенциальная энергия электростатического взаимодействия между ними велика. Поэтому неидеальность подсистемы частиц реализуется значительно легче, чем неидеальность электрон-ионной подсистемы, хотя концентрация макрочастиц обычно значительно ниже концентраций электронов и ионов. Присутствие пыли заметным образом сказывается и на коллективных процессах в плазме: она может не только модифицировать, но зачастую и определять спектр колебаний, влиять на эффекты затухания и неустойчивости. Ее наличие изменяет характерные пространст-

венные и временные масштабы в плазме. Так, плазменная частота, характеризующая пылевой компонент, за счет большой массы пылевых частиц на несколько порядков меньше ионной плазменной частоты. Это приводит к возникновению новой ветви колебаний — «пылевому звуку», где формирование кристаллических структур в различных типах пылевой плазмы приводит к различным ветвям акустических колебаний. Активно ведутся исследования вигнеровской кристаллизации ионов в различного рода ионных ловушках и электронов на поверхности жидкого гелия.

Весь спектр исследований пылевой плазмы — зарядки частиц в разных условиях, их взаимодействия, образования упорядоченных структур, фазовых переходов, нелинейных волн, транспортных свойств — проводился в коллективе под руководством Фортова.

От энергетики до образования

Объединенный институт высоких температур со времени своего основания выполнял работы в области электроэнергетики, однако новый этап этих работ начался с 2008 г., когда по инициативе Фортова и председателя правления теперешнего ОАО «Россети» О.М. Бударгина был создан научно-технический совет РАН и федеральной сетевой компании. В течение последних лет институт вместе с рядом соисполнителей осуществил несколько проектов в области высоковольтной энергетики, которые прошли путь от создания макетных и опытных образцов — токоограничивающих устройств, гибридных накопителей электроэнергии, контрольно-испытательных комплексов и др. — до внедрения на объектах Единой энергетической системы России. В итоге уже в 2012 г., на первом энергетическом форуме RUSGRID-2012, институт выставил 25 т научного оборудования в области высоковольтной энергетики. Объем представленной наукоемкой продукции превысил объемы всех фирм, участвующих в выставке, включая зарубежные гиганты электроэнергетики — такие, как «Сименс», «Тошиба», «Альстом».

Важную роль сыграла поддержка Фортовым отечественной науки и образования в тяжелейшие 90-е годы. Будучи министром науки и технологий, Владимир Евгеньевич добился трехкратного увеличения бюджетных ассигнований на научные исследования. На посту председателя Российского фонда фундаментальных исследований Фортов организовал тщательную экспертизу проектов научных работ (к которой привлек ведущих специалистов страны) и финансовую поддержку лучших проектов, выбранных на конкурсной основе.

Большое значение Владимир Евгеньевич придает обучению новых поколений физиков и инженеров, будучи с 1990 г. бессменным заведующим кафедрой физики высокотемпературных процессов

в своей альма-матер — Московском физико-техническом институте. Им написано около 20 научных книг, но, по-видимому, основным трудом следует считать серию «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Это фундаментальное справочно-информационное издание по всем разделам физики, химии и техники низкотемпературной плазмы, обобщающее самые последние достижения и предназначенное для проведения перспективных работ и фундаментальных исследований, научного и учебного сопровождения подготовки специалистов высшей квалификации.

Энциклопедией охвачена следующая тематика:

- общезначимые характеристики и физико-химические свойства низкотемпературной плазмы;
- элементарные процессы в низкотемпературной плазме;
- термодинамические, оптические и переносные свойства низкотемпературной плазмы;
- генерация плазмы;
- диагностика и метрология плазменных процессов;
- взаимодействие низкотемпературной плазмы с конденсированным веществом, газом, электромагнитным полем;
- численное и физическое моделирование плазменных процессов и систем;
- химия низкотемпературной плазмы;
- плазмодинамика;
- плазменная электроника;
- плазмотехнические системы — плазменные энергетика, двигатели, источники теплового и когерентного излучения, технология, прикладная химия.

Издание выходит с 1996 г.; сейчас выпущено 23 тома. Авторы энциклопедии, научно-педагогический коллектив, среди которых более 200 специалистов — видных российских ученых, имеющих высокую научную и учебно-педагогическую репутацию как в нашей стране, так и за рубежом, — объединили усилия десятков университетов и академических организаций страны. Все это вселяет уверенность в надежных перспективах будущих исследований.

Многогранная деятельность Владимира Евгеньевича отмечена целым рядом достойных наград: шестью российскими орденами, десятью медалями, шестью международными наградами (в том числе французским и немецким орденами, медалями ЮНЕСКО), пятью Государственными премиями. Среди престижных международных научных наград Фортова — премия имени нобелевского лауреата П.Бриджмена за изобретения аппаратуры для создания экстремальных давлений и за открытия в этой области физики, премия имени нобелевского лауреата Г.Альфена за открытия в магнитной гидродинамике и плодотворные применения их в физике плазмы.

И можно не сомневаться, что они не последние в биографии юбиляра. ■

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2015 ГОДА

По физике — А.Макдональд и Т.Каджита

Нобелевская премия по физике была присуждена ученому из Канады профессору Артуру Макдональду и японскому физико-профессору Такааки Каджита за «открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу». Детектор нейтринной обсерватории SNO (Sudbury Neutrino Observatory) в Канаде, работой на котором руководит Артур Макдональд, позволил наблюдать осцилляции солнечных нейтрино, а в ходе японского эксперимента Super-Kamiokande были открыты осцилляции атмосферных нейтрино.

Артур Макдональд (Arthur McDonald) родился в 1943 г. в Сиднее (Новая Шотландия, Канада), окончил Университет Далхаузи (Галифакс, Новая Шотландия, Канада) в 1965 г., защитил диссертацию по ядерной физике в Калифорнийском технологическом институте (США) в 1969 г. Затем на протяжении 13 лет работал в Канадской ядерной лаборатории Чок-Ривер (Chalk River), а с 1982 по 1989 г. занимал должность профессора в Принстонском университете (США). С 1989 г. по настоящее время (с небольшим перерывом) возглавляет Нейтринную обсерваторию в Садбери, будучи профессором (с 2013 г. — почетным) Королевского университета (Канада). Член Королевского общества Канады, Лондонского королевского общества, Американского физического общества, награжден премией Б.М.Понтекорво Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) в 2005 г.

Такааки Каджита (Такааки Каджита) родился в 1959 г. в Хигасимацуяме (префектура Сайтама, Япония), окончил Сайтамский университет в 1981 г., докторскую степень по физике получил в Токийском университете в 1986 г. С 1988 г. работает в Институте исследования космических лу-



Артур Макдональд.



Такааки Каджита.

чей (Institute for Cosmic Ray Research, ICRR) при Токийском университете, где в 1999 г. получил должность полного профессора. Сейчас является директором этого института, оставаясь профессором университета. В 2002 г. совместно с японскими физиками М.Кошиба и Ё.Тоцука был награжден престижной премией В.К.Г.Пановского Американского физического общества.

Что это за частица — нейтрино и чем она привлекает такое пристальное внимание на протяжении многих лет? В чем ее загадка? Почему открытие осцилляций нейтрино имеет такое огромное значение для физики микромира? Крошечная частица, существование которой предсказал В.Паули в 1930 г. и которая впервые была экспериментально обнаружена в реакторном эксперименте Ф.Райнеса и К.Коэна в 1956 г., оказалась необычайно богатой на сюрпризы, и ее изучение принесло много неожиданных результатов.

Сначала немного о самой частице и ее свойствах. Это чисто нейтральная частица, не имеющая электрического заряда, ее спин (внутренний мо-

мент вращения) равен $1/2$. Всего существуют три типа (аромата) нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ , и тау ν_τ . Каждому типу нейтрино соответствует свое антинейтрино и свое лептонное число (не тождественные между собой электронное, мюонное, тау): +1 для нейтрино и -1 для антинейтрино. Нейтрино взаимодействуют со средой только через слабые взаимодействия, что отличает их от других элементарных частиц, которые участвуют еще и в электромагнитных и сильных взаимодействиях. В силу этого длина свободного пробега нейтрино в воде, которая служит активным элементом детектора Super-Kamiokande, может достигать до 100 св. лет. Тем не менее детектирование большого потока столь неуловимых частиц оказывается возможным, потому что нейтрино, хотя и с очень малой вероятностью, все же может вызывать реакции на расстояниях порядка размеров детектора, если объем последнего достаточно велик.

Стандартная модель (СМ) постулирует, что нейтрино являются безмассовыми частицами и не могут менять свой аромат в процессе распространения со скоростью света, т.е. не смешиваются. Индивидуальные и суммарные лептонные числа сохраняются. Наличие осцилляций, заключающееся в переходе одного типа активного нейтрино в другой, означает, что массы частиц не равны нулю, хотя и очень малы, а каждый из трех типов активных нейтрино на самом деле есть линейная суперпозиция массовых состояний ν_1, ν_2, ν_3 , имеющих массы m_1, m_2, m_3 соответственно. Идея о возможности переходов (осцилляций) нейтрино одного типа в другой была выдвинута в 1957 г. советским физиком итальянского происхождения Б.М.Понтекорво, который работал в ОИЯИ. Следует отметить, что в то время было известно только электронное нейтрино, поэтому Понтекорво рассматривал осцилляции нейтрино в антинейтрино по аналогии с явлением перехода нейтральных каонов в нейтральные антикаоны. Эта исключительно плодотворная гипотеза, которая предсказывала существование ненулевой массы нейтрино, привела к рождению нового направления в физике элементарных частиц — поиску, а затем и изучению осцилляций нейтрино. Важной вехой также стала опубликованная в 1968 г. работа В.Н.Грибова и Б.М.Понтекорво, где впервые была сформулирована феноменологическая теория смешивания и осцилляций нейтрино и предсказан возможный дефицит в потоке солнечных электронных нейтрино. Предположение о смешивании лептонов также рассматривала группа японских физиков (З.Маки, М.Накагава и С.Саката) в 1962 г.

Первый шаг к открытию осцилляций был сделан в знаменитом эксперименте Р.Дэвиса, в котором нейтрино, возникающие в результате ядерных реакций внутри Солнца, детектировались при взаимодействии с атомами хлора. Этот метод регистрации солнечных нейтрино предложил

Понтекорво еще в 1946 г. Правда, порог регистрации нейтрино составлял 800 кэВ, что позволяло детектировать только высокоэнергетическую часть спектра солнечных нейтрино, а наиболее интенсивная часть спектра нейтрино от ядерных реакций была ниже порога и не регистрировалась. Установка размещалась под землей на глубине около 1.5 км и представляла собой бак, заполненный раствором четыреххлористого углерода (C_2Cl_4) массой 615 т. Атомы ^{37}Ar , образующиеся в результате захвата нейтрино, извлекались из жидкости путем продувания через нее газообразного гелия. Затем полученные химической очисткой образцы с аргоном помещались в специальный низкофоновый детектор, в котором регистрировался β -распад ^{37}Ar . В ходе измерений, продолжавшихся с конца 1960-х до середины 1990-х годов, было обнаружено, что поток солнечных нейтрино на поверхности Земли составляет примерно $1/3$ от величины, которую предсказывает Солнечная модель для измеряемого в эксперименте диапазона энергий. Этот неожиданный результат породил множество вопросов. Нет ли здесь экспериментальной ошибки? Действительно ли детектор регистрирует солнечные нейтрино? Верна ли Солнечная модель? Или что-то происходит с самим нейтрино? Возможно, это проявление осцилляций нейтрино? Многочисленные проверки показали, что эксперимент проводится корректно и ошибка в измерениях маловероятна.

В 1988 г. на детекторе Kamiokande, имевшем основной целью поиск распада протона и представлявшем собой вертикальную цистерну с чистой водой массой 3000 т, тоже были проведены измерения потока солнечных нейтрино. В этом эксперименте нейтрино из высокоэнергетической части спектра рассеивались на электронах вещества детектора, черенковское излучение которых регистрировалось с помощью 1000 фотоэлектронных умножителей. Уникальная особенность установки — возможность измерять энергию и определять направление прилета регистрируемых нейтрино в реальном времени — позволила однозначно доказать, что детектируемые частицы приходят от Солнца, а не от других источников. Детектор начал набор статистики в 1985 г. и через несколько лет однозначно доказал по угловому распределению событий, что регистрируемые нейтрино приходят от Солнца. Однако их поток составил примерно половину от ожидаемой величины. Таким образом, «дефицит» солнечных нейтрино был подтвержден, но, в отличие от эксперимента Дэвиса, который в то время продолжался, поток составил $1/2$, а не $1/3$ от предсказания Солнечной модели. С другой стороны, физики, занимающиеся Солнечной моделью, также перепроверили свои расчеты и уверились в правильности результатов. Итак, требовалось проверить экспериментальные данные другим методом, который бы позволил детектировать весь спектр солнечных нейтрино. Такой метод был

предложен российским физиком В.А.Кузьминым, еще в 1963 г. рассмотревшим возможность регистрировать солнечные нейтрино с помощью нейтринной мишени из галлия. Основная идея состояла в том, что солнечные электронные нейтрино низкой энергии (порог реакции равен 230 кэВ) поглощаются ядрами галлия-71, в результате чего образуются радиоактивные ядра германия-71, период полураспада которых составляет около 11 дней. Следующий шаг — это тонкая работа экспериментаторов, заключающаяся в извлечении единичных атомов германия из многотонной галлиевой мишени, переведении их в газообразную форму и помещении в пропорциональный счетчик, который регистрирует распады ^{71}Ge . Было выполнено два независимых эксперимента. Российско-американский эксперимент SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) проводился в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН под руководством В.Н.Гаврина. С американской стороны в эксперименте участвовали ученые из Лос-Аламосской национальной лаборатории и Пенсильванского университета. Мишенью служили 50 т металлического галлия. Другой эксперимент, GALLEX (GALLium Experiment), проводился в подземной лаборатории Gran Sasso (Италия) и использовал раствор хлорида галлия, содержащий 30 т Ga в качестве нейтринной мишени. Результаты обоих экспериментов продемонстрировали прекрасное согласие и показали, что поток солнечных нейтрино во всем энергетическом диапазоне составляет около 50% от величины, предсказываемой Солнечной моделью. Таким образом, радиохимические эксперименты, хлорный и галлиевые, дали серьезное указание на то, что, вероятнее всего, «дефицит» солнечных нейтрино объясняется осцилляциями нейтрино, т.е. переходом электронных нейтрино в мюонные и тау во время их путешествия от Солнца к Земле. Но в этих радиохимических экспериментах могли регистрироваться только электронные нейтрино, а для окончательного подтверждения осцилляций было необходимо зарегистрировать мюонные и тау-нейтрино и показать, что полный поток всех трех типов частиц от Солнца действительно соответствует Солнечной модели.

Прежде чем перейти к заключительному акту эпопеи с солнечными нейтрино, необходимо упомянуть очень интересное явление в нейтринной физике — эффект Михеева—Смирнова—Вольфенштейна (МСВ) — переход нейтрино одного типа в другие в среде с переменной плотностью электронов. Если нейтрино движется в среде, в которой присутствуют электроны, оно взаимодействует с ними, причем по-разному, в зависимости от своего типа, что, соответственно, меняет эффективные параметры осцилляций в среде по сравнению с вакуумом. Если электронная плотность плавно изменяется, может происходить резкое усиление осцилляций. Такие условия существуют

внутри Солнца: электронные нейтрино, рожденные в солнечных глубинах, выходят наружу, пройдя через всю толщу солнечного вещества с постепенно уменьшающейся плотностью. Это приводит к резонансному усилению нейтринных осцилляций. Эффект был предсказан теоретически российскими учеными С.П.Михеевым и А.Ю.Смирновым в 1985 г. Они показали, что в веществе с плавно меняющейся плотностью (в частности, на Солнце) может в принципе иметь место практически полный резонансный переход электронных нейтрино в мюонные или тау.

Ключевым экспериментом, который окончательно решил проблему солнечных нейтрино, стал эксперимент SNO, который проводился в подземной лаборатории Садбери в Канаде. В этом детекторе в качестве активного вещества вместо обычной воды, которая «работала» в детекторе Kamiokande, использовалась тяжелая вода. Детектор, заполненный тяжелой водой, мог регистрировать электронные нейтрино благодаря их взаимодействию с нейтроном ядра дейтерия через ток, переносимый заряженными промежуточными бозонами W . В результате этого обмена электронное нейтрино превращается в электрон, а нейтрон — в протон, и происходит развал ядра мишени на два протона, которые можно зарегистрировать. Такое взаимодействие посредством «заряженных токов» не может осуществляться для мюонных и тау-нейтрино от Солнца, так как энергии солнечных нейтрино недостаточно для рождения в этом процессе соответствующих им мюонов и тау-лептонов. Однако данный детектор также способен регистрировать нейтрино любого типа за счет взаимодействия их с ядром дейтерия через нейтральные токи, переносимые промежуточным Z -бозоном. Это взаимодействие одинаково для всех типов нейтрино и может приводить к развалу ядра дейтерия на протон и нейтрон*. Поэтому регистрация таких событий позволяет определить полное число нейтрино, испущенных Солнцем.

Детектор SNO, расположенный под землей на глубине около 2 км, представляет собой сферу диаметром 18 м. Внутренний объем диаметром 12 м заполнен сверхчистой тяжелой водой массой 1000 т и просматривается 9500 фотоумножителей. Общий вид детектора показан на рис. 1.

Детектор начал набирать статистику в 1998 г., а первые результаты были опубликованы в 2001 и 2002 гг. Был обнаружен дефицит электронных нейтрино: поток электронных нейтрино, изме-

* Интересно отметить, что вероятность развала ядра дейтерия за счет взаимодействия с ним нейтрино была рассчитана Ю.С.Папоновым и И.В.Тютиним в 1964 г. на основании гипотезы о существовании нейтральных токов, по форме аналогичных заряженным (еще до создания теории электрослабых взаимодействий). Эти расчеты использовались для первых оценок масштаба экспериментальной установки с тяжелой водой.



Рис.1. Объемное изображение детектора SNO, расположенного в подземной лаборатории Садбери (Канада).

ренный через заряженный ток, составил примерно 35% от предсказания Солнечной модели. В то же время суммарный поток нейтрино от Солнца, измеренный через нейтральные токи и заряженные токи, оказался в полном согласии с предсказанием Солнечной модели (рис.2).

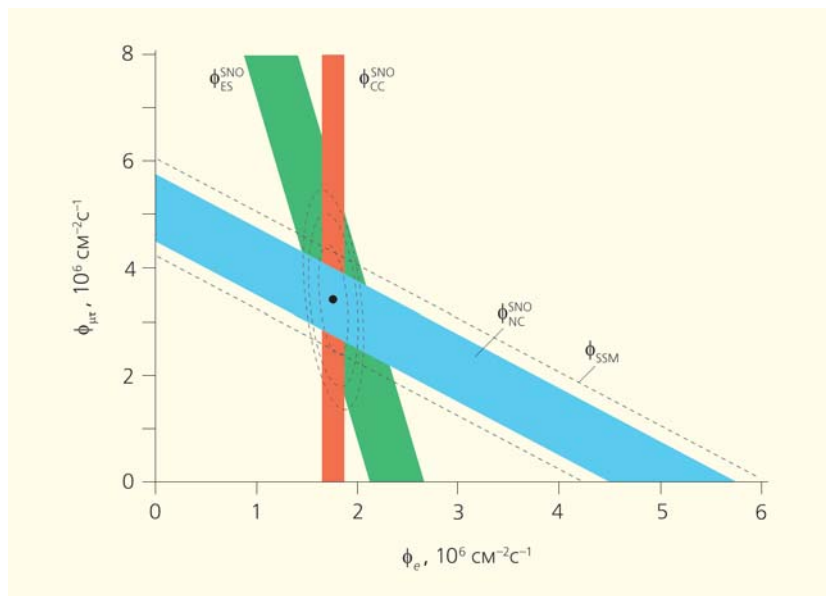


Рис.2. Потоки нейтрино, зарегистрированные SNO: ϕ_e – поток электронных нейтрино, измеренный через заряженный ток; $\phi_{\mu\tau}$ – суммарный поток мюонных и тау-нейтрино, измеренный через нейтральный ток; ϕ_{SSM} – поток нейтрино в Солнечной модели, штриховые полосы ограничивают область предсказаний; голубая полоса показывает поток нейтрино ϕ_{NC}^{SNO} , измеренный через нейтральные токи; ϕ_{ES}^{SNO} – поток нейтрино, измеренный через реакцию рассеяния нейтрино на электронах (голубая полоса); вертикальная коричневая полоса показывает поток нейтрино ϕ_{CC}^{SNO} , измеренный через заряженный ток. Три пунктирных эллипса показывают доверительные интервалы 65%, 95% и 99% для суммарного потока электронных, мюонных и тау-нейтрино.

Таким образом, был подтвержден «дефицит» электронных нейтрино и одновременно однозначно показана справедливость Солнечной модели. Электронные нейтрино, рожденные внутри Солнца, никуда не исчезли бесследно — во время путешествия к Земле они превратились в мюонные и тау-нейтрино. Загадка солнечных нейтрино, которая существовала на протяжении 30 лет и будоражила умы теоретиков и экспериментаторов, была окончательно разгадана. Комбинированный анализ данных, полученных в радиохимических экспериментах и эксперименте SNO, позволил определить так называемые солнечные осцилляционные параметры: разность квадратов масс между первым и вторым массовыми состояниями нейтрино Δm_{21}^2 и угол смешивания θ_{12} , которые характеризуют осцилляции солнечных нейтрино.

Теперь вернемся в Японию. Детектор Kamiokande в начале 1990-х годов кроме «дефицита» солнечных наблюдал и другую аномалию, связанную с атмосферными нейтрино. При прохождении космических лучей через атмосферу Земли рождаются каскады вторичных частиц, в которых присутствуют в большом количестве пионы. Последние распадаются следующим образом: положительные пионы — на положительный мюон и мюонное нейтрино, а отрицательные — на отрицательный мюон и мюонное антинейтрино. Отрицательный мюон, в свою очередь, распадается на электрон, мюонное нейтрино и электронное нейтрино, а положительный мюон — на позитрон, мюонное антинейтрино и электронное нейтрино. В конечном итоге на поверхности Земли присутствует поток мюонных и электронных нейтрино (имеется в виду суммарный поток нейтрино и антинейтрино) в соотношении 2:1 при энергиях ~ 1 ГэВ. Черенковский детектор оказывается идеальным прибором для регист-

рации нейтрино таких энергий. При взаимодействии нейтрино с атомными ядрами через заряженные токи рождается мюон от мюонного нейтрино или электрон от электронного нейтрино. Направление прилета и энергия нейтрино однозначно определяются из измеренной энергии и направления движения рожденных мюонов и электронов. Кроме того, форма кольца черенковского света позволяет идентифицировать тип заряженной частицы: мюон или электрон. После нескольких лет набора статистики детектор Kamiokande обнаружил, что отношение потоков ν_μ/ν_e существенно ниже ожидаемой величины 2. Появилась новая так называемая атмосферная аномалия, для объяснения которой было выдвинуто несколько гипотез, включая осцилляции мюонных нейтрино. Для разрешения спорной ситуации требовались более тщательные измерения, и в первую очередь большее число нейтринных событий. И такие измерения были выполнены на новом детекторе Super-Kamiokande.

Детектор Super-Kamiokande, относящийся ко второму поколению водных черенковских детекторов нейтрино, представляет собой гигантскую вертикальную цистерну высотой 42 м и диаметром 39 м, заполненную чистой водой массой уже в 50 кт. Внутренний объем детектора просматривается 11 тыс. фотоумножителей (рис.3).

Детектор регистрирует нейтрино в диапазоне энергий от 4.5 МэВ до 1 ТэВ и определяет направление их прилета (как и детектор Kamiokande), т.е. различает нейтрино, идущие сверху из атмосферы и снизу сквозь всю Землю. Атмосферные нейтрино рождаются высоко в атмосфере; ожидалось, что их поток на поверхности планеты должен быть изотропным, т.е. не зависящим от направления. Иначе говоря, поток нейтрино, летящих снизу вверх, должен быть равен потоку нейтрино, которые летят сверху вниз. Набор статистики был начат в 1996 г., и первый результат был доложен Т.Каджита на конференции по нейтринной физике НЕЙТРИНО'98 в 1998 г. Результат, который демонстрирует осцилляции нейтрино, показан на рис.4. Как видно из этого рисунка, поток электронных нейтрино не зависит от их направления, а поток мюонных нейтрино, летящих сверху вниз, существенно превосходит поток таких же нейтрино, но прошедших сквозь Землю и летящих снизу вверх. Таким образом, мюонные нейтрино, проходящие около 15 тыс. км снизу вверх, исчезают на этом пути, в то время как электронные нейтрино полностью сохраняются. Мюонные нейтрино, рожденные в атмосфере над Super-Kamiokande, пролетают несколько десятков километров, и их поток соответствует ожидаемому. Поскольку увеличение потока электронных нейтрино не наблюдается, можно сделать вывод, что мюонные нейтрино осциллируют в тау-нейтрино. Этот результат был впоследствии подтвержден ускорительными экспериментами с длинной базой

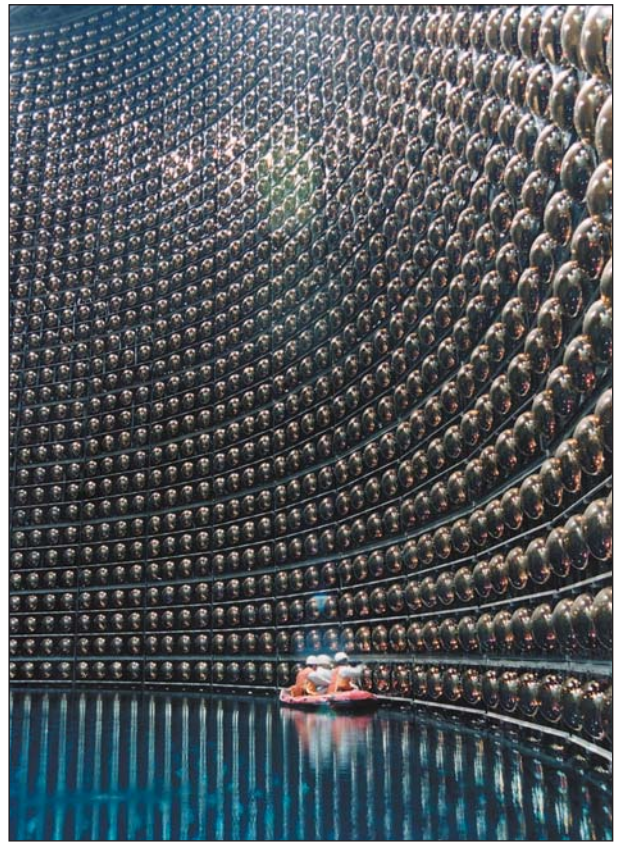


Рис.3. Детектор Super-Kamiokande (Япония).

К2К (Япония), MINOS (США) и T2K (Япония). В результате анализа их данных были определены так называемые «атмосферные параметры» осцилляций: разность квадратов масс между вторым и третьим массовыми состояниями Δm_{23}^2 и угол смешивания Θ_{23} , которые характеризуют осцилляции атмосферных нейтрино. Совсем недавно прямое наблюдение осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино было обнаружено в эксперименте OPERA. Нейтринный детектор этого эксперимента, установленный в лаборатории Gran Sasso, использовал нейтринный пучок из ЦЕРНа.

Подведем промежуточные итоги. Длительные исследования солнечных и атмосферных нейтрино привели к неожиданному результату — открытию осцилляций нейтрино. Это фундаментальный результат, в свою очередь, означал, что нейтрино имеют отличную от нуля массу, могут переходить друг в друга, т.е. смешиваются, и лептонные числа не сохраняются. Наличие у нейтрино очень малой массы трудно объяснить на основе Стандартной модели элементарных частиц. Поэтому открытие осцилляций нейтрино, возможно, указывает на существование «новой физики» вне рамок СМ.

После открытия осцилляций нейтринная физика развивалась стремительно. Фактически дальнейшее исследование осцилляций в экспериментах с солнечными, атмосферными, реакторными

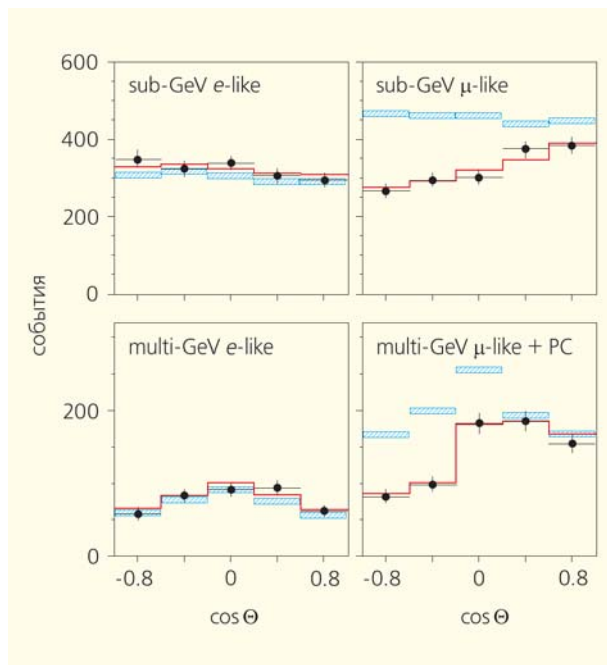


Рис.4 Интенсивность зарегистрированных электронных и мюонных событий в зависимости от угла по отношению к зениту для двух классов событий: sub-GeV с энергией <1.33 ГэВ и multi-GeV с энергией >1.33 ГэВ. Заштрихованные прямоугольники показывают ожидаемое распределение событий в случае отсутствия осцилляций. Значение $\cos\Theta = 1$ соответствует нейтрину, летящим сверху вниз, а события с полетом снизу вверх имеют значение $\cos\Theta = -1$. События, в которых в результате взаимодействия нейтрино в детекторе регистрируется электрон, обозначены как e-like, а события с мюоном — μ-like. PC относится к событиям, в которых энергии электрона или мюона регистрируется не полностью.

и ускорительными нейтрино стало основным направлением исследований в этой области. Реакторный эксперимент KamLand (Япония) определил значения солнечных осцилляционных параметров, и его результаты оказались в прекрасном согласии с результатами эксперимента SNO. В 2011–2012 гг. ускорительный эксперимент T2K и реакторные эксперименты Daya Bay (Китай), RENO (Корея) и DoubleChooz (Франция) позволили измерить угол смешивания между первым и третьим массовыми состояниями θ_{13} . В 2014 г. эксперимент T2K дал первое указание на существование CP-нарушения (т.е. нарушения зарядово-пространственной симметрии) в нейтринных осцилляциях.

Каково направление дальнейших осцилляционных исследований и какие результаты можно ожидать в ближайшем будущем? Прежде всего фундаментален тот результат, что все три угла матрицы Понтекорво–Маки–Накагава–Саката, которая описывает смешивание нейтрино, не равны нулю и близки по величине. Матрица смешивания нейтрино, как и матрица Кабиббо–Кобая-

ши–Маскава, описывающая смешивание кварков, имеет структуру 3×3 и может включать в себя комплексные элементы, т.е. CP может также нарушаться и в лептонном секторе. Почему это важно? Как известно, в сегодняшней Вселенной отсутствует антивещество (есть барионы, но нет антибарионов), однако мы не знаем, что было источником барионной асимметрии в ранней Вселенной, следствием которой и стало отсутствие антивещества. Как известно, имеющегося CP-нарушение в кварковом секторе недостаточно для объяснения барионной асимметрии Вселенной. Вполне вероятно, что эта загадка может быть решена с помощью нейтрино, если в нейтринных осцилляциях будет обнаружено CP-нарушение. Хотя нет прямой связи между возможным CP-нарушением при низких энергиях и асимметрией в распадах тяжелых нейтрино в ранней Вселенной, элегантно объяснение малой массы нейтрино через так называемый механизм «качелей», который связывает легкие активные нейтрино с тяжелыми нейтрино с массами до 10^{15} ГэВ, вполне вероятно связывает между собой эти асимметрии. Другая важная проблема, которая может быть решена в осцилляционных экспериментах, — иерархия масс нейтрино. Экспериментальные результаты однозначно показывают, что $m_2 > m_1$. Однако неизвестно, какой вариант иерархии масс нейтрино реализуется в природе: нормальный ($m_3 > m_2$) или инверсный ($m_3 < m_2$). Решение этого вопроса важно для определения абсолютной шкалы масс нейтрино, а также для экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада. В случае инверсной иерархии масс чувствительность будущих экспериментов позволяет зарегистрировать безнейтринный двойной бета-распад и, соответственно, однозначно доказать, что нейтрино являются майорановскими частицами. Мы также можем ожидать ответа на вопрос о существовании стерильных нейтрино — частиц, которые никак не взаимодействуют с веществом, но могут смешиваться с активными нейтрино. Таких частиц нет в Стандартной модели, но есть ряд экспериментальных указаний на их существование.

Пока физикам удалось определить только некоторые свойства нейтрино — самой загадочной частицы микромира, существование которой было предсказано 85 лет назад. В будущем нас ждут новые результаты и новые сюрпризы. Можно смело утверждать, что Нобелевская премия, которую получили Макдональд и Каджита, далеко не последняя за исследования в физике нейтрино.

© Академик С.С.Герштейн

Институт физики высоких энергий

Протвино

© Ю.Г.Куденко,

доктор физико-математических наук

Институт ядерных исследований РАН

Москва

По химии — Т.Линдаль П.Модрич и А.Санджар

Нобелевская премия по химии 2015 г. присуждена Томасу Линдалью (Великобритания), Полу Модричу (США) и Азису Санджару (США) за исследования механизмов репарации ДНК. Премия подводит итоги 70-летнего развития этой области молекулярной биологии и биохимии, тесно связанной с фундаментальными аспектами мутагенеза и канцерогенеза. Как и во многих случаях в последние годы, Нобелевская премия за, казалось бы, биологические исследования присуждена в области химии, что лишней раз показывает, насколько прочно нынешние представления о живых системах основаны на понимании физико-химических законов функционирования и взаимодействия молекул.

Томас Линдаль (Tomas Lindahl) родился 28 января 1938 г. в Стокгольме (Швеция). В 1967-м получил степень доктора философии, а в 1970 г. — доктора медицины в стокгольмском Каролинском институте. После стажировки в США в Принстонском (1964—1967) и Рокфеллеровском (1967—1969) университетах работал на кафедре медицинской биохимии Гётеборгского университета (Швеция), а затем переехал в Великобританию. Там с 1981 г. был научным сотрудником Имперского фонда онкологических исследований (Лондон), а в 1986-м стал первым директором Института Клэр-Холл, учрежденного Британским обществом исследований рака. Линдаль возглавлял этот институт до 2005 г., затем заведовал одной из его лабораторий, а после выхода на пенсию стал почетным профессором Института Фрэнсиса Крика, в который с 2015 г. входит Институт Клэр-Холл. За

свои заслуги Линдаль выбран членом Лондонского королевского общества (1988), Академии медицинских наук Великобритании (1998) и Норвежской академии наук (2010); награжден Королевской медалью (2007), премией Французского института здоровья и медицинских исследований (2008) и медалью Копли (2010).

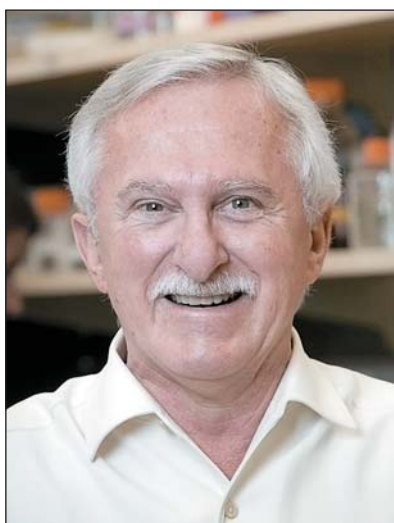
Пол Модрич (Paul L. Modrich), гражданин США, родился в 1946 г. в г.Ратоне (США) в семье с хорватско-черногорскими корнями. В 1968 г. окончил Массачусетский технологический институт, в 1973 г. получил докторскую степень в Стэнфордском университете. В настоящее время — профессор Джеймса Б.Дьюка по биохимии* Университета Дьюка (США) и сотрудник Медицинского института Говарда Хьюза. Член Национальной академии наук США (1993), Академии медицинских наук США (2003), Американской академии искусств и наук (2004). За исследования в области рака награжден премиями Мотта (1996) и Пасароу (1998), а также почетной медалью Американского онкологического общества (2005).

Азиз Санджар (Aziz Sancar) имеет гражданство Турции и США. Он родился в 1946 г. в бедной многодетной семье в провинции Мардин на юго-востоке Турции. Окончив медицинский факультет Стамбульского университета в 1969 г., Санджар перебрался в США, где в 1977 г. получил степень доктора философии в Университете Техаса в Дал-

* Профессор Джеймса Б.Дьюка (James B. Duke professor) — титул, которым Университет Дьюка удостоивает считанное число ученых за выдающиеся научные достижения.



Томас Линдаль.



Пол Модрич.



Азиз Санджар.

ласе. С 1982 г. и по сей день работает в Университете Северной Каролины в Чапел-Хилле. Член Национальной академии наук США (2005), Американской академии искусств и наук (2004), Турецкой академии наук (2006), а также Всемирной академии наук, основанной нобелевским лауреатом Абдусом Саламом и объединяющей выдающихся ученых из стран «третьего мира». Лауреат премии Совета Турции по научно-техническим исследованиям (1997), турецкой премии Коча (2007) и премии Валли Американского общества биохимии и молекулярной биологии (2015).

Томас Линдаль в 1993 г. в одной из своих самых цитируемых статей [1] отметил, что в каждой человеческой клетке ежедневно происходит несколько десятков тысяч повреждений ДНК самой разной химической природы. Большая часть их вызвана спонтанным гидролизом ДНК и активными формами кислорода, возникающими при аэробном метаболизме. С другой стороны, сама структура ДНК, в которой информация продублирована в двух комплементарных цепях, подсказывает: если с одной цепью что-то случится, ситуацию можно исправить, используя информацию в другой.

В 1930-х годах в науке уже прочно закрепилось понятие о мутациях и о факторах, повышающих их частоту в тысячи раз. Еще в 1925 г. Г.А.Надсон и Г.С.Филиппов, работавшие в ленинградском Государственном рентгенологическом и радиологическом институте, открыли мутагенез при радиоактивном облучении плесневых грибов *Mucor*. Через год аналогичные результаты получил американский генетик Г.Мёллер в экспериментах с дрозофилой. В 1941 г. А.Холлендер с сотрудниками обнаружили мутагенное действие ультрафиолетового излучения. Вскоре после этого (1946) независимо друг от друга советский генетик И.А.Рапопорт и работавшая в Эдинбурге Ш.Ауэрбах открыли первые химические мутагены. После классических работ американских генетиков Дж.Бидла и Э.Тейтема, изучавших мутации у хлебной плесени, стало понятно, что искусственный мутагенез дает ценный инструмент для получения новых штаммов микроорганизмов*.

Вскоре после Второй мировой войны американский микробиолог А.Кельнер (1912—1994) и независимо от него, буквально через несколько недель, итало-американский вирусолог Р.Дульбекко** открыли репарацию ДНК, причем разными путями. Кельнер работал над проблемой увеличения продуктивности штаммов стрептомицетов,

производящих антибиотики, и использовал ультрафиолетовое излучение в качестве мутагена. Довольно долго ему не удавалось подобрать дозу облучения, необходимую для оптимального соотношения выживания и мутагенеза бактерий. Тщательно проанализировав условия роста культур, исследователь обнаружил, что лучше выживали те, которые инкубировались в прозрачных колбах, обращенных к окну, через которое проникал дневной свет. Это привело Кельнера к выводу, что свет солнечного спектра запускает в клетках бактерий процесс, устраняющий последствия облучения ультрафиолетовым светом. Позже процесс назвали *фотореактивацией*.

К таким же выводам пришел Дульбекко, изучая размножение бактериофагов в клетках после ультрафиолетового облучения. В последующих работах выяснилось, что фотореактивация была первым примером репарации ДНК — восстановления ее корретной химической структуры после повреждения [2]. Ультрафиолетовое излучение вызывает образование в ДНК циклобутановых пиримидиновых димеров из динуклеотидов ТТ, а в ходе фотореактивации фермент фотолиаза поглощает фотоны с длиной волны 400—500 нм (конкретная длина зависит от хромофора, разного для разных видов фотолиаз) и использует эту энергию для расщепления димера на два тиминового основания [3].

Механизм действия этого фермента тщательно изучил другой нобелевский лауреат 2015 г., А.Санджар. Сам фермент — фотолиаза — был открыт в конце 1950-х годов С.Рупертом, в лабораторию которого и попал молодой специалист Санджар. Там он впервые клонировал ген фотолиазы и выделил белок в рекомбинантном виде, что позволило всесторонне исследовать его свойства. Помимо этого Санджар подробно изучил механизм *эксцизионной* (от англ. excision — вырезание) *репарации нуклеотидов* (рис.1).

Ранее этот путь был известен под названием «темновая репарация», поскольку исправлял повреждения, вызванные ультрафиолетом без освещения видимым светом, т.е. без участия фотолиазы. Темновую репарацию открыли в начале 1960-х годов Р.Сетлоу, П.Ховард-Флэндерс и Ф.Ханаволт. К началу работ Санджара были известны три отвечающие за нее гена — *uvrA*, *uvrB* и *uvrC* (от англ. UV-resistant). Санджар клонировал эти гены, выделил кодируемые ими белки и показал, что они образуют динамический комплекс. В поиске дефекта в ДНК участвует комплекс белков UvrA₂B. Он связывается с измененной ДНК, содержащей циклобутановые димеры или другие повреждения, сильно искажающие ее структуру, так называемые аддукты, образованные многими метаболитами ксенобиотиков (бензопирена, нитрозаминов табачного дыма, афлатоксинов и т.п.). Используя энергию, выделяющуюся при гидролизе АТФ, комплекс UvrA₂B распадается, и на дефектном участке остается только белок UvrB. Он привлекает к себе мо-

* Нобелевская премия по медицине 1958 г. присуждена Дж.Бидлу, Э.Тейтему и Дж.Ледербергу за исследования генетики микроорганизмов.

** Дульбекко Р., итальянский и американский вирусолог, лауреат Нобелевской премии по физиологии и медицине 1975 г. (совместно с Д.Балтимором и Х.Темином) «за открытия, касающиеся взаимодействия между онкогенными вирусами и генетическим материалом клетки».

лекулу белка UvrC и, связываясь с ней, приобретает свойства эндонуклеазы. Она и расщепляет ДНК: сначала на расстоянии 4–5 нуклеотидов с 3'-стороны, а затем на расстоянии 7–8 нуклеотидов с 5'-стороны от повреждения. После этого ДНК-геликаза UvrD вытесняет вырезанный фрагмент, а другой фермент, ДНК-полимераза I, синтезирует недостающий участок ДНК, заполняя образовавшуюся брешь [2].

Такая эксцизионная репарация нуклеотидов играет главную роль в защите человека от ультрафиолетового облучения, поскольку фермента фотолиазы в наших клетках нет, он сохранился только у сумчатых млекопитающих, а у остальных имеются лишь гомологичные ему белки. Эти светочувствительные белки, криптохромы, участвуют в регуляции суточных ритмов (их также открыл Санджар). У эукариот есть два варианта эксцизионной репарации: глобальная геномная, удаляющая повреждение из любых участков генома, и сопряженная с транскрипцией, устраняющая только дефектные изменения в транскрибируемых участках ДНК. В первом варианте комплекс белков XPC и RAD23B узнает повреждение (в узнавании циклобутановых димеров также участвует комплекс белков DDR1 и XPE), затем на этой затравке собирается прединцизионный (от англ. incision — надрезание) комплекс, состоящий из белков XPA, RPA, XPB и XPD (последние два входят в состав фактора TFIIH, который также участвует в транскрипции) и расплавляющий спираль ДНК, потом присоединяется эндонуклеаза XPG. Она разрывает поврежденный участок ДНК с 3'-стороны, а эндонуклеаза ERCC1/XPF — с 5'-стороны от повреждения, вырезая фрагмент из 27–29 нуклеотидов. Образовавшаяся брешь застраивается при помощи ДНК-полимераз δ или ϵ . Во втором варианте эксцизионной репарации сенсором повреждений служит РНК-полимераза II, синтезирующая мРНК. Если она при этом встречается с повреждением и не может включить напротив него очередной рибонуклеотид, то фактор TFIIH, который входит в состав элонгационного комплекса, при участии белков CSA и CSB привлекает эндонуклеазы XPG и ERCC1/XPF. После паузы, связанной с репарацией, транскрипция возобновляется [2, 4].

Мутации генов, участвующих в эксцизионной репарации нуклеотидов у человека, вызывают редко встречающиеся в популяции тяжелые наследственные заболевания, связанные, как правило, с повышенной чувствительностью к злокачественным новообразованиям и с нейродегенеративными проявлениями. Из этих болезней лучше всего изучена пигментная ксеродерма, вызываемая отсутствием любого из белков XPA—XPG либо белка XPV. Последний представляет собой специализированную ДНК-полимеразу, способную синтезировать ДНК на поврежденных участках. У больных пигментной ксеродермой наблюдаются ярко выраженные ожоги, появляющиеся даже после непродолжительного пребывания на солнце. С возрастом они переходят в солнечный кератоз, что сопровождается развитием рака кожи к концу первого десятилетия жизни. Интересно, что разные мутации в некоторых генах XP могут приводить к совершенно разным фенотипическим последствиям за счет того, что кодируемые этими генами белки участвуют не только в репарации, но и в других молекулярно-биологических процессах. Например, некоторые мутации в гене XPD вызывают не пигментную ксеродерму, а синдром Кокейна. Для этого заболевания характерны карликовость и истощение в первые годы жизни, происходит демиелинизация нейронов в центральной нервной системе и развивается склероз сосудов головного мозга. Другие мутации в том же самом гене XPD вызывают трихотриодистрофию, при которой репарация ДНК происходит практически нормально. Однако в организме нарушается синтез

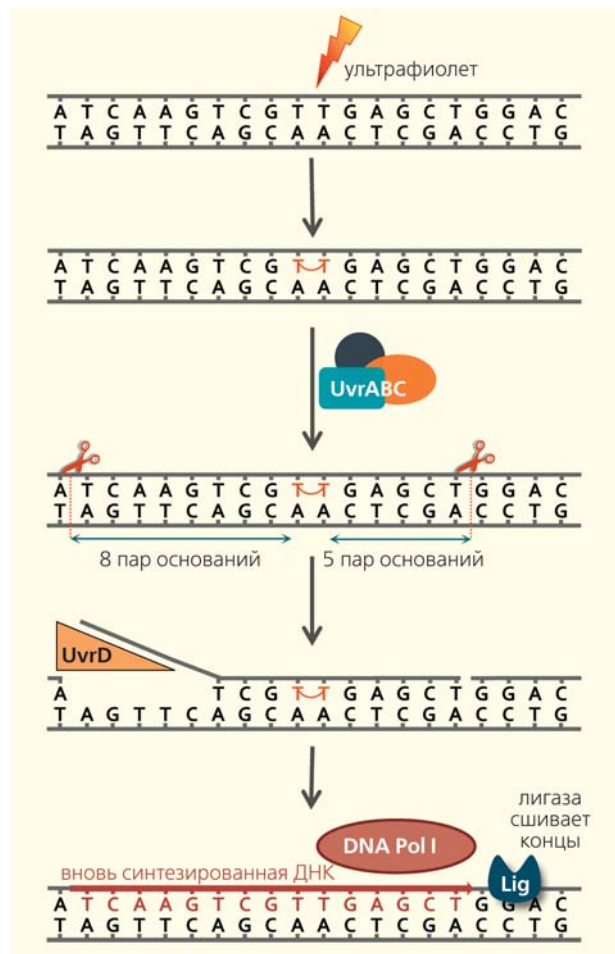


Рис.1. Схема эксцизионной репарации нуклеотидов на примере UvrABC-зависимой репарации *E. coli*. Сверху вниз: повреждение ДНК ультрафиолетовым излучением, узнавание тиминового димера и расщепление ДНК белками UvrA, UvrB и UvrC, вытеснение цепи ДНК-геликазой UvrD, застраивание бреши ДНК-полимеразой I (DNA Pol I) и лигирование.

должительного пребывания на солнце. С возрастом они переходят в солнечный кератоз, что сопровождается развитием рака кожи к концу первого десятилетия жизни. Интересно, что разные мутации в некоторых генах XP могут приводить к совершенно разным фенотипическим последствиям за счет того, что кодируемые этими генами белки участвуют не только в репарации, но и в других молекулярно-биологических процессах. Например, некоторые мутации в гене XPD вызывают не пигментную ксеродерму, а синдром Кокейна. Для этого заболевания характерны карликовость и истощение в первые годы жизни, происходит демиелинизация нейронов в центральной нервной системе и развивается склероз сосудов головного мозга. Другие мутации в том же самом гене XPD вызывают трихотриодистрофию, при которой репарация ДНК происходит практически нормально. Однако в организме нарушается синтез

кератинов, что приводит к ломкости волос, ихтиозу и задержке умственного развития. Наконец, есть мутации, при которых сочетаются симптомы пигментной ксеродермы и синдрома Кокейна, и такие, которые просто вызывают повышенную чувствительность к солнечному свету без долговременных последствий [4].

Основные работы третьего нобелевского лауреата, П.Модрича связаны с *мисматч-репарацией* (англ. mismatch — не соответствовать, не подходить друг другу), или *репарацией гетеродуплексов* (рис.2). Эта система отвечает за исправление ошибок ДНК-полимераз, если те включают в ДНК при синтезе нуклеотиды, некомплементарные матрице, или образуют небольшие петли при проскальзывании матричной или синтезируемой цепи. Частота таких ошибок *in vivo* составляет около 1 на 10^7 включенных нуклеотидов. Главная проблема при их исправлении — не в том, как удалить неправильный нуклеотид, а как узнать его. Ведь химическая структура поврежденных звеньев ДНК отличается от нормальной, что и может служить для распознавания повреждения. Но если оба нуклеотида нормальные, а друг другу не соответствуют,

то как узнать, какой из них был в исходной ДНК, а какой включен в дочернюю цепь неверно?

Модрич обнаружил, что у *E.coli* эта проблема решается с помощью маркировки материнских цепей ДНК остатками 6-метиладенина. Фермент ДНК-метилаза Dam метилирует основания аденина в палиндромной последовательности -GATC-, которая встречается в ДНК довольно часто, в среднем 1 раз на 250 нуклеотидов. При синтезе ДНК в цепь, комплементарную этой последовательности, включается неметилированный аденин, и в течение нескольких минут после репликации ДНК остается полуметилированной, т.е. несет 6-метиладенин в исходной цепи и аденин в новой цепи. В это время с полуметилированными последовательностями -GATC- связывается эндонуклеаза MutH, а с гетеродуплексом (неправильной парой нуклеотидов или небольшой петлей размером до шести нуклеотидов) — сенсорный белок-димер MutS₂. После узнавания гетеродуплекса MutS₂ приобретает способность взаимодействовать с MutH с участием еще одного члена системы мисматч-репарации, димерного белка MutL₂. Это взаимодействие активирует эндонуклеазную функцию белка MutH, и он расщепляет новую цепь ДНК в неметилированной последовательности -GATC-. Участок ДНК между разрывом и гетеродуплексом гидролизуют экзонуклеазы, и образовавшаяся брешь застраивается ДНК-полимеразой III [5]. За счет действия системы мисматч-репарации частота ошибок репликации снижается примерно в 1000 раз. Модрич стал первым, кто смог реконструировать эту сравнительно простую систему из отдельных ферментов. Во многом это и предопределило его успех в расшифровке механизма мисматч-репарации.

Исследование мисматч-репарации в других организмах, проведенное не только в лаборатории Модрича, показало, что дискриминация родительской и дочерней цепей, обусловленная метилированием GATC-последовательностей, не универсальна, а свойственна лишь узкому набору видов протеобактерий. У большинства же бактерий и у всех эукариот маркером дочерней цепи, по всей вероятности, служат одноцепочечные разрывы, возникающие в ней в ходе репликации. С таким механизмом согласуется и отсутствие у большинства видов эндонуклеазы MutH. Напротив, гомологи белков MutS и MutL обнаружены почти во всех живых организмах. Так, у человека есть три гомолога MutS (белки MSH2, MSH3 и MSH6) и четыре гомолога MutL (белки MLH1, MLH3, PMS1 и PMS2). В разных комбинациях они нужны для восстановления различных типов гетеродуплексов, а также для участия в генной конверсии при мейозе, когда в местах несоответствия последовательностей хромосом от разных родителей образуются гетеродуплексы. Мутации в генах мисматч-репарации у человека вызывают развитие наследственного неполипозного рака толстого кишечника (синд-

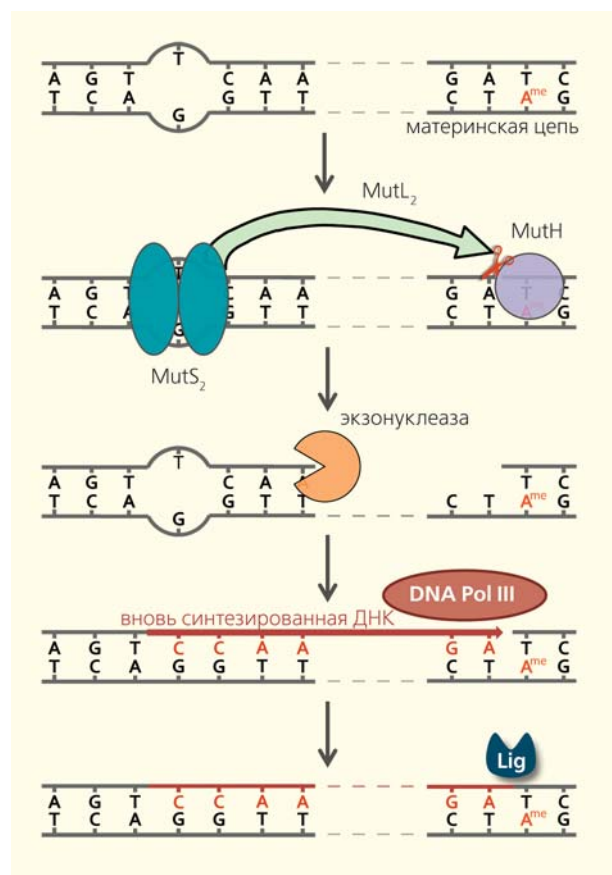


Рис.2. Схема метилзависимой мисматч-репарации у *E.coli*. Узнавание гетеродуплекса и расщепление ДНК белками MutS, MutL и MutH, деградация цепи экзонуклеазами, застраивание бреши ДНК-полимеразой III (DNA Pol III) и лигирование.

ром Линча): риск его возникновения у носителей мутантных аллелей — около 80% [6].

Наконец, система *эксцизионной репарации оснований* (рис.3) устраняет так называемые малые, не искажающие структуру ДНК повреждения, составляющие около 90% всех дефектов, возникающих в клетках: продукты гидролиза ДНК, окисления, дезаминирования, метилирования и т.п. Эта система *эксцизионной репарации* весьма консервативна — основные ее элементы и у эукариот, и у бактерий одни и те же. Она была открыта в начале 1970-х годов Линдалем, изучавшим в то время химическую реактивность ДНК. По словам самого исследователя, к этому открытию его подтолкнула переведенная на английский язык монография Н.К.Кочеткова с соавторами «Органическая химия нуклеиновых кислот» [7], прочитав которую, он задумался о возможности протекания описанных там реакций в живой клетке. В 1972 г. Линдаль показал, что в водной среде ДНК легко теряет пуриновые основания с образованием апурино-апиримидиновых сайтов (АП-сайтов), которые также нестабильны, и ДНК быстро разрывается по этим местам. Через два года почти одновременно вышли две его статьи: первая с описанием, как цитозин в ДНК в результате гидролитического дезаминирования превращается в урацил (в норме не встречающийся в ДНК), а вторая — о том, как выделенный из *E.coli* фермент урацил-ДНК-гликозилаза удаляет из ДНК урацил в виде свободного основания [8]. Остальные участники эксцизионной репарации были открыты в течение следующих 10–15 лет, причем многие из них — также в лаборатории Линдаля.

ДНК-гликозилазы — это ферменты, которые узнают поврежденные основания и удаляют их, инициируя тем самым эксцизионную репарацию. В большинстве организмов таких белков несколько: одни удаляют урацил, другие — метилированные пуриновые основания, третьи — окисленные пиримидины и т.д. После ликвидации поврежден-

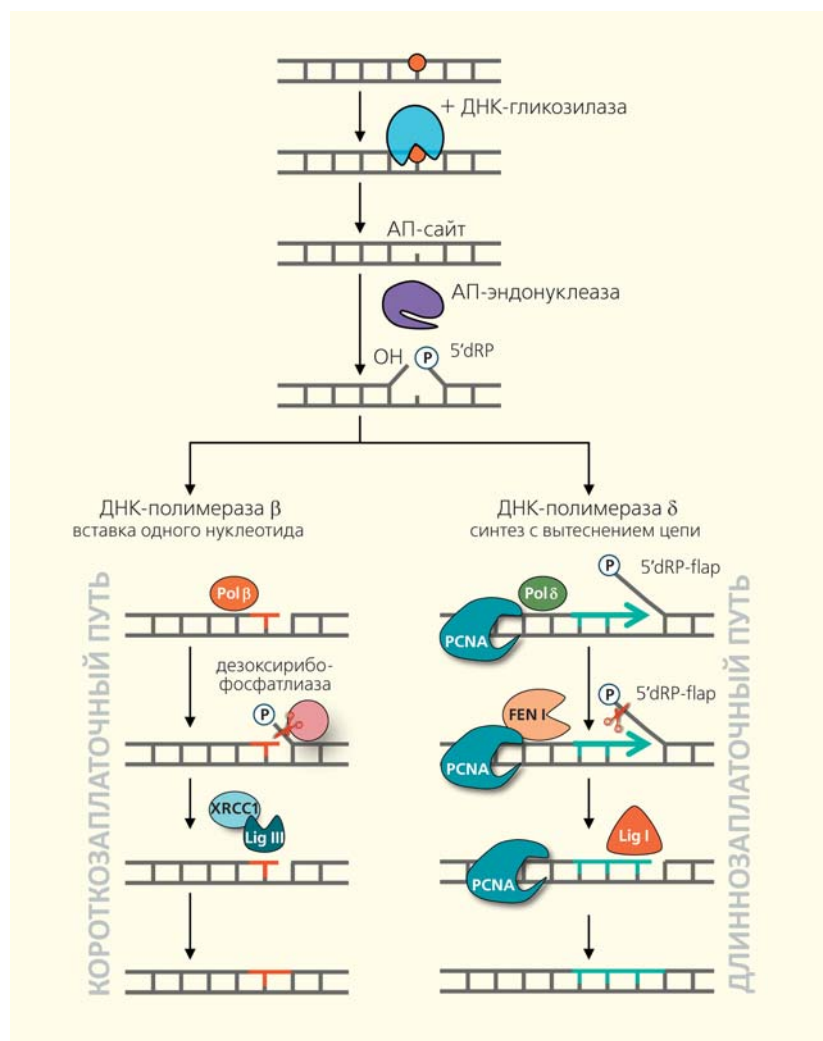


Рис.3. Схема эксцизионной репарации оснований у высших эукариот. Вверху — общие стадии узнавания и удаления поврежденного основания ДНК-гликозилазами и гидролиз образовавшегося АП-сайта АП-эндонуклеазами. Ниже — два основных пути эксцизионной репарации оснований: короткозаплаточный — включение одного нуклеотида ДНК-полимеразой β (Pol β), удаление остатка дезоксирибозы дезоксирибофосфатлиазой и лигирование (Lig III), и длиннозаплаточный — включение нескольких нуклеотидов ДНК-полимеразой δ (Pol δ), удаление вытесненной цепи флэп-эндонуклеазой (FEN I) и лигирование (Lig I). В эксцизионной репарации также участвует ряд важных вспомогательных факторов: например, XRCC1 (от англ. X-Ray Repair Cross-Complementing group 1) служит адаптером для сборки репаративных комплексов, а PCNA (от англ. Proliferating Cell Nuclear Antigen) — усилителем функций Pol δ (три молекулы PCNA образуют кольцевой тример, который представляет собой перемещающуюся по ДНК «скользящую скрепку», удерживающую Pol δ в ходе полимеризации на матрице и обеспечивающую высокопроцессивный синтез ДНК).

ного основания в ДНК остается АП-сайт, который гидролизует следующим участником репарации, АП-эндонуклеазой. Затем процесс расходится на две ветви. При так называемой короткозаплаточной репарации ДНК-полимераза встраивает один неповрежденный нуклеотид, дезоксирибофосфатлиаза убирает остаток дезоксирибозы, и получен-

ный разрыв соединяется лигазой. При длиннозаплаточной репарации ДНК-полимераза встраивает несколько нуклеотидов, вытесняя небольшой участок впереди лежащей ДНК, который затем удаляется ферментом флэп-эндонуклеазой, и образовавшийся разрыв сшивается.

Последствия инактивации системы эксцизионной репарации оснований вполне сообразны тому, что она исправляет большую часть повреждений ДНК. При выходе из строя генов, кодирующих общие для всех субстратов этой системы ферменты (АП-эндонуклеазу или репаративную ДНК-полимеразу β), эмбрионы млекопитающих гибнут на ранних стадиях развития из-за проблем с дифференцировкой тканей. Мутации в генах ДНК-гликозилаз, как правило, повышают риск онкологических заболеваний, иммунодефицитов и дефектов развития нервной системы. В последние годы выяснилось, что ферментативная система эксцизионной репарации оснований используется и в других важных клеточных процессах с направленным и регулируемым повреждением ДНК — в активном эпигенетическом деметилировании, соматической гипермутации, переключении класса антител в В-лимфоцитах и инактивации вирусной ДНК внутри клеток [9]. С другой стороны, такая репарация в раковых клетках снижает эффективность действия многих противоопухолевых средств, и в 2014 г. первый ее ингибитор был одобрен в США и странах Европейского Союза для лечения рака яичника.

Томас Линдаль, помимо своего собственного вклада в изучение механизмов репарации ДНК, известен как «научный отец» многих ученых, задающих сейчас тон в этой области молекулярной биологии. Они были постдоками и начинающими исследователями в его лаборатории в Клэр-Холле, которая сейчас входит в состав лондонского Института Фрэнсиса Крика. Наверное, Линдаль —

единственный из трех лауреатов 2015 г., присуждение премии которому не вызывает ни малейших вопросов.

Модрич и Санджар, несмотря на свои бесспорно выдающиеся работы, были не единственными, кто заложили основы понимания путей репарации, за которые они удостоились награды. До сих пор живы и активно работают и Филип Ханаволт — один из первооткрывателей эксцизионной репарации нуклеотидов и безусловный первооткрыватель ее глобальной геномной ветви, и Джеймс Кливер, открывший дефект репарации ДНК у больных пигментной ксеродермой, и Мэтью Мезельсон, впервые предложивший идею метилзависимой мисматч-репарации, и Робин Холлидэй, обнаруживший и объяснивший генную конверсию.

Кроме того, репарация ДНК не исчерпывается перечисленными путями — существуют, например, и рекомбинационная репарация, и воссоединение негомологичных концов, участвующих в ликвидации последствий двуцепочечных разрывов в ДНК. Не далее как в сентябре 2015 г. Эвелин Виткин и Стивен Элледж из США получили Ласкеровскую премию (вторую по престижности после Нобелевской в мире биомедицины) за исследование механизмов клеточного ответа на повреждение ДНК, т.е. процессов, протекающих между поломкой ДНК и началом репарации. Хочется надеяться, что нынешняя Нобелевская премия даст дополнительный толчок к изучению интереснейшего набора молекулярных процессов, помогающих сохранять в целостности наш генетический материал.

© **Жарков Д.О.**,

доктор биологических наук,

© **Торгашева Н.А.**

Институт химической биологии

и фундаментальной медицины СО РАН,

Новосибирский государственный университет

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 14-24-00093).

Литература

1. *Lindahl T.* Instability and decay of the primary structure of DNA // *Nature*. 1993. V.362. P.709—715. doi:10.1038/362709a0
2. *Friedberg E.C., Walker G.C., Siede W. et al.* DNA repair and mutagenesis. Washington, 2006.
3. *Sancar A.* Structure and function of photolyase and in vivo enzymology: 50th anniversary // *J. Biol. Chem.* 2008. V.283. P.32153—32157. doi:10.1074/jbc.R800052200
4. *Marteijn J.A., Lans H., Vermeulen W., Hoeijmakers J.H.* Understanding nucleotide excision repair and its roles in cancer and ageing // *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 2014. V.15. P.465—481. doi:10.1038/nrm3822
5. *Iyer R.R., Pluciennik A., Burdett V., Modrich P.L.* DNA mismatch repair: Functions and mechanisms // *Chem. Rev.* 2006. V.106. P.302—323. doi:10.1021/cr0404794
6. *Kunkel T.A., Erie D.A.* DNA mismatch repair // *Annu. Rev. Biochem.* 2005. V.74. P.681—710. doi:10.1146/annurev.biochem.74.082803.133243
7. *Кочетков Н.К., Будовский Э.И., Свердлов Р.Д. и др.* Органическая химия нуклеиновых кислот. М., 1970.
8. *Lindahl T.* An N-glycosidase from *Escherichia coli* that releases free uracil from DNA containing deaminated cytosine residues // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 1974. V.71. P. 3649—3653.
9. *Zbarkov D.O.* Base excision DNA repair // *Cell. Mol. Life Sci.* 2008. V.65. P.1544—1565. doi:10.1007/s00018-008-7543-2

По физиологии или медицине — У.Кэмпбелл, С.Омура, Ю.Ту

Половина Нобелевской премии 2015 г. по физиологии или медицине разделена между американцем ирландского происхождения Уильямом Кэмпбеллом и японцем Сатоси Омура и вручена им «за открытия, касающиеся лечения заболеваний, вызываемых круглыми червями». Другую половину премии получила китайянка Юю Ту «за исследования, позволившие создать противомаларийное лекарственное средство».

Уильям Сесиль Кэмпбелл (William Cecil Campbell) родился 28 июня 1930 г. в пос.Рамелтон (графство Донегол, провинция Ольстер, Ирландское свободное государство — ныне Ирландия). В 1952 г. Кэмпбелл с отличием окончил Тринити-колледж, входящий в состав Дублинского университета, и переехал для дальнейшей учебы в США. В 1957 г. получил степень доктора философии в Висконсинском университете в Мэдисоне (США) и начал работать в международной научно-исследовательской фармацевтической компании «Merck and Co.». В 1984—1990 гг. сначала он был старшим научным сотрудником этой компании, а затем стал директором по тестовым исследованиям и развитию. С 1990 г. Кэмпбелл занимает должность профессора Университета Дрю (г.Мэдисон, штат Нью-Джерси, США). В 2002 г. был избран действительным членом Национальной академии наук США.

Сатоси Омура (Satoshi Omura) родился 12 июля 1935 г. в г.Нирасаки (префектура Яманаси, расположенная в регионе Тюбу на о.Хонсю, Япония). В 1958 г. он окончил Университет Яманаси,

в 1963 г. — получил степень магистра в Токийском университете науки (частное учебное заведение в Синдзюку). Там же защитил диссертацию на соискание степени доктора философии по химии в 1970 г., успев до этого, в 1968 г., получить степень доктора философии по фармацевтическим наукам в одном из известнейших вузов мира — Университете Токио (Бункё). С 1965 г. жизнь ученого связана с Университетом им.С.Китасато (Токио), где он на протяжении многих лет занимал разные должности — от научного сотрудника до президента (1990—2008). В настоящее время 80-летний Сатоси Омура — почетный президент и заслуженный профессор этого университета, а также профессор химии Университета Уэсли (США), член Академии наук Японии, Национальной академии наук США, Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина» и Европейской академии наук, Американского общества биохимии и молекулярной биологии, Королевского общества химии (Великобритания) и Химического общества Японии. Заслуги профессора Омура отмечены многочисленными международными и национальными наградами и премиями.

Юю Ту (Youyou Tu) родилась 30 декабря 1930 г. в портовом городе Нинбо (провинция Чжэцзян, Китайская Народная Республика). В 1955 г. окончила факультет фармакологии Пекинского медицинского института (с 2000 г. слит с Пекинским университетом), затем два с половиной года изучала традиционную китайскую медицину и нача-



Уильям Сесиль Кэмпбелл.



Сатоси Омура.



Юю Ту.

ла работать в Институте традиционной китайской медицины. В настоящее время Юю Ту — директор Центра исследований природных артемизининов и разработок на их основе лекарственных препаратов Китайской академии традиционной китайской медицины. Лауреат премии Ласкера (2011).

Нобелевская премия 2015 г. в области физиологии или медицины довольно необычна: она присуждена за открытия, которые не относятся к элитарным направлениям фундаментальной науки, но уже реально облегчили жизнь миллионам страдающих людей. Вероятно, по каким-то причинам Нобелевский комитет вспомнил об изначальном гуманистическом духе премии, которая, как было отмечено в завещании основателя фонда, должна вручаться за открытие, служащее «максимальному благу человечества». Оговорюсь и напомним о том, о чем в наш «политкорректный» век не принято вспоминать: вручается премия на деньги Альфреда Нобеля, заработавшего свой капитал преимущественно на реализации изобретенного им динамита, эффективно убивающего людей, что было высоко оценено военными в начале XX в.

Нобелевские лауреаты 2015 г. действительно совершили настоящий прорыв в лечении паразитарных болезней, однако эти заболевания относятся, по определению экспертов Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), к «игнорируемым» или «не замечаемым». Тому есть причины.

Во-первых, паразитарные болезни поражают в основном беднейших из бедных, поэтому межнациональные фармацевтические корпорации предпочитают не тратить деньги на лекарства, которые не сулят многомиллионных прибылей.

Во-вторых, эти болезни не принято обсуждать публично, большинство людей предпочитают об этом не знать. Между тем, по оценке Всемирного банка [1], от кишечных гельминтозов (заболеваний, вызванных паразитическими червями) ежегодно теряется более 24 млн лет человеческих жизней*.

«Большая Восьмерка», собиравшаяся в Бирмингеме еще в 1999 г. (когда в нее еще входила Россия), рассмотрела по инициативе Японии проблему паразитарных болезней и констатировала, что эта патология — одно из важнейших препятствий экономического развития многих развивающихся стран.

* Как известно, ущерб от любой болезни сегодня определяют в миллионах потерянных лет жизни (disability-adjusted life year, DALY). Этот показатель, разработанный Гарвардским университетом для Всемирного банка, представляет собой сумму потенциальных лет жизни, утраченных из-за преждевременной смерти и нетрудоспособности. В статье автор приводит DALY из отчета «World development report» [1], опубликованного на сайте Всемирного банка в 1993 г., поскольку именно эти данные отражают реальную ситуацию с кишечными гельминтозами и в настоящее время, хотя в отчете, опубликованном ВОЗ в 2014 г., указан значительно меньший показатель для этой группы заболеваний — 5 266 431 потерянных лет жизни. — *Примеч. ред.*

Паразитарные болезни — это не какая-то мифическая патология, встречающаяся неизвестно где. По данным ВОЗ, она встречается у каждого третьего жителя развитых капиталистических стран (стран «золотого миллиарда»), а у каждого жителя Африки в организме в среднем одновременно обитают не менее трех разных паразитов, отравляющих жизнь заразившегося человека.

Именно распространенные среди беднейших слоев населения паразитарные болезни ответственны за различия в уровне смертности и состоянии здоровья между бедными и богатыми. При сопоставлении этих показателей у 20% наиболее бедных людей и 20% наиболее богатых, выяснилось, что именно «игнорируемые» или «не замечаемые» болезни определяют 77-процентную разницу в уровне смертности и примерно 80-процентную — в состоянии здоровья людей этих групп.

Борьба с бедностью, о которой иногда вспоминают, наиболее эффективно может проводиться с помощью борьбы с реально массовыми паразитарными болезнями, которые незаметно вызывают задержку психического и физического развития детей и снижают трудоспособность взрослого населения. Наиболее опасное последствие всех паразитарных болезней — угнетение иммунитета. На фоне «паразитарного» иммунодефицита снижается эффективность вакцинопрофилактики и чаще развиваются любые другие инфекционные и неинфекционные болезни. Поэтому, когда вы принесете свою собачку или кошечку к хорошему ветеринару (подчеркиваю, к хорошему), он или она перед введением вакцины непременно спросит вас: «А глистов вы у своего питомца выгнали?». Ветеринары, как правило, помнят, что на фоне гельминтов прививки часто оказываются неэффективными. А вот педиатры обычно не придают этому особого значения.

В России, по экспертным оценкам ВОЗ, примерно 20 млн человек (преимущественно детей) ежегодно заболевают какой-нибудь паразитарной болезнью. Заразившиеся дети капризны, излишне беспокойны, плохо спят, часто болеют ОРВИ и плохо успевают в школе. У них нередко развиваются различные патологии пищеварительной и иммунной систем. Как правило, все перечисленные симптомы исчезают после избавления таких детей от паразитов.

Безусловно, открытия, приведшие к созданию лекарственных препаратов, которые избавляют множество людей от паразитов, имеют огромное значение и заслуживают Нобелевской премии. В чем же суть этих открытий?

Кэмпбэл и Омур выделили из почвенных бактерий *Streptomyces avermitilis* (рис.1) природный антибиотик — авермектин, который оказался эффективен против личиночных стадий круглых паразитических червей, нематод (Nematoda). Наиболее известные из них паразиты человека — ас-

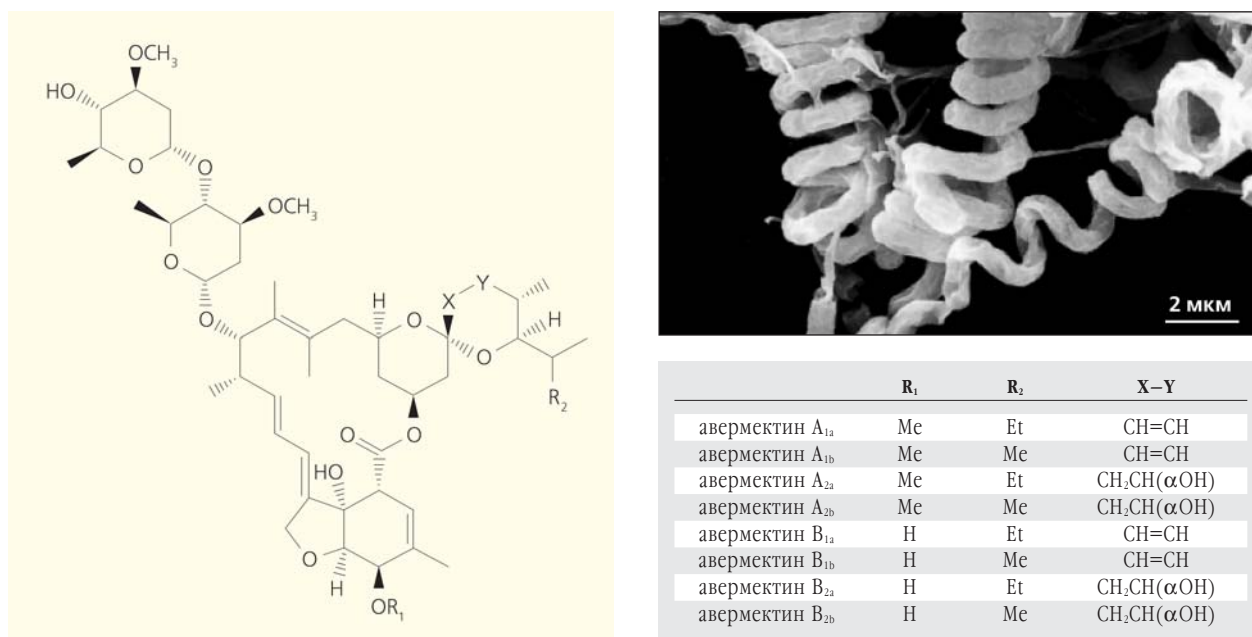


Рис.1. Микрофотография почвенной бактерии *Streptomyces avermitilis* (справа сверху) и формула производимого ею авермектина [2, 3]. Включение различных групп в положения R₁, R₂, X и Y позволило создать восемь различных соединений авермектина (A_{1A}, A_{1B}, A_{2A}, A_{2B}, B_{1A}, B_{1B}, B_{2A} и B_{2B}), которые сначала использовались для лечения животных, а теперь и человека.

кариды (Ascarididae), острицы (*Enterobius*), трихинеллы (*Trichinella*), анкилостомы (*Ancylostoma*) и т.д.

В дальнейшем из авермектина был создан ветеринарный и медицинский лекарственный препарат — ивермектин*. Он оказался эффективен против паразитарных болезней, распространенных в тропиках — онхоцеркоза и филяриозов лимфатической системы. В тропическом поясе Земли человек заражается возбудителями обеих болезней при укусах кровососущих насекомых, поэтому предотвратить заражение достаточно сложно.

Онхоцеркоз распространен в Африке и Южной Америке. Возбудители этого заболевания — гельминты *Onchocerca volvulus*, переносчик — самка мошка *Simulium* spp., единственный хозяин — человек (рис.2). Мигрируя в организме человека, черви вызывают нестерпимый

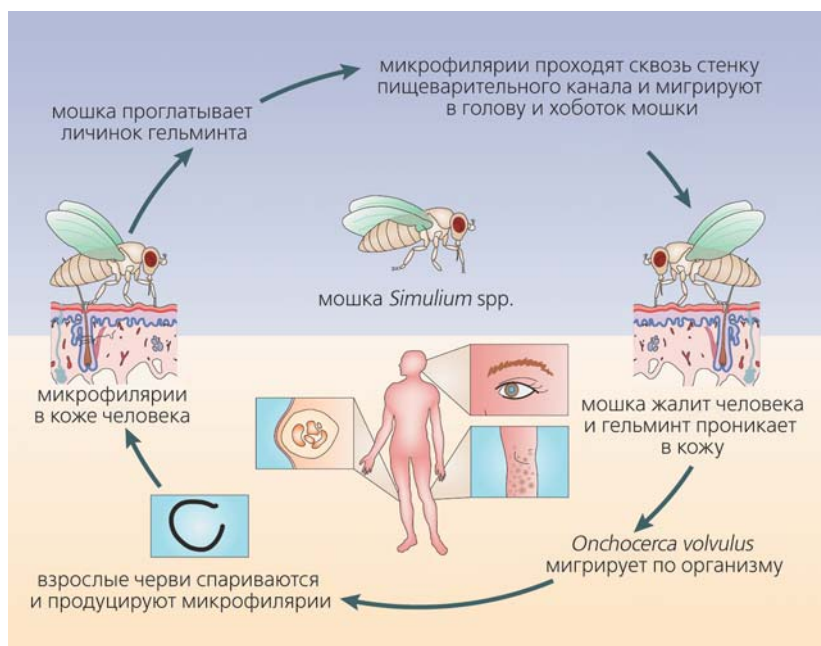


Рис.2. Схема жизненного цикла возбудителя онхоцеркоза, или «речной слепоты», — *Onchocerca volvulus* [2]. Взрослые черви поселяются в лимфоузлах человека, где самки производят на свет многочисленное потомство — до 1000 личинок (микрофилярий) в день. Они могут свободно перемещаться по организму хозяина, часто проникают в глазное яблоко, что приводит к потере зрения. Характерный признак онхоцеркоза — наличие под кожей плотных фиброзных узлов размерами до 7 см. Узлы могут локализоваться как в тазобедренной области, так и около суставов, в области лопаток и редко на голове. Когда черви умирают, они вызывают кожный зуд, а частые расчесывания приводят к патоморфологическим изменениям кожи — высыпаниям и депигментации.

* История создания ивермектина подробно описана на сайте Университета им.С.Китасато (www.kitasato.ac.jp/english/people/SatoshiOmura.html) и в журнале Nature Reviews [2].

кожный зуд и поражения глаз, приводящие к необратимой слепоте. Из примерно 17 млн заболевших онхоцеркозом, или «речной слепотой», почти 50 тыс. человек — умерли и 350 тыс. — ослепли. Ежегодный однократный прием ивермектина предотвращает развитие заболевания у заразившихся людей.

После нескольких лет успешного применения ивермектина против онхоцеркоза этот препарат стали использовать в лечении филяриозов лимфатической системы, которые вызывают «слоновость» — значительное увеличение объема пораженных органов за счет нарушения циркуляции лимфы. В группу филяриозов лимфатической системы входят болезни, виновниками которых могут стать несколько видов круглых червей семейства филярий, или нитчаток (*Filariidae*). Эта группа заболеваний выявлена у 120 млн жителей тропических стран Юго-Восточной Азии, Южной Америки и Африки, причем 43 млн человек стали инвалидами. Ивермектин, назначаемый однократно, предотвращает развитие патологии лимфатической системы, но не излечивает больного, так как не действует на половозрелого гельминта. Только регулярный прием ивермектина, причем зачастую в сочетании с другими препаратами, может избавить от паразита.

Решающую роль во внедрении ивермектина сыграла ВОЗ. В течение многих лет эта организация, входящая в систему ООН, выделяла средства и стимулировала исследователей на изучение этого препарата. После завершения многоэтапных доклинических и клинических испытаний ВОЗ начала настойчиво призывать фармацевтические фирмы к безвозмездному распространению ле-

карства среди жителей тропических стран, пораженных онхоцеркозом и филяриозами лимфатической системы.

Забытая сейчас значимость гельминтозов в прошлом была хорошо известна европейцам. Об этом свидетельствует публикация Чарлза Р. Дарвина в лондонской газете «The Times» в далеком 1881 г. В ней есть такие слова, — «Будем помнить, как много жизней было спасено, как много ужасных страданий было предотвращено благодаря знаниям о паразитических червях».

Если значимость тропических гельминтозов может быть и неизвестна широкой общественности, то о малярии слышал каждый. Для человечества малярия была (и остается) главнейшей болезнью, в значительной степени, определявшей выживание людей и формирование человека как биологического вида.

За весь период существования человечества от малярии умерло больше людей, чем от любой другой причины, включая не только болезни, но и войны. В настоящее время от самой агрессивной формы малярии — тропической — ежегодно умирает, по экспертным оценкам, от 600 тыс. до 1 млн человек. Неудивительно, что в результате многовековой селекции в геноме человека сформировались и закрепились множественные (несколько сот) генетические аномалии, обеспечивающие защиту от этой смертельной болезни. В настоящее время врожденные гемоглобинопатии — наиболее распространенные моногенетические патологии, носителями которых являются 7% жителей Земли.

Из четырех наиболее часто встречающихся генетических аберраций, непосредственно связанных со смертельно опасными инфекциями человека (серповидно-клеточная анемия, талассемии, кистозный фиброз и дефицит глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы), три обусловлены изменениями гена гемоглобина. Одна из его мутаций, если человек по этому гену гомозиготен, ведет к тяжелейшей форме малярии, но при гетерозиготности болезнь не проявляется. Сейчас ежегодно в мире 300—400 тыс. новорожденных появляются на свет с серьезными клиническими проявлениями этих генетически обусловленных болезней. Хотя указанная патология наиболее часто встречается в тропиках, в настоящее время из-за массовой миграции населения такие больные все чаще стали появляться во всем мире.

Сложность лечения смертельно опасной тропической маля-



Рис.3. Книга «Рецепты при неотложных случаях» китайского ученого и алхимика Гэ Хуна (283—343), прославившегося энциклопедическими трактатами [4]. На фотографии изображена версия книги 1574 г. издания.

рии связана с тем, что на большинстве пораженных территорий возбудитель приобрел устойчивость к классическим противомаларийным препаратам. Поэтому настоящим прорывом стало появление принципиально нового класса соединений, активно действующих на возбудителя тропической малярии. В этом и заключается заслуга третьего нобелевского лауреата — китайской исследовательницы Юю Ту. Лекарство от малярии она начала искать среди веществ растительного происхождения, став участницей национального проекта, запущенного в 1967 г. в Китае. Под руководством Юю Ту китайские исследователи протестировали на мышинной модели малярии около 380 экстрактов китайских растений и остановились в результате на однолетней полыни (*Artemisia annua*). Однако выделить из нее действующее вещество (названное впоследствии артемизинином) ученым удалось только после того, как они обратились к древней книге рецептов китайского ученого и алхимика Гэ Хуна* (рис.3).

Впоследствии на основе природных артемизининов** (рис.4) удалось создать целое семейство современных синтетических и полусинтетических лекарственных препаратов, широко используемых для спасения жизни больных малярией в странах Африки и Юго-Восточной Азии. Внедрение этих препаратов связано с настойчи-

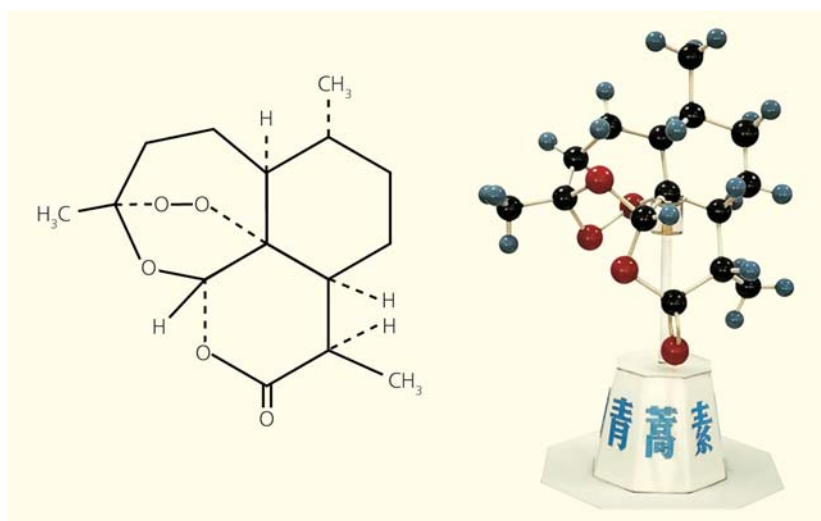


Рис.4. Структура молекулы артемизинина [4].

востью и упорством китайских ученых и специалистов, благодаря четким действиям которых артемизинины, несмотря на некоторый «скепсис» западных специалистов (особенно на начальных этапах), дошли до практики и спасают жизни больных.

В связи с открытием артемизининов уместно вспомнить об упоминавшихся в даосской мифологии чудесных свойствах полыни. Вариант даосского рая — остров бессмертных Пенлай. На этом острове те, кто попробовал чудесных растений с дивным ароматом, становились бессмертными. Интересно, что Пенлай — это реальная местность на полуострове Шаньдун в Китае, где проживала народность «лай», а «пен» в переводе означает полынь. Этот пример еще раз подчеркивает справедливость утверждения известного отечественного историка-этнолога Л.Н.Гумилева: «Мифические и сказочные сюжеты — отнюдь не произведения большой фантазии. Они воссоздают уровень знаний и способ выражения своего времени».

© академик В.П.Сергиев,

доктор медицинских наук

НИИ медицинской паразитологии

и тропической медицины им.Е.И.Марциновского

* Историю открытия препарата Юю Ту подробно изложила в журнале *Nature Medicine* [4].

** Механизм действия артемизинина только начинает проясняться. Судя по последним данным, он каким-то не до конца понятным образом мешает работе особому ферменту (фосфатидил-инозитол-киназы) малярийных плазмодиев. Он необходим паразиту, чтобы поддерживать движение пузырьков с гемоглобином, который плазмодий извлекает из эритроцитов [5, 6].

Литература

1. World development report. N.Y., 1993. P.28.
2. Ōmura S., Crump A. The life and times of ivermectin — a success story // *Nat. Rev. Microbiol.* 2004. V.2. P.984—989. doi:10.1038/nrmicro1048
3. Takahashi Y., Matsumoto A., Seino A. et. al. *Streptomyces avermectinius* sp. nov., an avermectin-producing strain // *Int. J. Systematic and Evol. Microbiol.* 2002. V.52. P.2163—2168. doi:10.1099/ijs.0.02237-0
4. Tu Y. The discovery of artemisinin (qinghaosu) and gifts from Chinese medicine // *Nat. Med.* 2011. V.17. P.1217—1220. doi:10.1038/nm.2471
5. Mbengue A., Bhattacharjee S., Pandbarkar T. et. al. A molecular mechanism of artemisinin resistance in *Plasmodium falciparum* malaria // *Nature.* 2015. V.520. P.683—687. doi:10.1038/nature14412
6. Bozdech Z., Ferreira P.E., Mok S. A crucial piece in the puzzle of the artemisinin resistance mechanism in *Plasmodium falciparum* // *Trends Parasitol.* 2015. V.31. P.345—346. doi:10.1016/j.pt.2015.06.004

Новости науки

Лазерная физика

Высокочувствительный метод газоанализа

Медицина, экология, химия, геологическая разведка и добыча природных ресурсов — те области, где критически важна точность детектирования газовых примесей. Например, в горнорудной промышленности это едва ли не главный способ защиты от внезапных выбросов метана — основного (92—98%) компонента природного газа. Он распространяется по шахтным выработкам, разрушает породу и в конечном счете становится причиной взрывов и пожаров, иногда перерастающих в крупные катастрофы с многочисленными жертвами.

Острота проблемы привела к разработке широкой гаммы газоанализаторов и сенсоров, в которых реализуются различные принципы измерений. Наиболее распространены термохимические, термокаталитические, ионизационные и оптические (спектроскопические) устройства. В последних примеси распознаются по поглощению ими лазерного излучения.

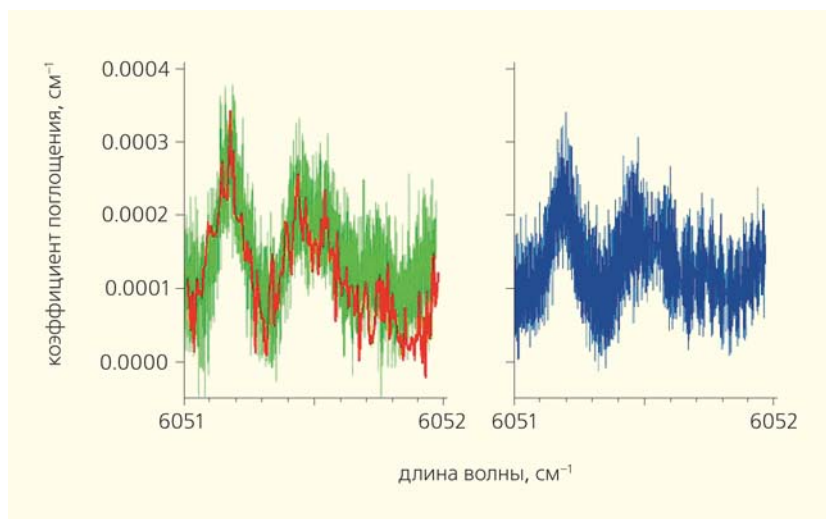
Среди лазерных методов спектрального анализа газов сегодня активно развивается так называе-

мая рингдаун-спектроскопия (Cavity Ring Down Spectroscopy — CRDS), т.е. спектроскопия по времени затухания излучения, проходящего через резонатор. Этот принцип, демонстрирующий высокую чувствительность измерений коэффициента поглощения (примерно 10^{-11} см⁻¹), можно использовать в простых приборах — газоанализаторах, которые применяют там, где требуется распознать газ в небольшой концентрации. Наиболее популярной в таких устройствах стала схема измерения примесей, построенная методом спектроскопии интегрального внутррезонансного выхода (Integrated Cavity Output Spectroscopy — ICOS), когда регистрируется не затухание света на каждой длине волны, а интегральный сигнал.

Однако серьезным препятствием на пути развития таких систем стали флуктуации проходящего через резонатор сигнала. Они появляются из-за рассогласования частот лазерного излучения и собственных частот резонансных ячеек (в некоторых случаях флуктуации могут достигать до 100%). Существуют разные варианты решения этой проблемы, но все они основаны на усреднении сигнала по времени или частоте, что замедляет процесс детектирования.

Группа ученых Физического института (ФИАН) им.П.Н.Лебедева РАН предложила новый подход,

устраняющий этот барьер, — метод R-ICOS (Reflection Integrated Cavity Output Spectroscopy)*. Он предусматривает комбинацию светового сигнала, полученного методом ICOS, с сигналом излучения, отраженным от резонатора. При этом вместо одного лазерного луча, как принято в ICOS, здесь участвуют три пучка: базовый и два взаимодополняющих луча, прошедших ячейку света и отраженных от него. На основе R-ICOS-метода физики создали прототип быстрого действующего лазерного спект-



Сравнение спектров поглощения метана, полученных R-ICOS-методом с разным временем регистрации (зеленый — 5 мс, красный — 320 мкс) и ICOS-методом (синий — 50 с).

* Короленько П.В., Николаев И.В., Очкин В.Н., Цхай С.Н. Регистрация абсорбционных спектров интегральным трехлучевым методом с использованием перестраиваемого лазера и внешнего резонатора // Квант. электрон. 2014. Т.44(4). С.353—361.

рометра, с помощью которого спектры поглощения можно регистрировать за короткое время — до 320 мкс. Новое устройство демонстрирует высокую чувствительность детектирования, в 50—70 раз превышающую измерения ICOS-методом на той же экспериментальной установке.

Разработка ученых показывает эффективность и в оптически плотных средах*, а значит, открывает новые возможности в предсказании взрывов, выбросов метана и других катастрофических явлений. Прибор также можно оптимизировать для измерения содержания изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C в углекислом газе. Такие газоанализаторы используются в геохимии для регистрации испарения глубинных газов, а также в медицине, где по соотношению концентраций стабильных изотопов углерода в организме человека можно выявить ряд заболеваний желудочно-кишечного тракта.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-02-00553).

© Цхай С.Н.,

кандидат физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

Физика плазмы

Укрощение плазмы на установке С2-У

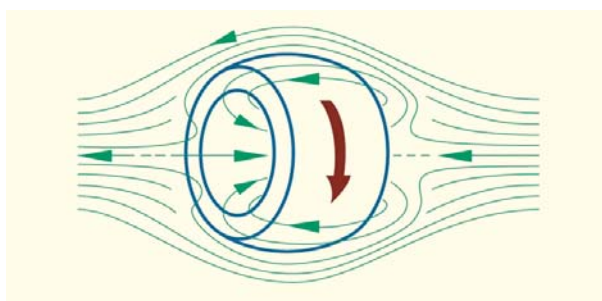
Ученые Института ядерной физики (ИЯФ) им.Г.И.Будкера СО РАН (г.Новосибирск) по заказу частной компании «Tri Alpha Energy» («ТАЕ», штат Калифорния, США) изготовили и поставили партнерам инжекторы мощностью 10 МВт — генераторы пучков ионов водорода для экспериментов с высокотемпературной термоядерной плазмой на исследовательской установке С2-У.

«ТАЕ» создает принципиально новый — линейный — тип реактора. В нем для удержания плазмы, в отличие от наиболее изученной на сегодня системы токамак (замкнутой магнитной ловушки в форме тора), используется конфигурация с обращенным магнитным полем (Field Reversed Configuration — FRC). Среди принципиальных особенностей FRC — возможность достичь более высокого удельного энерговыделения термоядерного реактора при относительно небольших затратах мощности на создание удерживающего плазму магнитного поля. Кроме того, присущая FRC линейная схема открывает широкие возможности управления геометрическими размерами плазменного образования с целью улучшения его параметров. Немаловажное значение имеет и мало-

габаритность таких систем. Ученые считают, что на базе обращенной магнитной конфигурации можно осуществить безнейтронную термоядерную реакцию синтеза ядер бора и водорода с образованием трех альфа-частиц.

Во время недавних экспериментов произошел впечатляющий прорыв: на С2-У удалось в течение сотых долей секунды поддерживать плазму с температурой 10^7 К. Ее стабилизировали ионами, создаваемыми мощными пучками атомарного водорода, источниками которого стали разработанные и изготовленные в рамках контракта с «ТАЕ» новосибирские генераторы. При этом эксперимент подтвердил отсутствие принципиальных ограничений по дальнейшему увеличению параметров работы генератора для перехода в стационарный режим, который требуется для термоядерного реактора.

Сотрудничество ИЯФ СО РАН с компанией «ТАЕ» не ограничивается поставкой исследовательского оборудования. Новосибирский институт — ведущий научный центр в разработке линейных термоядерных систем, имеющих много общего с FRC-концепцией. Здесь уже не первое десятилетие конструируют и используют так называемые открытые магнитные ловушки для удержания плазмы, на которых удалось достичь мирового рекорда разогрева ионизированного газа до $5 \cdot 10^6$ К. Главные преимущества таких конструкций по сравнению с токамаками — относительная простота, меньшие



* Kostenko A.S., Nikolaev I.V., Ochkin V.N. et al. Application of R-ICOS laser spectroscopy technique for measurement of absorption in optically dense media // Laser Phys. Lett. 2015. Doi:10.1088/1612-2011/12/1/015702

Сотрудники ИЯФ СО РАН в экспериментальном зале установки С2-У на монтаже оборудования (вверху) и конфигурация с обращенным магнитным полем.

www.inp.nsk.su

размеры и дешевизна. Научные интересы двух коллективов совпадают, поэтому американские физики работают на российских открытых магнитных ловушках, а новосибирские участвуют в экспериментах «ТАЕ», нацеленных на создание экологически чистого и дешевого термоядерного реактора.

По материалам пресс-службы ИЯФ СО РАН

Генетика

Генофонд славян

Как формировался генофонд славян? Ответить на этот вопрос попытались российские генетики в сотрудничестве с зарубежными коллегами, изучая сходство и различия генофондов восточных, западных и южных славян. Они сравнивали народы, говорящие на балто-славянских языках, с другими европейскими популяциями. Работы велись в генетическом и лингвистическом направлениях.

Исследователи из Института общей генетики и Медико-генетического центра под руководством О.П.Балановского, а также из нескольких стран со славянским и балтским населением (Украины, Белоруссии, Литвы, Эстонии, Хорватии, Боснии и Герцеговины) и ученые из Великобритании изучили более 8 тыс. образцов ДНК у балто-славянских популяций. Среди них три группы славян (*восточные* — белорусы, русские, украинцы; *западные* — кашубы, поляки, словаки, сорбы, чехи; *южные* — болгары, боснийцы, македонцы, сербы, словенцы, хорваты) и балтские народы (латыши, литовцы). Анализ трех генетических систем — Y-хромосомы (отцовская линия), митохондриальной ДНК (материнская линия) и аутосомной ДНК, объединяющей геномы отца и матери, — позволил обнаружить следующие общие закономерности.

Восточные славяне (русские центральных и южных областей, белорусы и украинцы) образу-

ют общую группу. При этом генетически близкие генофонды русских и украинцев частично переходят друг в друга без четкой границы. Одна часть белорусских популяций неотличима от украинцев, другая — от русских. Однако северные русские отличаются от остальных восточных славян и приближаются к финно-угорским популяциям.

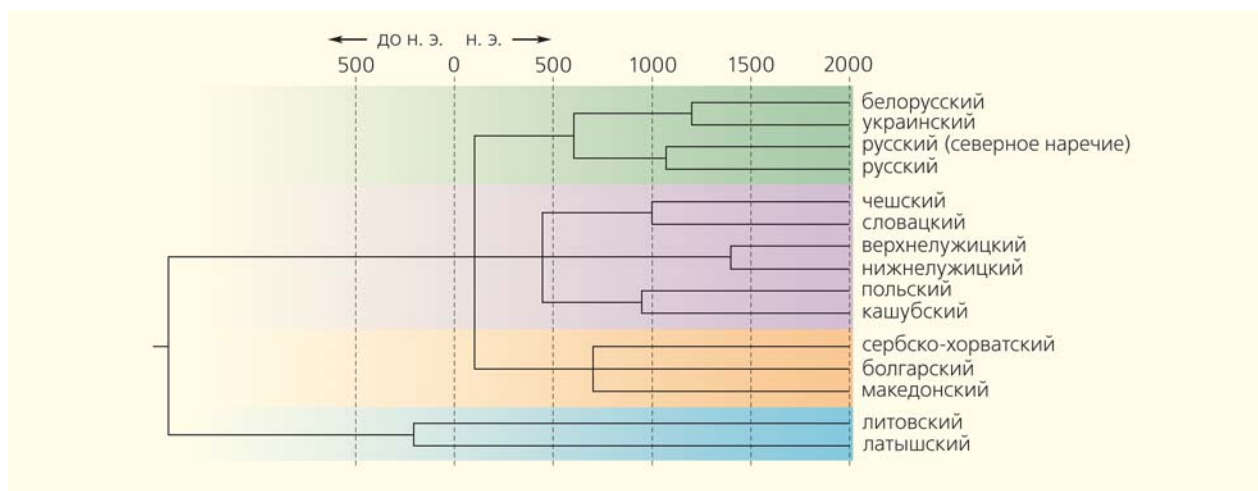
Из западных славян (кашубы, поляки, словаки, сорбы, чехи) к восточным близки поляки, а чехи и (в меньшей степени) словаки тяготеют к немцам и другим западноевропейским популяциям.

Южные славяне разделились на юго-западных (словенцы, хорваты и боснийцы) и юго-восточных (македонцы и болгары), между которыми располагаются сербы. Все эти популяции генетически сходны со своими неславянскими соседями на Балканах — румынами, венграми и греками.

Балтские популяции (латыши и литовцы) близки к эстонцам, говорящим на языке финно-угорской группы, и к волжской финно-угорской группе (особенно мордве), а также к белорусам (восточным славянам).

Для поиска общих предков генетики изучали характеристики аутосомной ДНК, а именно, в геномах разных популяций выявляли фрагменты ДНК, общие по происхождению. Выяснилось, что у западных и восточных славян больше таких фрагментов с популяциями северо-восточной части Европы (литовцами, латышами, эстонцами, карелами, вепсами и северными русскими), несколько меньше — с южными славянами и неславянскими народами Балкан (венграми, румынами и гагаузами) и совсем немного — с народами Поволжья, Западной Европы, Кавказа и с греками. Как показали результаты генетического исследования, славянские популяции, с одной стороны, сходны между собой, а с другой — иногда больше похожи на своих соседей.

Балто-славянские народы занимают около половины Европы. Примерно 1400—1000 лет назад



Реконструированное филогенетическое древо балто-славянских языков. Тройные узлы образованы объединением двойных узлов, если временное расстояние между ними было менее 300 лет.

на территории Восточной Европы, где жили балтские, финно-угорские и тюркские популяции, стали распространяться славяне. Участвующие в исследовании лингвисты, используя метод лексико-статистики*, обновили языковые базы данных и построили филогенетическое дерево балто-славянских языков.

При сравнении математическим методом генетического и лингвистического разнообразия балто-славянских популяций учитывалась и их география. Тест для трех генетических систем (Y-хромосомы, митохондриальной ДНК и аутомомных маркеров) показал очень высокую корреляцию между генетикой и географическим положением (0.80–0.95), но несколько меньшую — между генетикой и лингвистикой (0.74–0.78). По мнению специалистов, славяне, расселяясь по Европе, приносили свой язык местным популяциям, жившим на данных территориях, и одновременно ассимилировали их генофонд.

По итогам исследования, можно увидеть, что западные и восточные славяне восприняли «восточно-европейский» генетический субстрат, а южные славяне — другой, «южно-европейский».

PLoS ONE. 2015. V.10. doi:10.1371/journal.pone.0135820

Зоология

Новый отряд паукообразных в фауне бывшего СССР

Щупальцеходные, или пальпиграды (Palpigradi), — отряд мелких, длиной в несколько миллиметров, нетипичных паукообразных (Arachnida)**. Недавно первый описанный в 1885 г. вид пальпиград назван кененией удивительной (*Koenenia mirabilis*). У большинства арахнид все шесть сегментов головогруды защищены, как известно, цельным щитом-карапаксом. У пальпиград он, как у сольпуг (Solifugae), покрывает только четыре передних сегмента, а два последних, несущих две задние пары ног, снабжены отдельными щитами. На конце 12-членикового брюшка расположена длинная хвостовая нить с многочисленными чувствительными волосками. Дышат пальпиграды, обитающие в насыщенных влагой щелях почвы, через поверх-

* Этот количественный подход к лингвистике основан на той гипотезе, что имеется набор базовых понятий, слова для которых существуют во всех языках мира, при этом они наименее подвержены заимствованиям из других языков. Наиболее употребителен список из 100 слов, составленный американским лингвистом М.Сводешем, включает такие слова, как личные местоимения, обозначения частей тела, основных природных явлений, и др. Степень родства пары языков, имеющих общее происхождение, определяется долей совпадающих слов из этого списка.

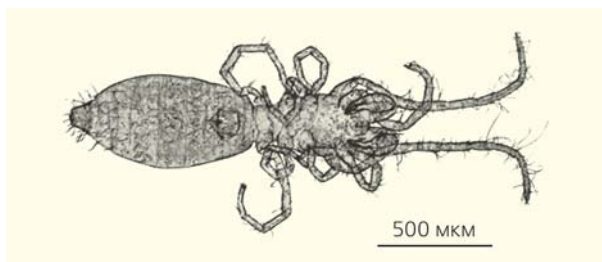
** Подробнее о паукообразных и пальпиградах см.: Михайлов К.Г. Общая арахнология. Краткий курс. Ч.1. Введение. Малые отряды. М., 2014.

ность кутикулы; специализированных органов (легких и трахей), характерных для других арахнид, у них нет. Ротовое отверстие у щупальцеходных находится на вершине особого сосочка, расположенного между основаниями хелицер. Педипальпы, как и у сольпуг, участвуют в передвижении и практически не используются в качестве щупальцев (отсюда название отряда).

К настоящему времени описано всего лишь 87 видов пальпиград. Распространены они в тропических и субтропических странах. На территории бывшего СССР представителей этого отряда до последнего времени не встречали. Ближайшие находки были зарегистрированы в Румынии (со стороны Европы), а также в Индии и Непале (со стороны Азии).

В 2014 г. сотрудник Венского университета (Австрия) Э.Христиан (E.Christian) описал новый вид пальпиграды *Eukoenia vargovitschi* по единственному экземпляру, найденному в Нижней Шакуранской пещере в Абхазии***. Спелеолог Р.С.Варгович из киевского Института зоологии НАН Украины обнаружил его в августе 2011 г. на поверхности воды (очевидно, случайно) в «каменной чаше», расположенной в 700 м от входа в пещеру, в темноте

*** Christian E. A new *Eukoenia* species from the Caucasus bridges a gap in the known distribution of palpigrades (Arachnida: Palpigradi) // *Biologia* (Bratislava). 2014. V.69. №12. P.1701–1706. doi:10.2478/s11756-014-0478-1



«Каменная чаша» в Нижней Шакуранской пещере и экземпляр пальпиграды, по которому был описан новый вид. doi:10.2478/s11756-014-0478-1

и при температуре 12°C. Общая длина тела пойманного самца *E.vargovitschi* составляет всего 1.34 мм.

Итак, еще одна лакуна в изучении фауны паукообразных заполнена. Таким образом, без учета клещей, система отрядов которых очень спорна, на территории России и республик бывшего СССР достоверно известны представители отрядов скорпионов (*Scorpiones*), пальпиград (*Palpigradi*), ложноскорпионов (*Pseudoscorpiones*), сольпуг (*Solifugae*), сенокосцев (*Opiliones*) и пауков (*Aranei*), т.е. шести отрядов из 10 известных. Обнаружение жгутохвостого (*Uropygi*) в Приморье в конце XIX в. пока нуждается в подтверждении. Очевидно, будут и новые находки пальпиград — возможно, в пещерах Средней Азии. Поиски нужно продолжать!

© Михайлов К.Г.,

кандидат биологических наук
Московский государственный университет
им.М.В.Ломоносова

Археология

Что скрывают древнейшие курганы Тывы?

Летом 2015 г. экспедиция Института археологии РАН исследовала центральное сооружение погребально-поминального комплекса Аржан-5, расположенного в Турано-Уюкской котловине Пий-Хемского р-на Республики Тыва, и сделала несколько находок. Одна из самых интересных — бронзовая уздечная бляшка в виде свернувшейся пантеры. Она аналогична знаменитой бронзовой пантере из кургана Аржан-1, раскопки которого в 1971—1974 гг. под руководством М.П.Грязнова привели к уникальным открытиям древнейших для истории кочевников Евразии памятников эпохи поздней бронзы и раннего железного века



Детали узды, найденные в центральном погребении кургана Аржан-5. Слева направо: подвеска из клыка кабана, бронзовые подпружная пряжка, бляшка в виде пантеры и уздечная пронизь.

(IX—VIII вв. до н.э.). Аржан-5 находится в 2.5 км к северо-востоку от того знаменитого кургана.

В ходе разведок экспедиции с применением методов аэрофотосъемки и георадарного сканирования удалось выяснить, что первоначальная насыпь Аржана-5 имела в плане форму плоского круглого сооружения, в центральной части которого располагалась грабительская воронка с небольшим валом по окружности*. При детальном анализе на площади между центральной воронкой и окаймляющим валом специалисты зафиксировали радиально расположенные линии провалов камней и пятна более интенсивной растительности, вероятно, связанные с подкурганскими конструкциями. Такие же конструкции из радиально расположенных бревен были обнаружены в Аржане-1 — самом раннем некрополе для племенной знати скифского времени в долине р.Уюк (ее еще называют Долиной царей).

Насыпь Аржана-5, сильно разрушенная строительной техникой в конце XX в., была сооружена из крупных рваных камней, в некоторых местах зафиксированных наклонными плитами. Внешняя опорная конструкция состояла из горизонтальной кладки, расположенной по кругу, и припирающей ее стены из вкопанных в несколько рядов вертикальных плит с забутовкой в виде небольших камней. Максимальный диаметр этой конструкции достигал 48 м. Камни перекрывали деревянные сооружения, располагавшиеся по кругу на расстоянии 5—15 м от предполагаемого центра насыпи.

Археологи расчистили три уровня деревянных конструкций: сплошное перекрытие, а также продольно и поперечно пересекающиеся плахи и бревна. Дерево плохо сохранилось, поэтому в основном приходилось фиксировать пятна глина с остатками волокон дерева. Анализ породы, проведенный в лаборатории Института археологии РАН, показал, что конструкции сделаны из лиственницы, сосны и ели.

В погребальном комплексе найдены человеческие останки как минимум двух индивидуумов, разрозненные кости нескольких лошадей и артефакты раннескифского времени (детали узды): две подвески из клыков кабана, одна — из рога, роговой псалий (стержень на конце удил для крепления поводий), бронзовые подпружные пряжки, два уздечных кольца и округлая уздечная бляшка в виде свернувшегося хищника из семейства кошачьих (условно называемого пантерой). Стиль изображения (что характерно и для предметов из кургана Аржан-1) близок скифскому звериному.

По результатам радиоуглеродного анализа подкурганских деревянных конструкций установлено,

* Рукавишникова И.В., Рукавишников Д.В., Морозов П.А. Применение низковысотной аэрофотосъемки и геофизических методов при исследовании каменных курганов скифского времени в Турано-Уюкской котловине (Тыва) // Археология и геоинформатика. Тез. докл. Второй междунар. конф. 2015. С.30—31.

что могильник относится к VIII в. до н.э. И это согласуется с датами, полученным в ходе изучения материалов кургана Аржан-1. Два комплекса, построенные носителями одной культуры, составляют самую раннюю группу памятников ритуальной Долины царей Турано-Уюкской котловины.

© **Рукавишникова И.В.**,
кандидат исторических наук
Институт археологии РАН

Гладченков А.А.
Институт истории Дальнего Востока РАН
Москва

Палеонтология

Первая находка архаичного плезиозавра из среднеюрских отложений Поволжья

В мезозойскую эру, когда по суше бродили динозавры, в морях обитали разнообразные рептилии. В европейской части России их скелеты часто находят в береговых обрывах и карьерах, вскрывающих отложения юрского (145—201 млн лет назад) и мелового (66—145 млн лет назад) возрастов.

В 1920 г. геолог Е.В.Милановский во время работ в Саратовской губернии близ с.Верхняя Добринка (ныне входит в состав Волгоградской обл.) нашел в стенке оврага кости плезиозавра. Они залегали в гипсоносных глинах раннекелловейского возраста (165 млн лет назад). Вместе со студентом и местным крестьянином ученый провел раскопки и обнаружил позвонки, ребра, фаланги и кости тазового пояса. По некоторым анатомическим особенностям он определил найденные остатки как относящиеся к плиозаврам, о чем опубликовал сообщение в «Геологическом вестнике»*. Кости рептилии были отправлены на хранение в Геологический институт Московской горной академии (сейчас его коллекции находятся в Государственном геологическом музее им.В.И.Вернадского РАН).

Сделанный спустя почти 100 лет палеонтологами Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова и Саратовского государственного технического университета осмотр находки Милановского показал, что принадлежность найденных геологом остатков морского ящера к плиозаврам недостаточно обоснована. Кости таза, как выяснилось, обладают рядом примитивных признаков, что позволяет отнести находку к ромалеозавридам (*Rhomaleosauridae*) — семейству раннеюрских плезиозавров, обладавших весьма большой головой с мощными челюстями и относительно длинной шеей. До недавнего времени ученые считали, что в средней юре их полностью сменили короткошеие плиозавры (семейство *Pliosauridae*).

* Милановский Е. Находка остатков плезиозавра в юрских отложениях Саратовской губернии // Геол. вестн. 1921. Т.4. С.118—122.



Ромалеозавр в погоне за молодыми ихтиозаврами. Реконструкция Н.Г.Зверькова.

При обсуждении вопроса со специалистом по плезиозаврам из Оксфордского университета (Великобритания) Р.Бенсоном выяснилось, что в Англии тоже есть остатки похожего ящера, обнаруженные в 1898 г. куратором Музея геологии Седжвика Кембриджского университета Г.Кипингом. Находка до сих пор не описана. Это обстоятельство послужило началом совместной работы по изучению келловейских плезиозавров, относящихся к семейству ромалеозаврид**.

Ромалеозавры, очевидно, были реликтами келловейского времени. Находки их остатков в отложениях этого возраста позволяют предполагать, что они не исчезли в конце раннеюрской эпохи, а на протяжении всей средней юры пытались конкурировать с более продвинутыми родственниками — плиозаврами, обычными обитателями Русского моря келловейского века. Сведения о находках их зубов и костей упоминаются в литературе начиная с XIX в. А совсем недавно, в 2000 г., А.В.Ступаченко нашел в келловейских отложениях бассейна р.Унжи (Костромская обл.) верхнечелюстную кость морского хищника — короткомордого плиозавра из рода *Simolestes*, внешне похожего на ромалеозаврид, но отличающегося от них строением скелета***.

© Зверьков Н.Г.

Московский государственный университет
им.М.В.Ломоносова

** Benson R.B.J., Zverkov N.G., Arkhangelsky M.S. Youngest occurrences of rhomaleosaurid plesiosaurs indicate survival of an archaic marine reptile clade at high palaeolatitudes // Acta Palaeontologica Polonica. 2015. V.60. №4. P.769—780.

*** Зверьков Н.Г., Архангельский М.С. О находке остатков короткомордого плиозавра в келловее Костромской области (Россия) // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. VI Всероссийское совещание: Научные материалы. 2015. С.344.

Удивительная книга о первопроходцах Арктики

В.С.Корякин,
доктор географических наук
Москва

В 2014 г. в московском издательстве «ГЕОС» вышел труд, посвященный началу освоения человеком Арктики. При весьма внушительном объеме книги (65 печатных листов) ее тираж составил всего 500 экземпляров. Ответственные редакторы — академик В.М.Котляков, доктор географических наук А.А.Величко и доктор исторических наук С.А.Васильев — определили научный жанр издания как «атлас-монография». Авторский коллектив состоит из нескольких десятков специалистов из России и других стран. Не менее впечатляет и перечень организаций, причастных к изданию книги, в числе которых Институт географии РАН, Институт материальной культуры РАН, Русское географическое общество, Российский фонд фундаментальных исследований. Книга посвящена памяти «безвестных и отважных наших предков каменного века» — настоящих первопроходцев Арктики.

Заявленная научная тема атласа-монографии грандиозна. Несомненно, что в исследовании проблемы расселения человека в высоких широтах уже достигнуто немало. Тем не менее нельзя сказать, что тема изучена во всей полноте, многие вопросы остаются будущим исследователям. И сегодня они получили исходную базу для своих работ: увидевшая свет книга станет серьезным фундаментом для новых научных обобщений. Ее выход можно считать своего рода рубежом (по объему задей-

ствованных источников и масштабы сделанных выводов), без которого дальнейшие попытки изучать процесс освоения Арктики напоминали бы блуждание в потемках.

Хотелось бы отметить два обстоятельства, определивших значимость рецензируемой работы. Во-первых, это огромное количество фактического материала, использованного авторами книги. Во-вторых — выполненный на его основе не только временной, но и пространственный анализ, поскольку помимо генерального направления продвижения древнего человека — с юга на север — речь идет также о миграции с запада на восток, а порой и с востока на запад. Освещаются вопросы перемещения людей как в пределах отдельных регионов (например, из Скандинавии к Кольскому п-ову), так и на межконтинентальном уровне: рассказывается о проникновении человека в Северную Америку и Гренландию. Разумеется, решение проблем такого масштаба без привлечения большого объема фактического материала и результатов предшествующих исследований невозможно.

Содержание книги распадается на две части. Первая (региональная) посвящена характеристике приарктических территорий Северной Евразии, Северной Америки и арктических островов. Такое «пространственное» изложение материала само по себе говорит о масштабах процесса освоения Севера нашими предками. Объем накопленных на сегодняшний день науч-



ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ ЗАСЕЛЕНИЕ
АРКТИКИ ЧЕЛОВЕКОМ
В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕЙСЯ
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ:
АТЛАС-МОНОГРАФИЯ / Отв. ред.
В.М.Котляков, А.А.Величко,
С.А.Васильев.

М.: ГЕОС, 2014. 519 с.

ных данных по разным регионам, видимо, обусловил и соотношение размеров разных разделов первой части: на описание северных областей Европы и Сибири приходится 176 страниц, а на север Канады, Гренландию и Исландию — лишь 62.

Хотелось бы остановиться подробнее на разделе «Европейский Север», наиболее значительном по объему и включающем в себя три подраздела: «Фенноскандия», «Север и Северо-Восток Восточно-Европейской равнины» и «Арктические острова». В первом приведена схема, иллюстрирующая основные направления расселения неолитического человека к северо-западу Европы вдоль западного побережья Скандинавии. К сожалению, в тексте процесс расселения описан недостаточно детально, ведь заселение данного региона шло и со стороны Восточно-Европейской равнины. Этой ветви миграции, на мой взгляд, уделено мало внимания и в последующих разделах монографии. Проблема считается дискуссионной, она осторожно намечена на будущее, тем более что при описании опорных памятников севера Скандинавии бросаются в глаза многочисленные указания «Палеогеографические данные: нет», что затрудняет сравнение с материалами, полученными на прилегающих территориях (в первую очередь, на Кольском п-ове).

Как бы то ни было, зафиксировано более позднее заселение внутренних районов Кольского п-ова в голоцене (в пределах 6—5 тысячелетий до н.э.) по сравнению с западным побережьем Скандинавии (около 10 тыс. лет назад), что подтверждают изменения в природной среде. Это представляется логичным в случае, если население проникло сюда с запада. Восточная же ветвь ограничивалась водной преградой, периодически соединявшей Балтийское и Белое моря, что отмечено и авторами соответствующих разделов монографии.

Тем не менее восточнее, по всей совокупности данных подраздела 1.6, выход человека на побережье Печорского моря, даже на такие удаленные его участки, как остров Вайгач или южный берег Югорского Шара, уверенно датируется эпохой мезолита. Несомненно, перемещению людей здесь также препятствовала система озер у кромки сохранявшегося вюрмского (валдайского) ледника.

Одновременно с расселением происходили значительные изменения в среде обитания человека. Так, среди предметов, найденных на мезолитических стоянках культуры веретье в районе оз.Лача, насчитывалось немало костяных орудий. По результатам радиоуглеродного датирования, возраст этих стоянок составляет 9.6—7.7 тыс. лет. По палинологическим данным, в то время здесь господствовали сосна (до 65% от общего количества сборов) и в меньшей степени ель (8%). В целом это близко к нынешним условиям, хотя положение границ природных зон несколько отличалось от современного. Согласно данным карты, представленной на с.75, в центральной части Восточно-Европейской равнины лесотундра простиралась на юг вплоть до среднего течения Онеги, а восточнее — до впадения р.Усы в Печору.

Разделы 7 и 8 посвящены жизнедеятельности мезолитического человека, рассматриваются особенности его питания и здоровья. На вопрос о питании людей дан вполне отчетливый ответ: они, определенно, не голодали, хотя гурманы той поры отличались вкусами от наших современников. Действительно, из 2 тыс. костных остатков почти 60% принадлежат бобру и всего 20% — лосю. Значительное место в диете человека эпохи мезолита занимала рыба, из которой первопроходец Севера предпочитал щуку (до 74% обнаруженных костей), но употреблял также окуня (почти 14%) и леща (10%). Кстати, раз-

меры рыбы той поры привели бы в восхищение современных рыбаков: длина щуки достигала 120 см, окуня и леща — 40 см.

В разделе «Арктические острова» освещается история освоения людьми Шпицбергена и Новой Земли. Показана большая роль океана в жизни первопроходцев, рассказывается о различиях в процессах расселения на обоих архипелагах. Важной особенностью освоения этих труднодоступных территорий стало то, что поморское арктическое мореплавание и сопутствующая ему культура возникли в крайне неблагоприятных климатических условиях малого ледникового периода, пик которого пришелся на XVI—XVIII вв. Интересно отметить, что возросшее количество льда на водоемах того времени, с одной стороны, привело к снижению волнения в северных морских акваториях, а с другой, способствовало созданию особого типа судов — кочей, пригодных для плавания в полыньях на мелководье, в отличие от судов открытого моря — ладей.

Маршрут продвижения человека на север Западной Сибири в условиях изменений природной обстановки демонстрируется серией карт (с.169—171), построенных по результатам исследований В.П.Гричука, Н.А.Хотинского и В.А.Климанова. Мы видим, что на протяжении более 10 тыс. лет, с сартанского времени вплоть до атлантического, следы пребывания человека сместились не менее чем на пять градусов к побережью Северного Ледовитого океана. В то время довольно суровые условия окружающей среды сменились более благоприятными. На место еловых и березовых редколесий пришла северная тайга, протянувшаяся вплоть до 65° с.ш., что в конечном итоге и привело к смене культур проживающих там групп людей. В отличие от территорий, лежащих к западу от Уральских гор, север Западной Сибири не подвергался оледенению, а все описываемые из-

менения происходили в условиях повсеместного распространения вечной мерзлоты.

Не менее интересная картина складывалась на п-ове Таймыр и примыкающем к нему с юга Среднесибирском плоскогорье. Особую роль в изучении процессов миграции человека здесь сыграли материалы стоянки Тагенар 6 возрастом около 6 тыс. лет с артефактами эпохи мезолита, которая была обнаружена в бассейне р.Волочанки. Как показали палинологические исследования, в то время здесь были распространены северотаежные лиственничные леса. Однако современные природные условия соответствуют лишь лесотундре с лиственничным редколесьем по долинам рек. Еще в 1950-х годах экспедиция НИИ геологии Арктики обнаружила остатки пней в бухте Гафнер Фьорд, находящейся на 5° севернее. Можно предположить, что сходные условия охватывали полуостров целиком, хотя признаков пребывания древнего человека в районе Гафнер Фьорда геологи не нашли.

В раннем—среднем голоцене человек заселил и острова Новосибирского архипелага. В 1967 г. была обнаружена стоянка древнего человека на о.Жохова, позднее исследованная В.В.Питулько. Немногие обитавшие здесь примерно 8 тыс. лет назад группы людей охотились преимущественно на белого медведя и северного оленя, практически игнорируя морского зверя (тюленя и моржа). Материал культурного слоя позволил отнести находки к распространенной на северо-востоке Азии раннеголоценовой сумнагинской культуре. Здесь она существовала в континентальных условиях на осушенном в то время шельфе Восточно-Сибирского моря.

Довольно интересно в атласе-монографии выглядит описание Берингии (раздел 3), а также истории заселения Американского континента и движения на восток эскимосов, освоивших наиболее сложные для

проживания арктические территории. Здесь к результатам отечественных разработок подключены данные зарубежных исследователей.

По многим причинам важен скромный по объему раздел 6 («Исландия»), построенный целиком на историческом материале. Заселение острова, судя по письменным документам, началось с района современного Рейкьявика, наиболее удаленного от Скандинавии. Ближайший же к Европе берег оказался мало пригодным для жизни из-за активных гляциологических и вулканических процессов. Любопытно проследить историю заселения Исландии в свете глобальных климатических событий — похолодания во время малого ледникового периода или, например, снижения повторяемости штормов в Атлантике в связи с падением межширотного массоэнергообмена в гидросфере и атмосфере.

Далее, за пределы Исландии, скандинавы расселялись в двух направлениях: на север, в область Баффинова моря, и на юг, в сторону американских Великих озер. Отчасти это подтверждает находка Кенсингтонского камня, который многие считают доказательством того, что скандинавские путешественники достигли центральных регионов Северной Америки задолго до экспедиции Колумба. Похожая история случилась на рубеже 1-го и 2-го тысячелетий на востоке Европы, где новгородцы-ушкуйники отправились на северо-восток в Заволочье и далее и практически одновременно другие наши предки вместе с варягами-скандинавами устремились на юг по пути из варяг в греки, чтобы в акватории Средиземного моря повстречаться с теми же скандинавами, обогнувшими Европу с запада.

Часть вторая («Основные особенности инициального заселения») представляет собой обобщения и выводы, сделанные на основе предшествующих разделов. Именно в ней рассказыва-

ется о связях расселения человека с динамикой природной среды, которые были выявлены на основе фактических материалов, представленных в начале книги. Здесь рассмотрены проблемы расширения ойкумены, описаны пути расселения древних людей. Рассказывается, в частности, об изменении традиций питания, что имеет принципиальное значение для выживания и адаптации человека, а также для дальнейшего освоения новых территорий в непривычных экологических условиях. Установлено, что неандертальцы, например, охотились преимущественно на стадных млекопитающих в пределах открытых степных пространств, в то время как сапиенсы имели более широкий пищевой диапазон, включающий водную фауну.

Отдельный раздел посвящен реконструкции социальной активности человека эпохи мезолита на основе антропологического материала, здесь показаны, в частности, различия в образе жизни охотников, собирателей и рыболовов.

Описаны возможности адаптации северных народностей к различным условиям природной среды, нашедшие выражение в их физическом облике.

На основе использования сведений об исходных ДНК выявлена роль различных генетических комплексов — сибирского и европейского — в процессе миграций древнего народонаселения, в том числе из Сибири на запад через Урал, что отражено в серии генетических карт.

В разделе «Этапы первичного освоения Арктики и Субарктики», написанном группой авторов, выделяется пять этапов освоения Севера в зависимости от условий природной среды: средний палеолит в пределах 115—55 тыс. лет назад (микулинское межледниковье и ранневалдайские интерстадиалы), начало верхнего палеолита в интервале 55—25 тыс. лет назад, средняя часть верхнего палеолита (25—16 тыс. лет назад),

завершение верхнего палеолита (16—11 тыс. лет назад) и позднеледниковье, мезолит и неолит в первой половине голоцена (11—6 тыс. лет назад).

На мой взгляд, рецензируемая работа содержит некоторые недостатки, ничуть не снижающие ее значение и научную ценность. Например, жаль, что в книге не использованы известные исторические материалы о каменных лабиринтах и наскальных изображениях различных территорий. Это обогатило бы как содержание работы, так, возможно, и выводы. Четче могла быть отражена энергетика природного процесса (включая роль морских

акваторий) в истории заселения высоких широт. Отдельные мелкие критические замечания лишь подчеркивают масштабность и значимость работы, а сама она заслуживает пристального внимания исследователей различных специальностей.

Хотелось бы особенно отметить важную роль в создании атласа-монографии доктора географических наук, многолетнего руководителя работ по палеогеографии высоких широт Андрея Алексеевича Величко. Рецензируемый труд несомненно станет достойным памятником великому исследователю, оставившему большой след в науке.

В заключение подчеркну, что эта огромная работа, объясняющая заселение Севера в условиях изменений природной среды как среды обитания древнего человека, несомненно, представляет важнейший этап в решении одной из самых актуальных проблем науки. Составители и многочисленные авторы книги завершили поставленную задачу на уровне, прежде недостижимом: можно с уверенностью считать, что атлас-монография в полной мере отражает всю полноту современных знаний о начальном этапе проникновения человека в высокие широты. ■

География. Медицина

ПРИРОДНООЧАГОВЫЕ БОЛЕЗНИ: МЕДИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ АТЛАС РОССИИ / Ред. С.М.Малхазова. М.: Географический факультет МГУ, 2015. 208 с.

Многочисленные природноочаговые болезни, переносчики которых обитают в естественных ландшафтах, представляют серьезную опасность для здоровья человека. В последние десятилетия усиливающаяся антропогенная деятельность (хозяйственное освоение новых регионов, застройка территорий вокруг городов, увеличение рекреационного прессинга) ведет к значительному усилению контактов населения с природными очагами и к созданию эпидемиологических предпосылок для распространения таких болезней. Изучение их географии, природных и социально-экономических условий распространения и пространственной структуры очаговых территорий необходимо для мониторинга медико-эпидемиологических ситуаций и разработки санитарно-профилактических мероприятий с целью защиты населения.

Это первое картографическое обобщение обширной и разнообразной информации о подобных болезнях, возбудители которых циркулируют в природе независимо от человека. В атласе, выполненном в результате многолетних исследований медико-географов и картографов совместно с эпидемиологами, в доступной форме рассказано об истории и современном распространении природноочаговых болезней на территории России, эпидемиологических особенностях, природных и социально-экономических предпосылках, способствующих возникновению и существованию очагов. Серии нозогеографических карт (атлас содержит около 1000 авторских карт в масштабе 1:25 000 000 — 1:60 000 000, для ряда модельных регионов — 1:3 000 000 — 1:5 000 000) отображают уровень заболеваемости населения в XXI в. и многолетнюю (1997—2013) динамику болезней как по отдельным регионам (83 субъектам РФ), так и для страны в целом.



Ботаника

П.Ф.Маевский. ФЛОРА СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ. 11-е изд.
М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 635 с.



Иллюстрированное учебное пособие к практическим занятиям по ботанике для студентов биологических факультетов университетов, сельскохозяйственных и педагогических институтов предназначено для определения растений средней полосы европейской части России. В доработке 11-го издания приняли участие многие специалисты основных центров по изучению флоры региона и России в целом: Ботанического института им.В.Л.Комарова РАН, МГУ им.М.В.Ломоносова, Главного ботанического сада им.Н.В.Цицина РАН, Российского государственного аграрного университета — Московской сельскохозяйственной академии им.К.А.Тимирязева и Рязанского государственного педагогического университета. Новые данные по систематике, морфологии, биологии, встречаемости и распространению были получены в процессе реализации многолетнего проекта «Биологическая флора Московской области» и в ходе сбора материалов по региональным Красным книгам, охватывающим ныне практически всю территорию средней полосы России. Представлены описания более чем 2500 видов. Отделы, классы и семейства растений расположены в книге по новой системе, отвечающей современным представлениям и достижениям разных направлений таксономических исследований. Роды внутри семейств размещены с учетом новейших работ, а виды в родах — по мере размещения их в ключах для определения.

Палеонтология. Организация науки

ПАЛЕОНТОЛОГИЯ В МУЗЕЙНОЙ ПРАКТИКЕ: Сборник научных работ / Отв. ред. С.В.Наугольных. М.: Медиа-Гранд, 2014. 174 с.

Сборник объединяет работы, посвященные различным аспектам палеонтологии и музееведения. Рассмотрены вопросы таксономии, систематики и морфологии разнообразных групп ископаемых организмов из Приуралья, Поволжья и ряда других регионов. Приведены данные об ископаемых почвах мелового возраста из пустыни Гоби в Монголии, рассказано об уникальных находках мумифицированной кожи динозавров в юрских отложениях Забайкалья. Несколько статей посвящены местонахождениям плейстоценовой мегафауны и палеолитической живописи. Музееведческие работы посвящены материалам из Музея земледования МГУ, палеонтолого-стратиграфического музея Санкт-Петербургского университета, Государственного геологического музея им.В.И.Вернадского, полевого музея Томского государственного университета в Хакасии, Красноуфимского краеведческого музея, Кунгурского историко-архитектурного и художественного музея-заповедника, регионального музея земледования Саратовского университета, Геологического музея им.К.Г.Войновского-Кригера в Воркуте и др. Публикации отражают тематику Палеонтологического музейного симпозиума, организованного Геологическим институтом РАН и Красноуфимским краеведческим музеем 19—22 августа 2014 г. в Красноуфимске.



История науки

Боркин Л.Я., Ганнибал Б.К., Голубев А.В. Дорогами Петра Симона Палласа (по западу Казахстана). СПб.; Уралск: Евразийский союз ученых, 2014. 312 с.

Эта книга повествует о двух российско-казахстанских комплексных научных экспедициях (2010 и 2012 гг.). Они были посвящены выдающемуся ученому XVIII в., петербургскому академику Петру Симону Палласу (1741–1811). Издание содержит краткое изложение жизни и деятельности этого натуралиста и путешественника, его вклад в изучение Северо-Каспийской низменности на территории нынешней западной части Казахстана. Основное внимание в книге уделено описанию маршрута двух экспедиций Палласа (1768–1774 и 1793–1794), трижды побывавшего в этом регионе: летом 1769-го, в мае 1773 г. и летом 1793 г.). Этот путь и прошли авторы монографии. Чтобы избежать неправильного истолкования текста Палласа, они использовали многочисленные цитаты, взятые из первого русского издания пятитомного «Путешествия по разным провинциям Российской империи» (1773–1788), а также из «Заметок о путешествии в южные наместничества Российской империи в 1793 и 1794 годах». Во многих случаях цитаты были сверены с немецкими оригиналами (1771–1776 и 1799 соответственно).

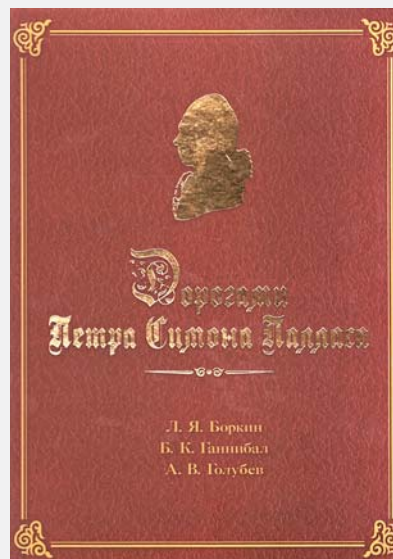
Монография дополнена кратким дневником московского этнографа Е.И.Лариной, которая осенью 2010 г. совершила самостоятельную поездку по западу Казахстана.

Книга состоит из предисловия и трех частей: две первые из них содержат 27 глав с двумя приложениями и посвящены экспедициям 2010 и 2012 гг., а третья («Полевые заметки этнографа») как раз и есть упомянутое дополнение.

Издание прекрасно иллюстрировано: в него включено 439 цветных фотографий, на которых изображены ландшафты, растения и животные, этнографические зарисовки, экспедиционные будни и т.п. Содержатся также репродукции иллюстраций из трудов самого Палласа и из архивов, карты и документы, освещающие работу по проведению поездок.

Данная монография представляет собой значительно дополненное и переработанное издание иллюстрированного научно-популярного отчета 2011 г. «По маршрутам экспедиций XVIII века петербургского академика П.С.Палласа». Ее авторы известны своими профессиональными работами в области зоологии, ботаники и этнографии, а также истории края. Книга насыщена многочисленными сведениями о природе и истории региона, включая этимологические толкования местных названий. Проведено сопоставление карт и топонимов, используемых Палласом, с современными, что позволяет читателю легче ориентироваться в маршрутах знаменитого натуралиста, особенно если учесть, что большинство этих названий в современном Казахстане заменено другими.

Текст написан в лучших традициях научно-популярного издания, прекрасно передавая читателю атмосферу захватывающих занятий натуралистов. Одновременно книга может служить справочным пособием для всех, кто интересуется Прикаспийской низменностью, настоящим перекрестком между Европой и Азией.



Времена и люди Минералогическая коллекция и ее создатели

Е.Л.Минина

Государственный геологический музей им.В.И.Вернадского РАН
Москва

Традиции коллекционирования в России восходят к эпохе Петра I. По его инициативе в 1714 г. был открыт первый публичный музей — Кунсткамера. Это послужило толчком для увлечения «натурными» предметами и создания естественнонаучных частных коллекций. Коллекционирование минералов стало особенно популярно в XIX в., чему способствовало развитие горной промышленности. *История русских минералогов-любителей... до сих пор не написана. Среди них были замечательные люди, были саяновники и богачи, искатели камней — крестьяне, горные служащие и разночинцы. Ими открыты многие новые минералы, благодаря им сохранены драгоценные и важные тела природы, без них не могли бы составиться наши большие государственные коллекции* [1]. Обширная коллекция минералов, хранящаяся сегодня в Государственном геологическом музее им.В.И.Вернадского (ГГМ), формировалась более 250 лет и включает несколько частных собраний. О некоторых из них и пойдет наш рассказ.

Коллекционер граф А.Ф.Келлер

Одной из самых загадочных и неоднозначных личностей среди коллекционеров минералов был граф Александр Федорович Келлер (1883—1946). Выпускник Пажеского Его Императорского Величества корпуса, поручик Кавалергардского полка, полковник Чеченского полка, участник Русско-японской (1904—1905) и Первой мировой (1914—1918) войн, коллекционер, естествоиспытатель, алхимик, воздухоплаватель, эрудит, мистик и масон — это далеко не полный перечень его званий и увлечений. Покидая Россию в 1918 г., граф Келлер оставил в своем родовом имении Сенницы близ Зарайска уникальный домашний естественнонаучный музей, осколки которого в виде разрозненных коллекций чудом уцелели в Государственном геологическом музее им.В.И.Вернадского РАН в Москве и в Историко-архитектурном, художественном и археологическом музее «Зарайский кремль».



Граф Ф.Э.Келлер. 1890-е годы.

Здесь и далее фото из архива М.Келлера

Предками Александра Федоровича были выходцы из Швабии (Германия). Родоначальником русской ветви этого рода стал Теодор Келлер (1791—1860), который поступил на русскую службу и в 1844 г. был возведен в графское достоинство. Все его отпрыски получили прекрасное образование и занимали высокие дипломатические и военные посты. Как большинство немцев, принявших подданство Российской империи, они честно и самоотверженно служили новому отечеству.

Отец Александра, Федор Эдуардович (1850—1904) — генерал-лейтенант, участник нескольких войн: Сербо-черногорско-турецкой (1876 г.), Русско-турецкой (1877—1878 гг.) и Русско-японской (1904—1905 гг.), директор Пажеского корпуса. В марте 1904 г. он добровольно покинул пост губернатора Екатеринослава и отправился на фронт. Погиб 18 июля 1904 г. во время контрнаступления на Янзелинском перевале, в Маньчжурии [2].

Мать Александра, Мария Александровна (1861—1944), — дочь генерал-майора князя А.И.Шаховского и графини А.М.Виельгорской, принадлежала к высшему кругу русской аристократии: ее дед, М.Ю.Виельгорский (1788—1856), был меценатом, композитором, другом А.С.Пушкина, Н.В.Гоголя, М.И.Глинки. Собрание книг и рукописей XVII—XIX вв. из его коллекции ныне хранится в Российской государственной библиотеке. Мария Александровна получила хорошее домашнее образование и занималась благотворительностью: еще до замужества в родовой усадьбе Сенницы (Зарайский уезд Рязанской губ.) открыла частную школу и детский сад для крестьянских детей. Позднее, во время Русско-японской войны, вместе с З.Н.Юсуповой организовала санитарный поезд и госпиталь [3].



Главный усадебный дом в Сенницах. Начало XX в.

Судьба Александра Келлера была предопределена с детства: по традиции родители прочили сыну военную карьеру. Начальное образование он получил в семье, затем был отправлен во Францию и около двух лет прожил в доме маркиза Сент-Ив д'Альвейдра — второго мужа бабушки М.И.Келлер (ур. Ризнич). Писатель-мистик, маркиз оказал огромное влияние на личность юного Александра: *Разговоры Сент-Ива произвели на меня очень большое впечатление, и с этого времени началось мое увлечение историко-религиозными и философскими науками* [4, с.81].

В 1896 г. Александр поступил в 4-й класс Пажеского Его Императорского Величества корпуса. Обладая качествами лидера, он старался быть первым во всем: в учебе, фехтовании, стрельбе, спортивных состязаниях. Распорядок дня в Пажеском корпусе не был слишком суров, и свободное время Александр проводил в компании однокашников, родственников и знакомых: *Последний отпуск я провел на охоте, куда я был приглашен бароном Врангелем. Охота была очень гадкая, но мы все-таки провели время повесело. Прямо с охоты, только переодевшись и умывшись, я поехал к графине Сумароковой, потом обедал у тети Нины* и отправился на цыганский концерт Вьялцевой, куда мне тетя взяла билет. 3 окт. 1900 г.* [5].

В гостях у тети Нины в Мраморном дворце Александр познакомился с Президентом Императорской академии наук, председателем многих научных обществ, членом императорской фамилии



Графиня М.А.Келлер (ур. княжна Шаховская). 1910 г.

* Сестра отца, А.Э.Келлер (1849—1931) — фрейлина Великой княгини Александры Иосифовны.



А. Ф. Келлер в эмиграции. Париж, 1920-е годы.
Государственный музей А. С. Пушкина

К. К. Романовым. Этот один из образованнейших людей своего времени обладал широким кругом интересов, среди которых была и минералогия.

В 1902 г. Александр закончил Пажеский корпус «по первому разряду», по баллам он оказался первым из 40 выпускников и в числе лучших был зачислен в Кавалергардский полк корнетом [6]. За участие в Русско-японской войне был награжден орденом *Анны III степени*. После войны учился в Академии Генерального штаба, но не окончил ее. В 1907 г. он женился на И. В. Скарятиной: *Я никогда не был так счастлив в своей жизни. Ирочка — одна из тех натур, которую невозможно заметить при первой встрече, но которую любишь все больше и больше, когда познакомишься поближе. Очень тонкая, умная, деликатная: милый взгляд и жесты, смертельно ранящие сердце. Я ее обожаю. 11 февр. 1907 г.* [7].

Оставив академию, Александр Федорович большую часть времени проводил в имении Сеницы. Там он и создал настоящий музей естественной истории, включающий зоологическую, палеонтологическую и минералогическую коллекции [8]. Его собрания дополняли уже существующие в усадьбе коллекции: фарфора, живописи, декоративно-прикладного искусства, музыкальных инструментов (300 экз.), оружия и монет, начало которым было положено старшим поколением князей Шаховских и Виельгорских. Частный музей графа Келлера был известен и в научных кругах, его посещали студенты Московского университета. Так, 18 мая 1916 г. приват-доцент Москов-

ского агрономического института И. П. Жолчинский написал графу благодарственное письмо за разрешение осмотреть имение и отобрать образцы грунтов студентам агрономического факультета: *Я позволил себе отправить Вам, граф, как натуралисту-минералогу, выразившему интерес к юной, но мощно развивающейся науке почвоведению, несколько своих печатных работ* [9, л.1].

Первые образцы минералогической коллекции Келлера датируются рубежом XIX—XX вв. Это были подарки от родственников и друзей: агат и кварц от А. Э. Келлер; халькозин с горы Магнитной от Н. Обрехта; золото, серебро, кварц, малахит, диоптаз от семьи Скарятиных. Как писал Мамин-Сибиряк, иногда два-три камня, подаренных совершенно невинному человеку каким-нибудь знакомым, служат началом каменной болезни. Часто бывая за границей, граф покупал минералы в музеях: в Неаполе (Музей палеонтологии, минералогии, зоологии и антропологии Университета Федерико II), в музее Фрайбергской горной академии, в Берлинском университете, Государственном музее минералогии и геологии в Дрездене и в Шведском музее естественной истории в Стокгольме.

Более 350 образцов Келлер приобрел в европейских и русских минералогических конторах: К. Пеха (Берлин), К. Друпа (Дрезден), Ф. Кранца (Бонн). Это палладий (штат Минас-Жерайс, Бразилия), скуттерудит (г. Модум, Норвегия), железо в базальте (г. Бюль, Германия; Гренландия), петцит и сильванит (рудники Сэкэрымб, Румыния); гуа-нахуатит и жозит (Боливия); колорадоит (Австралия). Среди них были и минералы из коллекции известного французского минералога О.-А. Дамура (1808—1902): эвкайрит и умангит из месторождения Сьерра де Уманго (Аргентина), а также собственные сборы ученого.

Десятки образцов поступили из венской конторы А. Отто: штернбергит (г. Яхимов, Чехия); катаплеит, ксенотим и астрофиллит (Норвегия); тефрит, виллемит, гейландит, литиофиллит, брукит (США); иттротанталит (о. Игтерби, Швеция). Граф покупал образцы в Горнопромышленном агентстве по распространению полезных ископаемых России А. К. Денисова (Уральского) и К°, открывшемся на Литейном проспекте в Петербурге в 1903 г. Созданная этим талантливым художником, камнерезом и любителем камня минералогическая контора специализировалась на минералах Урала и предлагала не только отдельные образцы, но и коллекции минералов, камнерезные изделия и ювелирные украшения, живопись и графику. Именно там Келлер приобрел уральские минералы: платину, малахит, топаз, кварц, эшинит, фенакит, турмалин и берилл. Его последние покупки относятся к 1917—1918 гг.: это минералы Урала и Сибири из московской минералогической конторы «Природа и школа» и от частных торговцев — Журавлева (два алмаза из ЮАР), Коноплева и Королева.

Коллекционеры Соколовские

В 1913 г. граф Келлер значительно обогатил свое собрание, состоящее из 400 образцов: в Петербурге он приобрел коллекцию Соколовских (отца и сына), включающую 1143 образца минералов. Лука Александрович Соколовский (1808—1883) — горный начальник Колывано-Воскресенских заводов и Алтайского горного округа, крупный организатор горной отрасли, член Горного совета и учебного комитета, почетный член Минералогического общества в Санкт-Петербурге. В 1827 г. он окончил Горный кадетский корпус и был направлен на Алтай. Начав карьеру шихтмейстером 13 класса, дослужился до горного начальника, генерал-лейтенанта [10]. Лука Александрович прожил на Алтае 25 лет. В начале своей карьеры, на Барнаульском заводе, он работал в лаборатории, занимался химическим разложением свинцово-серебряных руд и преподавал в Горном училище. В октябре 1830 г. по высочайшему повелению его командировали в чужие края для узнания порядка выплавки серебра из разных руд [10, л.5]. Он посетил Швецию, Данию, Пруссию, Саксонию, Австрию. Вернувшись на Алтай в 1833 г., работал над усовершенствованием технологии выплавки серебра. В 1836 г. ему удалось изобрести новый способ извлечения серебра из свинцовых руд

Область интересов Соколовского-старшего была очень широкой: он изучал геологию рудных месторождений, занимался анализами руд и технологий их переработки, одним из первых описал явление контактового метаморфизма (1836). Особое внимание обращал на вторичные изменения вмещающих пород, которые считал признаком рудоносных жил. Соколовского-старшего можно по праву назвать одним из пионеров методики поисков руд. Он руководил экспедицией по разведке угля и внес вклад в изучение Кузнецкого угольного бассейна (1842), в 1843 г. возглавил Колыванскую гранитную фабрику. Будучи активным деятелем Императорского минералогического общества, Лука Александрович способствовал расширению его коллекций, в том числе передал собрание минералов Ю.И.Эйхвальда* [11]. Помогал формированию музейных коллекций, пополнял коллекции «Горного музеума» в Барнауле, основанного в 1823 г. (сегодня это Алтайский государственный краеведческий музей).

В личную коллекцию Л.А.Соколовского вошли его собственные сборы, подарки от деятелей горного ведомства, минералогов и коллекционеров. Особенно широко были представлены минералы алтайских месторождений. За счет обмена с коллегами коллекция обогатилась минералами Забайкалья и Урала: присутствовали образцы от Ю.И.Эйхвальда, в том числе — еремеевит (брат

алюминия), впервые найденный им на горе Сокутой (Забайкалье); другой брат — гидрорацит из коллекции его первооткрывателя Г.Гесса; образцы, переданные полковником Корпуса горных инженеров И.Р.Лисенко — первооткрывателем месторождений графита и золотых россыпей в Златоустовском округе Южного Урала.

Младший Соколовский, Александр Лукич (1837—1915), — выпускник Александровского лицея, действительный статский советник, издатель и переводчик, в 1898 г. опубликовал 8-томный труд «Шекспир в переводе и объяснении А.Л.Соколовского», издавал «Энциклопедию для юношества». Он интересовался естественными науками: в 1884 г. вступил в Императорское минералогическое общество [12], был членом Физико-химического общества. Для него, литератора и любителя минералогии, важнее всего была красота камня. Он продолжил дело отца, расширив коллекцию покупками в европейских минералогических конторах. К концу XIX в. коллекция насчитывала более 300 минеральных видов и, несомненно, была выдающимся собранием минералов, которое хорошо знали минералоги и любители камня того времени. Так, на заседании Минералогического общества 10 февраля 1881 г. выступал студент Горного корпуса С.Н.Кулибин с докладом о некоторых минералах из этой коллекции [13].



Л.А.Соколовский — горный начальник Колывано-Воскресенских заводов. 1860-е годы.

Фототека отдела истории геологии,
Геологический институт РАН.

* Юлий Иванович Эйхвальд (1827—1900) — горный инженер, начальник Нерчинских заводов.

Судьба минералогической коллекции и ее обладателя

Времена и люди

Итак, в 1913 г. коллекция Соколовских попадает в руки графа Келлера — естествоиспытателя, оккультиста и мистика. Для него минералогия была далеко не единственным увлечением: он собирал насекомых, чучела птиц и животных, монеты, оружие, археологические артефакты. Минералы, их состав и морфология кристаллов были для него одним из способов познания мира, предметом химических и алхимических опытов. Недаром он дополнил коллекцию Соколовских большим количеством новых и редких минералов. В 1918 г. коллекция Келлера, включавшая собрание Соколовских XIX в., насчитывала 1609 образцов около 400 минеральных видов из нескольких сотен местонахождений в 40 различных странах. Европейский континент представлен минералами наиболее значимых и известных месторождений и рудных районов, среди которых Гарц, Фрайберг, Шварценберг (Германия); Яхимов, Пшибрам (Чехия); Фельзобаня (Румыния); Камбрия, Дербишир, Корнуол (Англия); Идрия (Словения); Альмаден (Испания); Зальцбахталь, Циллерталь, Швац (Австрия); Бавено, Пьемонт, Сицилия, Эльба, Везувий (Италия); Изер (Франция); Арендаль, Модум, Консберг, Лангезунд (Норвегия). Минералы Боливии, Бразилии, Чили, Мексики, США и Канады демонстрировали богатство Американского континента. Особенно ценными были минералы Бразилии: золото, алмаз, палладий, топаз, турмалин (индиголит, эльбаит), жозеит, андалузит, эвклаз. Минералы Азии присутствовали в небольшом количестве, это самоцветы о.Цейлон, минералы Китая и Японии.

Благодаря сборам Соколовских в коллекции особенно хорошо отражена минералогия Алтая, Урала и Восточной Сибири. Множество алтайских минералов пегматитовых и грейзеновых жил Адун-Чилонского гранитного массива и Шерло-

вой горы — берилл, аквамарин, топаз; теллуриды Новонадеждинского и Заводинского рудников, алтаит и гессит, малахит и азурит из Змеиногорского и Золотушинского рудников, золото и серебро из Зыряновского, Риддерского, Семеновского и Салаирского рудников. Урал был представлен минералами Нижнетагильского района (платина, золото, малахит); золоторудного Березовского района (золото, галенит, пирит, кварц, минералы зоны окисления — англезит, церуссит, пироморфит, крокоит, вокеленит); пегматитовых копей Мурзинки и Изумрудных копей (берилл, турмалин, топаз, хризоберилл, изумруд, фенакит); Ильменских гор (эшинит, монацит, канкринит, самарскит, ильменорутит, хиолит; драгоценные и поделочные камни: турмалин, корунд, топаз, аквамарин, гранат); Златоустовского округа (кианит, перовскит, содалит, нефелин; эвклаз) из россыпей р.Санарки.

Коллекцию А.Ф.Келлера отличало богатство и многообразие минеральных видов (более 400, тогда как к началу XX в. их было известно всего 700). Богатство коллекции самородными минералами и сульфидами, вероятно, связано с тем, что ее собиратель проводил опыты по разложению минералов, пытаясь повторить эксперименты маркиза Сент-Ив д'Альвейдра: *...Он рассказал мне о своих химических опытах. Они доказывали логическую необходимость существования первичной материи, из коей образовались впоследствии все отдельные элементы. Он говорил, что можно при помощи великого растворителя le grand solvant перевести все элементы в это первичное состояние. <...> Он мне показывал результаты своих опытов в виде небольших образований... добытых им алхимическим путем. Он также показал мне красный порошок, который назвал одной из стадий дематериализованной материи, тем, что в древности называли «философским камнем» [4, с.82—83].*



Кварц скипетровидный (Алтай, Россия). 9.0 × 6.0 × 6.0 см. ГГМ №МН-22525.



Аквамарин (хребет Адун-Чолон, Забайкалье, Россия). ГГМ №МН-21683.

Позднее Дмитрий Шереметев, его «брат» по масонской ложе, вспоминал: *Не было ни одной отрасли знания, которой бы он не интересовался и которую бы не изучал: не только гуманитарные науки: история, социология, философия, археология, нумизматика, но и математика, астрономия, химия, минералогия и астрология. Он часто уезжал к себе в деревню и подолгу жил там, окруженный книгами, географическими картами, химическими колбами, минералами и древними монетами. Весь мир для него был словно символ, в тайну которого он пытался проникнуть* [14]. С началом Первой мировой войны граф А.Ф.Келлер поступил во вновь сформированный Чеченский полк в составе Кавказской туземной дивизии, известной как «Дикая дивизия». В феврале 1915 г. за проявленную отвагу он был награжден Георгиевским крестом 4-й степени.

После Октябрьской революции имение Сенницы экспроприировали, большинство вещей было разграблено, и лишь некоторые предметы быта и искусства поступили в Зарайский историко-художественный музей. Вот как описывала графиня М.А.Келлер события того времени: *Сидор, наш буфетчик, Сидор, прослуживший у нас более 30 лет, пенсионер, которому я помогла купить землю, построить дом, которого все мы считали своим другом, вошел в гостиную, уселся в мое изящнейшее парчовое кресло XVIII века, положил ноги на другое такое же и, нагло глядя в лицо управляю-*



Голубая разновидность берилла — аквамарин (Мадагаскар). $2.2 \times 2.0 \times 1.8$ см. ГГМ №МН-21682.



Желтая разновидность берилла — гелидор (село Мурзинка, Средний Урал). $12.0 \times 3.0 \times 3.0$ см. ГГМ №МН-19994.

щего, закричал: «Довольно вы нашей крови попили, теперь на нашей улице праздник» [15, с.54—55].

Осенью 1918 г. Александр Федорович с новой женой Н.И.Крузенштерн, дочерью офицера Балтийского флота, бежали из Петербурга, воспользовавшись одной из секретных переправ, существовавших тогда в районе станции Белоостров. Этому предшествовала семейная трагедия: смерть маленького сына и развод с Ириной Скарятиной. Александр Федорович с новой семьей обосновался в Стокгольме, а 16 июня 1919 г. у них родилась дочь Анна. В 1920 г. семья переехала из Стокголь-



Кварц с включениями рутила (Ле-Бур д'Уазан, Франция). $5.3 \times 2.4 \times 1.7$ см. ГГМ №МН-3976.



Миллерит, сульфид никеля (рудник Фридрих, Виссен, Германия). $7.0 \times 3.0 \times 2.0$ см. ГГМ №МН-25997.



Диоптаз (месторождение Алтын-Тюбе, Казахстан).
5.5 × 5.5 × 4.0 см. ГГМ №МН-21789.

ма во Францию и обосновалась в Париже, где графу удалось устроиться служащим банка, которым он оставался до 1927 г. В 1928 г. Келлер работал в английской нефтяной компании в Ираке, затем участвовал в геолого-геоморфологической съемке в Сирийской пустыне [16]. В 1930-х годах граф получал доходы от недвижимости на Лазурном берегу, трудился в Лиге наций в составе русских эмигрантских комитетов, его жена Нина работала машинисткой. В кругах русских эмигрантов его хорошо знали также как нумизмата и археолога-любителя [17, с. 386]. Как вспоминал Н.И.Кривошеин, современники графа отмечали его эрудицию и остроумие. Реальная жизнь не слишком привлекала Александра Федоровича. В 1920 г. состоялось его посвящение в Англо-саксонскую масонскую



Ураноцирцит — редкий минерал из группы урановых слюдок с интенсивной желтовато-зеленой люминесценцией (провинция Берген, Фалькенштейн, Германия). 2.5 × 2.0 × 0.5 см. ГГМ №МН-22301.



Топаз (Бразилия). 2.5 × 1.5 × 1.2 см.
ГГМ №МН-21850.

ложу в штаб-квартире на Рю де л'Ивет, затем он присоединился еще к нескольким ложам. В каждой из них выполнял определенные функции: оратора и архивиста, библиотекаря, хранителя печати и меча, агоначальника (трапезначальника). В 1935 г. в консистории «Россия» был возведен в 31-ю степень посвящения, в 1945 г. стал членом Археопага. Его жена Нина входила в женскую масонскую ложу «Аврора», где была сестрой в 1929—1930 гг. [17, с.109]. Русские масонские ложи в эмигрантской среде были неким клубом, объединяющим соотечественников. Помимо поисков истины, познания природы, бытия и внутреннего смысла жизни, масоны активно участвовали в социальной жизни русских беженцев: в работе эмигрантского комитета по делам беженцев, академической группы, научно-философского общества, в благотворительных фондах. В 1939 г. Александр Федорович получил в наследство от дяди, А.Э.Келлера, часть архива своего воспитателя маркиза. Среди прочего там были три пакетика золота, добытого (по утверждению маркиза) алхимическим путем. На рубеже 1939/1940 гг. эти «бесценные» пакетики граф Келлер передал Н.Л.Голеевскому*: *Он (Сент-Ив) умер, оставив свою библиотеку и архив моему дяде А.Э.Келлеру. После смерти последнего в 1939 г. помимо других вещей мне достались 3 пакетика, на которых рукой Сент-Ив д'Альвейдра была написана дата алхимического опыта и точный вес, заключенный в каждом из золотых образцов, полученных алхимическим путем. <...> Пакет с образцом золота весом в 0,286 г, добытого во время опыта 5 октября 1893 г., передан мною командору русского масонства древне-*

* Николай Лаврентьевич Голеевский (1878—1958) — полковник Генштаба, атташе в США, эмигрант (Париж, Франция), монархист, масон, узник концлагеря Компень, активист движения по возвращению в СССР.

го и принятого шотландского устава Николаю Лаврентьевичу Голеевскому для заключения в командорской ленте.

Граф А.Ф.Келлер (31 градус), Париж 26 декабря 1939 г. Получил 1 января 1940 г. Н.Л.Голеевский (33 градус). Знак восьмиконечного креста. Свидетели: граф Д.А.Шереметев, Г.Н.Товстоless, Н.Л.Голеевский и др. [4, с. 84].

Александр Федорович скончался 18 июня 1946 г. в Париже и был похоронен на кладбище Сент-Женевьев-де-Буа. Через год, 26 июня 1946 г., мастера ложи «Северное сияние» почтили память А.Ф.Келлера, одного из лидеров ложи. Еще за две недели до смерти он вспоминал слова Гегеля: если я допускаю свою личность к влиянию на свои выводы, значит, я плохо мыслю. И говорил, что метафизическое мышление и объективность достигаются именно исключением личности мыслящего. Как он неоднократно говорил, надо стремиться, чтобы центр микрокосмоса совпадал с центром макрокосмоса. Теперь, когда эти два центра соединились в единой непостижимой точке, земной путь Александра Федоровича окончен, но среди нас он будет жить всегда, как почитаемый учитель и мастер, готовый поделиться всеми знаниями и опытом, и как добрый и любимый брат [4, с.81].

«Брат» Н.Л.Голеевский, получивший от Келлера алхимическое «золото», вскоре женился на его вдове Нине, и они «чудесным образом» сумели получить все наследство семьи Келлер — деньги в швейцарском банке от продажи вилл на Лазурном берегу бесследно исчезли. После Второй мировой войны Голеевский стал одним из активистов движения по возвращению на родину. В 1954 г. он с женой отбыл в Советский Союз.

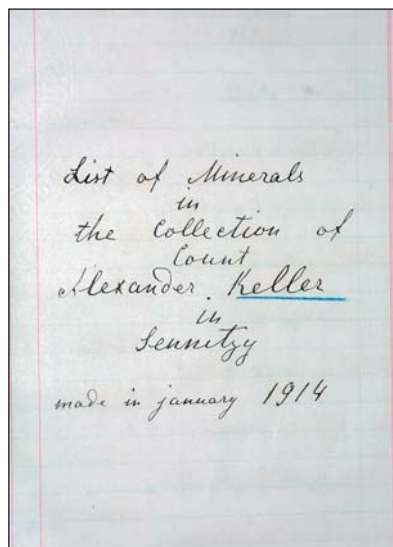
Минералогическую коллекцию Келлера экспроприировали в 1918 г. в имении Сенницы и сразу же передали в отдел народного образования. Через два года благодаря усилиям руководителей Московской горной академии Н.М.Федоровского и Д.Н.Артемьева коллекция поступила во вновь созданный музей академии. По составленной описи, оформленной как «Список минералов, принятых от рязанского отдела народного образования (коллекция бывш. гр. Келлера) для эвакуации в Московскую горную академию, 5 июня 1920 г.» коллекция насчитывала 1218 образцов. Однако в авторском каталоге «List of Minerals in the collection of Count Alexander Keller in Sennitsy, made January 1914» в ней числилось 1609 образцов: еще до поступления в Горную академию из коллекции бесследно исчезло около



Эритрин — минерал класса арсенатов (месторождение Шнееберг, Рудные горы, Германия). 7.0 × 5,0 × 2.0 см. ГГМ №МН-22262.

400 образцов. Каталог включал: название минерала, химический состав, местонахождение, способ поступления в коллекцию. В отдельной графе приводился расчет формул минералов, а в примечании — данные об авторе минерального вида или о месте первой находки минерала.

Современное состояние коллекции сильно отличается от перечня авторского каталога: в настоящее время сохранилась только третья часть коллекции (656 образцов 325 минеральных видов). Потери были связаны с перемещением коллекции и использованием ее в учебном процессе. Серьезный урон понесли наиболее ценные образцы: ал-



Титульный лист и страница каталога минералогической коллекции графа Келлера. ГГМ РАН.

мазы, золото, серебро, опал, сапфир, рубин и александрит.

Итак, в коллекции графа Келлера соединились три эпохи и три собирателя: Л.А.Соколовский (первая половина — середина XIX в.), А.Л.Соколовский (конец XIX в.) и граф А.Ф.Келлер (начало

XX в.). У каждого из этих коллекционеров были собственные, отличительные мотивы для сбора минералов. Несмотря на столь разных собирателей — геолога, литератора и кавалергарда-окультиста, сегодняшняя коллекция представляет собой единое минералогическое собрание. ■

Литература

1. Вернадский В.И. Гёте как натуралист // Бюлл. МОИП. Отд. геологии. 1946. Т. XXI(1). С. 15—40.
2. Авчинников А.Г. Памяти гр. Ф.Э.Келлера. Екатеринослав, 1909.
3. Келлер Ф.Э. 1809. 1836—1915. РГВИА. Ф.189. Оп.1. Д.524. Л.1.
4. Серков А.И. История русского масонства XX века: В 3 т. 2009. Т.3.
5. Келлер (фон Флото) Мария Александровна. 1891—1914. ЦИАМ. Ф.1744. Оп.1. Д.б. Л.7—8.
6. Левшин Д.М. Пажеский корпус за 100 лет. Т.2. СПб., 1902.
7. Келлер Ф.Э. 1809, 1836—1915. РГВИА. Ф.189. Оп.1. Д.629. Л.35—37.
8. Лялин С.П., Минина Е.Л. История усадьбы Сенницы // Русская усадьба: Альманах. 2004. Вып.9 (25). С.498—507.
9. Келлер Ф.Э. 1809, 1836—1915. РГВИА. Ф.189. Оп.1. Д.382.
10. Формулярный список о службе и достоинстве горного инженер-полковника Соколовского. 1847. РГИА. Ф.44. Оп.1. Д.526. Л.1—12.
11. Протоколы заседаний Императорского Санкт-Петербургского минералогического общества // Зап. СПб. минерал. об-ва. 1869. Ч.4. С.326.
12. Перозин П.Н. Список членов Императорского Санкт-Петербургского минералогического общества. СПб., 1890.
13. Кулибин С.Н. Описание кристаллов гроссуляра, букландита, перовскита, топаза из коллекции Л.А.Соколовского // Зап. СПб. мин. об-ва. 1882. Ч.17. С.360—362.
14. Шереметев Д.А. Памяти брата А.Ф.Келлера // Русский вольный каменщик. Париж, 1946. №2. С.21.
15. Keller M.A. A Russian man and her home. 1915—1920. (manuscript) / Пер. рукописи с англ. Андреевой Г.П.
16. Геологи российского зарубежья: судьбы и вклад в мировую науку: Научно-энциклопедический сборник по истории геологии / Ред.-сост. П.Чумаченко, О.Дитл. София, 2014.
17. Серков А.И. Русское масонство. 1731—2000: Энциклопедический словарь. М., 2001.

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О.АСТАХОВА
М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА
К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА
М.Е.ХАЛИЗЕВА

О.И.ШУТОВА
А.О.ЯКИМЕНКО

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:
С.В.ЧУДОВ

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук
Издатель: ФГУП «Академиздатцентр «Наука»,
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

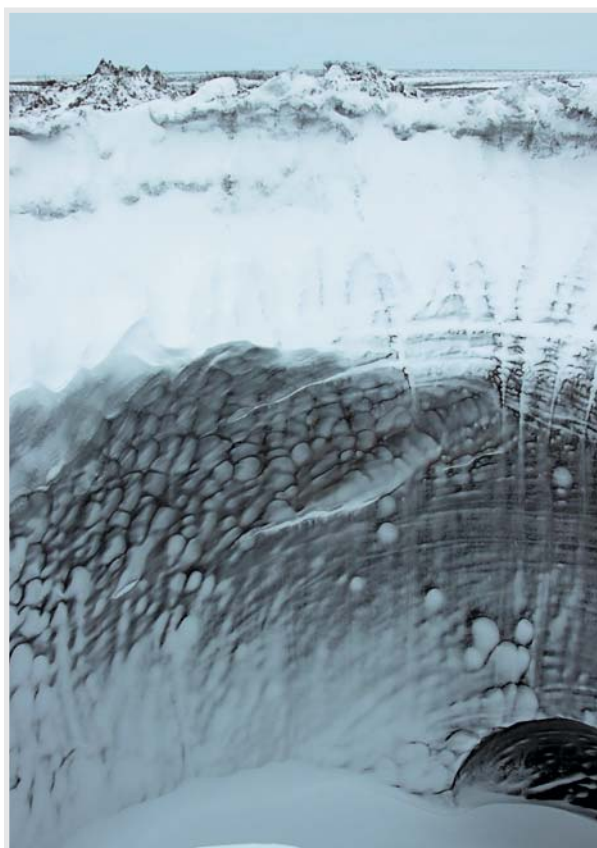
Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 17.12.2015
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Офсетная печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 366 экз.
Заказ 880
Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Академиздатцентр «Наука»,
(типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., 6

© ФГУП «Академиздатцентр «Наука», 2016
© Составление.
Редколлегия журнала «Природа», 2016

в следующем номере



Осенью 2013 г. в тундре Центрального Ямала было обнаружено новое явление — так называемая воронка газового выброса. Она образовалась в результате ранее не наблюдавшегося процесса, который можно рассматривать как реакцию зоны вечной мерзлоты на колебания климата. Повышение здесь температуры воздуха в течение последнего десятилетия (особенно положительный экстремум лета 2012 г.) привело к высвобождению газа (в основном, метана) из мерзлых пород и подземного льда, в том числе, возможно, из газогидратных скоплений. Поскольку, скорее всего, этот экстремум не последний, то в будущем подобные воронки могут образоваться в подходящих геологических и криогенных условиях и на других территориях.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. НОВЫЙ ПРИРОДНЫЙ ФЕНОМЕН В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ.

