

ПРИРОДА

9 12



В НОМЕРЕ:

3 Александров П.А., Калечиц В.И., Сотсков В.П.

**Предупредить аварию:
это носится в воздухе**

Практически любое нарушение хода технологических процессов и другие аварийные ситуации сопровождаются генерацией аэрозолей. На основе этого можно построить чрезвычайно чувствительную методику раннего обнаружения аварийных ситуаций.

14 Балезина О.П.

Многоликий кальций

О широкой распространенности кальция в природе и его важности для нормальной жизнедеятельности организмов знают почти все. Но уникальная роль кальция как внутриклеточного сигнализатора открылась совсем недавно. Понять механизм действия этих сигналов, а главное научиться управлять ими — актуальная задача современной науки.

22 Ильин А.В.

Феномен симметрии дна океана

Наглядным примером геометрической симметрии дна океана служит дно Атлантического океана, разделенное Срединно-Атлантическим хребтом на две равновеликие части. Изящной змейкой расположился он между современными материками, в точности повторяя их внешние очертания.

32 Верещака Т.В.

Основная карта России

Для всей территории нашей страны существуют топографические карты разных масштабов. Они необходимы для решения экономических, оборонных и научных задач, а также для развития самой картографии. Создание и постоянное обновление карт — сложный и трудоемкий процесс.

39 Расницын А.П.

Когда жизнь и не думала умирать

Одна из крупнейших катастроф биосферы в истории Земли, произошедшая на рубеже перми и триаса, как оказалось, не коснулась насекомых. Похоже, жизнь тогда и не думала умирать, вопреки общепринятому мнению. Важно понять, касается ли это только пермотриасового кризиса или же это общая картина.

49 Шариков Ю.Н., Якобсон К.Э., Комиссар О.Н.

**Геологические аспекты
строительства дольменов Кавказа**

Кавказские дольмены — одно из самых загадочных археологических явлений времен ранней бронзы. Открытие и изучение флюидолитов Северо-Западного Кавказа позволило по-новому взглянуть на технологию строительства этих древних мегалитических сооружений.

58 Левицкий М.М., Перекалин Д.С.

Невозможные реальные кристаллы

Открытие Даниэлем Шехтманом квазикристаллов — одно из самых необычных в химии. Он увидел дифракционную картину из своеобразно расположенных светящихся точек, которая противоречила всем канонам кристаллографии. «Этого просто не может быть!» — сам себе сказал Шехтман. Разобраться в новой структуре помогли математики, «упражнявшиеся» в создании неперриодических мозаик и нашедшие их в древних орнаментах, украшающих мечети.

Лекторий

69 Бялко А.В.

От местного климата к глобальному

77 Космачевская Э.А., Громова Л.И.

**Необычный юбилей в Музее-квартире
академика И.П.Павлова**

Рецензии

86 Сурдин В.Г.

Почему Вселенная темная?

(на кн.: В.П.Решетников. Почему небо темное. Как устроена Вселенная)

89

Новые книги

В конце номера

90 Трейвус Е.Б.

**Первооткрывательница
отечественных коренных алмазов
Лариса Попугаева**

CONTENTS:

3 Aleksandrov P.A., Kalechits V.I., Sotskov V.P.

Accident Prevention: This Is in the Air

Practically any disturbances in technological processes and other emergency situations are accompanied by aerosol generation. On this basis, exceptionally sensitive method of early detection of emergency situations can be developed.

14 Balezina O.P.

Multifaceted Calcium

Almost everybody knows about the prevalence of calcium in nature and its importance for normal function of living organisms. But the unique role of calcium in intracellular signaling has been discovered only recently. To understand mechanism of action of these signals and, most importantly, to learn how to control them is an urgent task of modern science.

22 Ilyin A.V.

Phenomenon of Symmetry of Ocean Floor

A good example of geometrical symmetry of the ocean floor is the floor of Atlantic divided by mid-ocean ridge into two isometric parts. It runs as an elegant serpent-like line between modern continents closely repeating shapes of their borders.

32 Vereshchaka T.V.

The Principal Map of Russia

Topographic maps of different scales exist for the whole territory of our country. They are needed for solving economical, military and scientific problems, as well as for development of cartography itself. Working-out and permanent updating of maps is a complex and time-consuming task.

39 Rasnitsyn A.P.

When Life Had no Urge to Die

One of the biggest biosphere catastrophes in the Earth history which occurred at Perm-Triassic boundary, as it turned out, did not affected insects. It seems, contrary to widespread belief, life this time had no urge to die. It is important to understand if this pertains only to Perm-Triassic crisis or an example of a general picture.

49 Sharikov Yu.N., Yakobson K.E., Komissar O.N.

Geological Aspects of Caucasian Dolmens Building

Caucasian dolmens belong to the most enigmatic archaeological artifacts of early bronze age. Discovery and study of fluidolites of North-West Caucasus suggested a new view on technology of erection of these ancient megalithic edifices.

58 Levitsky M.M., Perekalin D.S.

Impossible Real Crystals

Discovery of quasicrystals by Daniel Shechtman is one of the most unusual in chemistry. He observed a diffraction picture consisting of specifically arranged bright dots which contradicted all canonic rules of crystallography. «This is simply impossible!» — said Shechtman to himself. To make sense from this new structure helped mathematicians attempting to create non-periodic mosaics and found them in ancient ornaments embellishing mosques.

Lectures

69 Byalko A.V.

From a Local Climate to the Global One

77 Kosmachevskaya E.A., Gromova L.I.

Unusual Anniversary in Apartment Museum of Academician I.P.Pavlov

Book Reviews

86 Surdin V.G.

Why Universe Is Dark? (on book: V.P.Reshetnikov. Why the Sky Is Dark. How the Universe Is Arranged)

89 New Books

In the End of the Issue

90 Treyvus E.B.

The Pioneer of Domestic Indigenous Diamonds Larisa Popugaeva

Предупредить аварию: это носится в воздухе

П.А.Александров, В.И.Калечиц, В.П.Сотсков

Внаши дни уже никому не надо объяснять, сколь тяжелыми могут быть последствия аварий — достаточно вспомнить пожар на Останкинской башне или недавнюю трагедию на Саяно-Шушенской ГЭС. Используемые в промышленности технические системы и технологические установки становятся все сложнее и сложнее, и вероятность отказов и поломок оборудования неминуемо возрастает. Поэтому все важнее иметь надежные средства контроля и диагностики аварийных состояний. Обычно обнаружить аварию удастся лишь по ее последствиям. Как правило, регистрация таких событий ведется датчиками, фиксирующими отклонение процесса по какой-либо характеристике от нормального хода (отсутствие давления, снижение или повышение температуры, прекращение подачи электропитания или изменение параметров электрических цепей, падение уровня жидкости и т.д.). А ведь ущерб от аварии тем больше, чем на более поздней стадии она обнаружена. Гораздо предпочтительнее системы контроля, способные зафиксировать нештатную работу оборудования в самой ранней, предаварийной, фазе и тем самым предотвратить фатальную поломку.

Перед подобными системами стоит очень непростая задача: распознать начало сбоя в работе

© Александров П.А., Калечиц В.И., Сотсков В.П., 2012



Петр Анатольевич Александров, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института информационных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Область научных интересов — физика поверхности и нанотехнологии.



Вадим Игоревич Калечиц, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории оптических аэрозольных приборов того же института. Специалист в области лазерной диагностики дисперсных сред, технологии чистых производственных помещений.



Владимир Павлович Сотсков, аспирант Московского физико-технического института. Защитил диссертацию магистра по исследованию эмиссии аэрозольных микрочастиц при механических нагрузках.

техники на фоне флуктуирующего и подверженного периодическим изменениям сигнала. Немотивированная остановка контролируемого процесса чревата

неоправданными экономическими потерями. Выход видится в сочетании различных методов, с тем чтобы разные факторы, принципиальные для одного ме-

тогда, оказывали слабое влияние на результаты, даваемые другим. Такой подход плюс адекватная обработка информации позволяют выдавать надежные данные в начале аварийного развития процесса. Например, в атомной энергетике — области, где цена аварии действительно очень высока, принята концепция «течь перед разрушением». Чтобы избежать разрыва основного трубопровода высокого давления, для диагностики течи используются по крайней мере три метода, основанные на различных физических принципах: определение влажности, измерение акустического шума от струи и регистрация радиоактивности. Подбор оптимальной комбинации весьма непрост, поэтому поиски новых методов контроля в этой области не прекращаются.

Сигнализируют микрочастицы

В Институте информационных технологий (ИИТ) Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» разработана принципиально новая система раннего обнаружения аварийных и предаварийных состояний (система РОАП). Она базируется на мониторинге микрочастиц различного размера в технологических средах и в воздухе производственных помещений [1, 2].

Под микрочастицами мы здесь понимаем детектируемые оптическими способами объекты диаметром 0.1–100 мкм, взвешенные в оптически прозрачной среде (воздухе, воде, масле и др.). Регистрация отдельных частиц в указанном диапазоне размеров представляет собой уникальный способ обнаружить аварийные ситуации различной природы. Это связано с тем, что практически любое значительное изменение режима работы установок или оборудования, нарушение хода технологического процесса и другие нештатные состояния сопровож-

даются резкими колебаниями (как правило, в сторону усиления) генерации микрочастиц. Например, значительное количество аэрозольных (взвешенных в воздухе) частиц выделяется при горении любых материалов, искрении электроконтактов, нагревании и термической деструкции веществ, механической эрозии материалов, испарении и кипении жидкостей, туманообразовании и т.д. Аналогичные явления наблюдаются не только в воздухе, но и в других технологических средах. Износ пар трения вызывает рост концентрации механических примесей в масле редукторов и двигателей, локальные пробои и разрушение изоляции приводят к увеличению числа микрочастиц в масляных трансформаторах, загрязнение гидравлических жидкостей указывает на развивающуюся неисправность, которая может привести к выходу из строя силовых механизмов.

Эксперименты, проведенные в ИИТ и совместно с другими организациями, доказали: изменение счетной концентрации частиц (количества аэрозольных частиц в единице объема воздуха) в замкнутом пространстве сопровождают все перечисленные явления. И что осо-

бенно важно — регистрировать эти изменения удастся на очень ранней стадии, часто до появления каких-либо видимых признаков проблемы. Это позволяет не только зафиксировать факт возникновения аварийной ситуации, но и предотвратить ее. Более того, приборы контроля микрозагрязнений измеряют не только счетную концентрацию, но и дисперсный состав частиц (распределение частиц по размерам); во многих случаях прослеживается его связь с характером развивающейся неисправности. Таким образом, появляется шанс диагностировать нежелательные процессы в ходе работы различного оборудования инструментальными методами.

Для регистрации взвешенных в воздухе частиц чаще всего используются лазерные счетчики аэрозолей — фотоэлектрические приборы, определяющие количество прошедших через измерительный объем частиц по числу рассеянных ими импульсов света. Обобщенная оптическая и пневматическая схема такого прибора изображена на рис.1. Тонкая струя аэрозоля прокачивается через сфокусированный луч лазера, причем диаметр струи подбирается таким образом, чтобы в луче находилось,

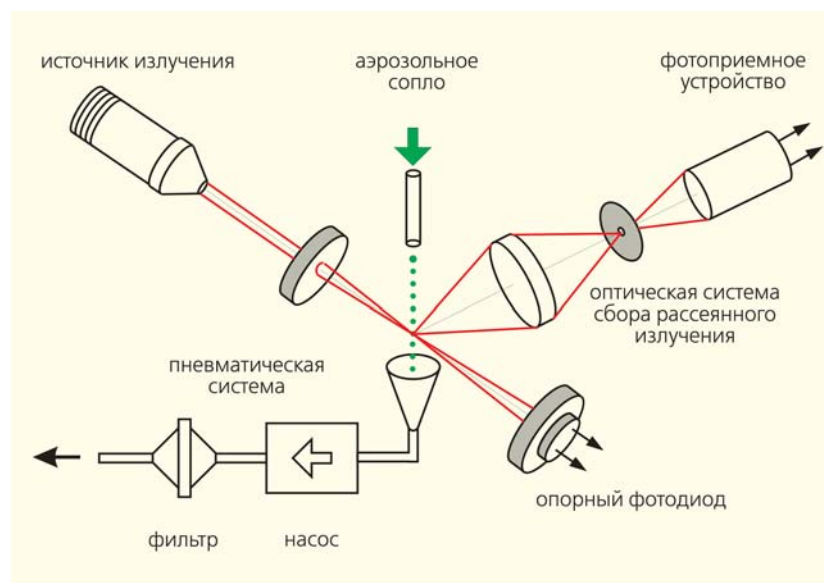


Рис.1. Схема детектирования аэрозольных микрочастиц.

как правило, не более одной аэрозольной частицы. Свет, рассеянный каждой отдельной частицей, собирается оптической системой и направляется на фотоприемное устройство. Опорный диод служит для стабилизации уровня излучения источника света. Световые импульсы преобразуются фотоприемником в электрические, амплитуда которых связана с геометрическим размером частиц. Одновременно прибор измеряет количество воздуха, прошедшего через измерительный объем, что позволяет легко рассчитать концентрацию частиц.

Работы по исследованию генерации частиц в ходе различных технологических процессов были инициированы группой исследователей НИЦ «Курчатовский институт», занимавшихся разработкой систем фильтрации и диагностики аэрозолей для электронной и атомной промышленности. Ранее ИИТ осуществлял научное руководство программой создания отечественной промышленности чистых производственных помещений. Оказалось, что используемые в технологии чистых помещений методы и аппаратное обеспечение после некоторой адаптации можно с немалой эффек-

тивностью применить и в смежных областях, в частности при тестировании технологического оборудования и обнаружении аварийных и даже предаварийных ситуаций. Основные эксперименты были проведены на стендах в лабораториях НИЦ «Курчатовский институт», НПО «Центральный котло-турбинный институт им.И.И.Ползунова» (Санкт-Петербург), НПО «Гидропресс», Института проблем комплексного освоения недр (ИПКОН) РАН, Института машиностроения им.А.А.Благонравова РАН (ИМАШ), на Курской и Нововоронежской АЭС. В ходе многосторонних дискуссий наметился целый ряд направлений использования систем РОАП, к краткому обсуждению которых мы и перейдем.

Под присмотром электрооборудование

Перспективность мониторинга аэрозолей для контроля состояния электрического оборудования показали экспериментальные исследования процессов генерации частиц при моделировании штатных и предаварийных ситуаций на лабораторных стендах [2] и в условиях произ-

водства. Специально сконструированный и смонтированный в НИЦ «Курчатовский институт» стенд главным узлом имеет герметичную аэрозольную камеру, в которую на время эксперимента помещался исследуемый объект. Камера как перед проведением измерений, так и после них продувалась чистым воздухом, поступающим внутрь через высокоэффективные воздушные фильтры. Измерительная часть включает лазерный счетчик аэрозолей с подключенным к нему осциллографом, чтобы визуально контролировать частоту следования и амплитуду импульсов.

Самая распространенная причина отказа электрооборудования — перегрев электротехнических узлов и элементов (вплоть до их выхода из строя) и изоляционных материалов (вплоть до их термического разрушения). Поэтому роль аварийного фактора играл нагрев различных компонентов, в ходе которого измерялись дисперсный состав и счетная концентрация образующихся частиц. Некоторые характерные результаты измерений представлены на рис.2.

Ход временной зависимости образования аэрозолей при термодеструкции винила (рис.2,а), широко используемого изоля-

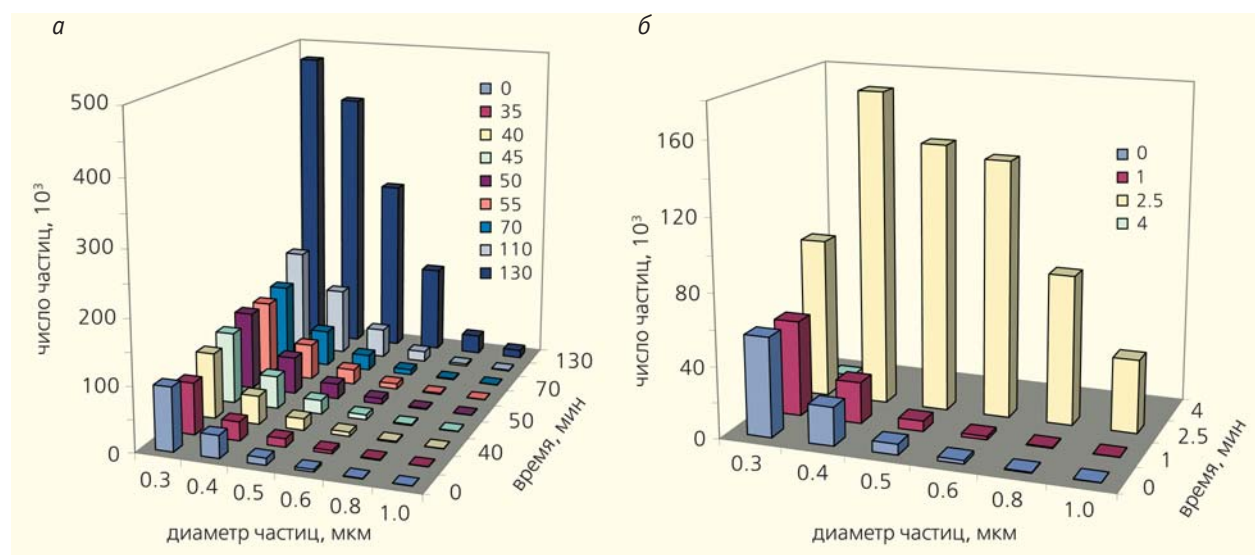


Рис.2. Дисперсный состав и счетная концентрация аэрозолей, образующихся при нагреве виниловой изоляции (а) и при искрении электроконтактов (б). Время отсчитывается с момента начала нагрева.

тора, подтверждает известный факт, что на ранних стадиях термического разрушения полимеров выделяется высокодисперсный аэрозоль с размером частиц менее 0.1 мкм. Для регистрации частиц диаметром менее 0.3 мкм в данном эксперименте чувствительности прибора было недостаточно, поэтому в начальной стадии измерений показания счетчика частиц не изменяются. Далее, по мере роста концентрации, высокодисперсные частицы начинают коагулировать; получившиеся конгломераты, в свою очередь, тоже слипаются и т.д. Как только размер «подросших» частиц достигает предела чувствительности, прибор начинает регистрировать быстрый рост концентрации последовательно во всех диапазонах. Интересно отметить, что запаздывание реакции счетчика довольно значительно — около часа. Из рисунка также видно, что распределения аэрозольных частиц по размерам при нагреве изоляции и при искрении электроконтактов существенно различаются.

Отметим, что эти результаты относятся к серии опытов, в которых повышение температуры изоляции было минимальным (измерения проводились при мощности нагрева 0.15 Вт

и скорости выделения тепла 0.01 кал/с). В опытах с большей мощностью нагрева регистрация начала быстрого роста числа субмикронных частиц запаздывала значительно меньше (всего на 2—5 мин), а сам рост происходил более стремительно. Таким образом, удалось экспериментально засечь стадию беспламенной термодеструкции изоляционных материалов, предшествующую моменту воспламенения (запас по времени в зависимости от конкретных условий составляет от нескольких минут до нескольких часов).

Когда потечет паропровод?

Обычно утечка из паропровода обнаруживается в лучшем случае в момент, когда ее уже нужно немедленно устранять и, скорее всего, срочно останавливать работу технологического оборудования. С помощью системы РОАП можно не только зафиксировать течь на начальной стадии, но и в принципе оценить время, за которое она достигнет критического уровня и станет опасной. Следовательно, персонал будет способен решить, требуется ли аварийная остановка или можно подождать (без боль-

шого риска) до планового ремонта оборудования.

Чтобы экспериментально проверить потенциал метода, сотрудники ИИТ О.Ю.Маслаков и Е.С.Хозяшева исследовали концентрацию и дисперсный состав частиц в воздушной среде вентилируемого помещения при постоянной утечке пара, которая имитировалась работой парогенератора небольшой интенсивности [3]. Выходящая струйка пара была видна на расстоянии 15—20 см от парогенератора, а дальше уже не просматривалась. При этом датчик устанавливался довольно далеко от генератора, в точке выхода суммарного воздушного потока из помещения.

Принципиальная возможность регистрации утечек водяного пара была доказана в первой же серии экспериментов. Удалось зарегистрировать резкое возрастание концентрации аэрозолей в воздухе даже на значительных расстояниях (до 5 м) от источника водяного пара. При этом рост числа в основном относился к частицам диаметром менее 1 мкм. Полученный результат важен, поскольку в соответствии с теоретическими расчетами время жизни водяных капель в воздушной среде помещения должно быть порядка секунды, что недостаточно для регистрации лазерными счетчиками.

Этот эксперимент демонстрирует высокую чувствительность метода: чувствительность к утечкам оказалась в 1000 раз большей, чем при измерении влажности (рис.3). Но самая ценная особенность нашего способа состоит в том, что увеличение концентрации и изменение дисперсного состава аэрозолей при испарении воды либо при непрерывной утечке можно регистрировать вплоть до влажности 100% включительно (при измерениях относительной влажности это принципиально невозможно).

Чтобы определить количественные характеристики мини-

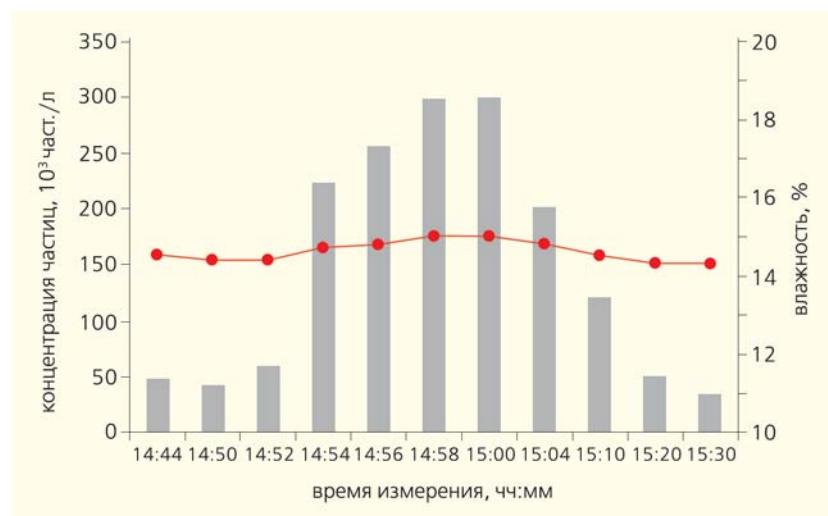


Рис.3. Зависимость общей счетной концентрации частиц аэрозолей (серые прямоугольники) и влажности в помещении (красные точки) от времени измерений. В 14:50 произошло включение источника пара, в 15:00 — выключение.

мально детектируемой утечки, регистрировалась концентрация и дисперсный состав частиц, образующихся при испарении дозируемого количества воды на поверхности нагревательного элемента. Было обнаружено, что с помощью лазерных датчиков аэрозолей можно засечь утечку сверхмалых количеств воды (капли объемом порядка нескольких микролитров) на расстоянии до 3 м по направлению потока воздуха из вентиляции.

С технической точки зрения важное значение имели и эксперименты, выполненные на промышленных стендах и продемонстрировавшие возможность регистрации утечек пароводяной смеси даже через дефекты в трубах, имеющих слой теплоизоляции.

Хорош ли воздушный фильтр?

Важный дополнительный «бонус», который дают системы мониторинга аэрозолей, — проверка эффективности воздушных фильтров, в том числе непосредственно в месте их установки.

Например, на АЭС в настоящее время контролируются только радиоактивные аэрозоли. Но в условиях нормальной эксплуатации станции активности воздушных выбросов незначительна, и ее величина, измеряемая после воздушных фильтров, редко бывает статистически достоверна. При штатной работе АЭС, когда концентрация активных аэрозолей в помещениях и в вентиляционных системах низка или отсутствует, метод неработоспособен; в ряде случаев службы эксплуатации станции просто не способны оценить состояние фильтров.

Датчики аэрозолей, используемые в системе РОАП для АЭС, могут измерить счетную концентрацию после прохождения воздушного фильтра не только радиоактивных, а всех частиц,

Так можно получить гораздо более достоверный показатель эффективности воздушного фильтра. Более того, при измерении можно определить значения как интегральной, так и дифференциальной (т.е. для частиц каждого размера) эффективности фильтра, что увеличивает информативность измерений.

Наконец, применение датчиков аэрозолей на АЭС позволит контролировать очистку воздуха, поступающего на станцию через систему приточной вентиляции. Такой контроль нужен на станциях, которые строятся в местностях, характеризующихся повышенным содержанием пыли в атмосфере (например, в районах пустынь).

Приведенные соображения актуальны не только для АЭС — очистка поступающего в технологическую зону воздуха сегодня становится обязательным условием для практически любого современного высокотехнологического производства.

Симптомы усталости

Мониторинг аэрозолей составляет основу совершенно нового метода контроля механических свойств металлов — по генерации аэрозолей в результате механических воздействий [4, 5].

Сравним поведение металлических стержней из необлученной и облученной реакторной стали марки 15Х2МФА (стержни были подвергнуты воздействию нейтронного излучения с флюенсом $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$). Диаметр стержней составлял 4 мм, длина — около 100 мм. Их прочность проверялась на специальной разрывной машине. В процессе разрыва образцы находились в изолированной камере цилиндрической формы, воздух в которую поступал через высокоэффективный фильтр. Разрыв необлученных стержней сопровождался резким возрастанием уровня концентрации частиц с размерами из всех диапазонов (см. табл.). Аналогичный эф-

фект наблюдался и при разрыве образцов из облученной стали (см. табл.), но концентрация частиц возрастала до значительно больших величин. Заметные различия есть также в распределении образующихся частиц по размерам — во втором случае отмечается интенсивная генерация больших частиц (диаметром $> 2 \text{ мкм}$).

Отметим, что механические характеристики образцов отличались друг от друга не так уж сильно: предел текучести $\sigma_{0.2}$ составил 490 и 620 МПа, предел прочности σ_b — 610 и 730 МПа, общее удлинение δ_0 — 12% и 9% и равномерное удлинение δ_r — 8% и 6% соответственно для необлученных и облученных образцов. Другими словами, при исследовании разрыва радиационно поврежденных образцов зарегистрировано резкое (в 50 раз) увеличение генерации крупных частиц по отношению к исходным стержням, тогда как механические свойства, измененные традиционными способами, изменились под действием облучения лишь на 10–20%.

А существует ли связь между количеством и дисперсным составом аэрозолей, образующихся при механическом воздействии на поверхность образца, и усталостными повреждениями в материале? На этот вопрос должны были ответить эксперименты, проведенные сотрудником ИИТ М.Н.Шаховым со стержнями из стали СтЗ. Сначала параметры частиц, возникающих при механическом воздействии (обработке абразивным материалом), измерялись для исходного образца (условно — материал без усталостных повреждений). Затем образец изгибался под углом 90° и выпрямлялся (1 цикл нагружения). После определенного количества циклов стержень снова полировался, исследовалась генерация частиц — и так вплоть до разрушения образца. Все измерения проводились в обеспыленной атмосфере с низкой фоновой концентрацией частиц (в однонаправленном

Таблица

Результаты испытаний необлученных и облученных стержней из стали 15Х2МФА

Текущее время, мин : с	Число частиц диаметром, мкм						Состояние
	0.1–0.2	0.2–0.3	0.3–0.5	0.5–1.0	1.0–2.0	>2.0	
Исходный образец							
0:00	73	10	1	1	0	0	Фон
4:22	102	14	3	0	0	1	Растяжение
5:02	98	15	8	1	3	18	
5:44	123	15	2	1	2	0	
6:22	1359	419	688	616	243	305	Разрыв
7:00	560	89	36	12	16	15	
8:14	508	82	17	0	1	0	
9:10	470	57	14	0	0	0	
Облученный образец							
0:00	56	10	2	1	1	2	Фон
0:38	34	6	1	1	6	6	Растяжение
1:27	21	5	8	3	2	5	
2:06	24	9	18	9	6	6	
2:45	4844	3071	6605	9988	7173	16304	Разрыв
3:28	1587	286	356	646	552	522	
4:08	1520	206	184	617	596	762	
4:47	1590	243	414	994	577	379	
5:37	1539	253	373	557	192	134	
6:15	1468	202	224	284	83	48	
6:54	1942	255	221	182	56	33	
8:12	2289	328	157	28	3	3	

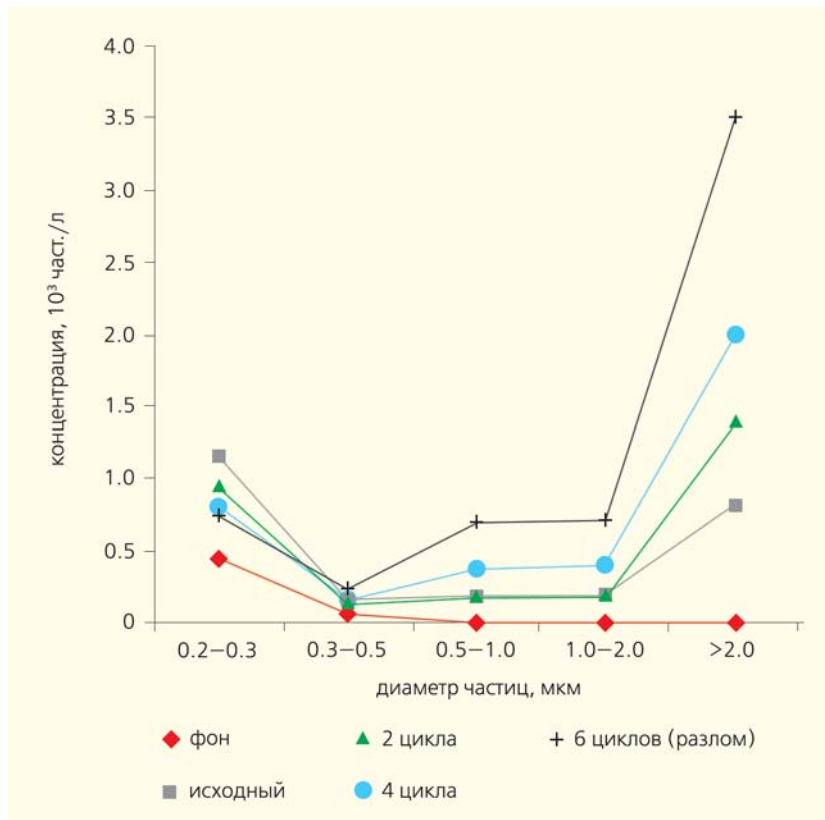


Рис. 4. Генерация аэрозолей при механическом малоразрушающем воздействии на образец стали СтЗ, подвергаемый малоцикловому механическому воздействию.

вертикальном потоке чистого воздуха после высокоэффективного фильтра). Результаты эксперимента (рис.4) показывают: образование крупных частиц (>2 мкм) при повышении степени усталости материала тоже заметно возрастает. Значительное увеличение генерации частиц в диапазоне 0.5–2.0 мкм наблюдается при переходе от четырех к шести циклам нагружения (это все еще так называемая малоцикловая усталость). Количество образующихся частиц в интервале размеров 0.3–0.5 мкм остается практически неизменным, а для частиц диаметром 0.2–0.3 мкм происходит даже некоторое снижение уровня генерации.

Особенно интересно, что по мониторингу аэрозолей отчетливо видны ранние стадии усталости материала, как демонстрирует рис.5. Эта область с большим трудом поддается современным методам диагностики, но она крайне важна для заблаговременного прогнозирования усталостного разрушения. Выявленный эффект зависимости ге-

нерации аэрозолей от радиационных и усталостных повреждений разумно связать с образованием скопления дислокаций внутри зерна и последующим разрушением по менее прочному пути.

Красноречивые деформации

Новый, аэрозольный, метод находит свое место и в области диагностики напряженно-деформированного состояния различных изделий и конструкций. Его особые преимущества — высокая чувствительность, а также возможность работы с труднодоступными участками, при большом фоновом уровне шумов, т.е. в случаях, где пасуют традиционные способы контроля (главным образом акустические и оптические). Кроме того, метод приобретает дополнительную актуальность в системах, где для надежной регистрации предаварийных ситуаций используются одновременно несколько методов, основанных на различных физических принципах.

Применить новый метод в сочетании с другим, уже хорошо зарекомендовавшим себя, полезно для его независимой проверки. Одновременные измерения аэрозольной концентрации и акустической эмиссии были проведены в ИМАШ (совместно с Н.А.Махутовым и И.В.Васильевым, а также В.Н.Пермяковым из Тюменского государственного нефтегазового университета) [6]. На разрыв и на сжатие испытывались соответственно образцы из алюминиевого сплава В95 и оргстекла, на которые было нанесено разработанное в ИМАШ хрупкое тензоиндикаторное покрытие из анодированного алюминия. Такие покрытия используются в технике для выявления дефектов и индикации поля напряжений — мерой служат густота и направления трещин. Измерения аэрозольной концентрации проводились в герметичном обеспыливающем кожухе

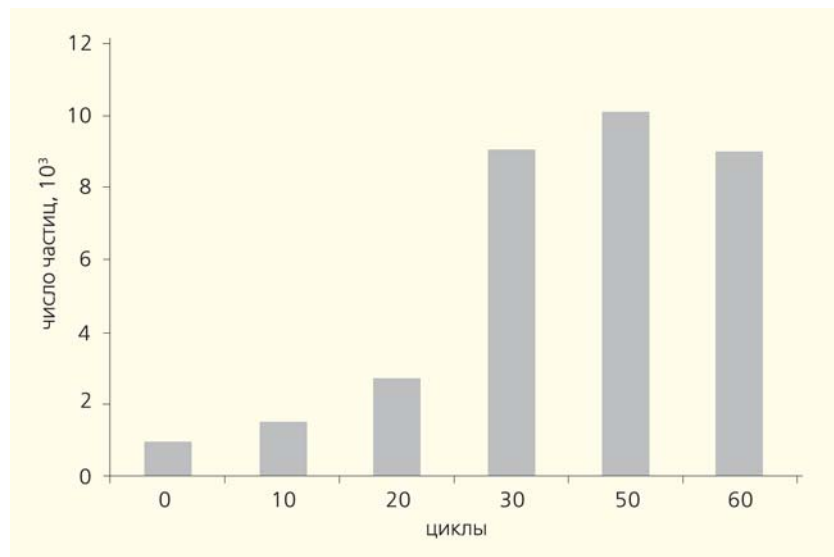


Рис.5. Генерация крупных (>2 мкм) частиц в зависимости от числа циклов (сталь 65Г).

(приемной камере), что позволило свести к минимуму аэрозольный фон.

Выяснилось, что наличие тензоиндикаторного покрытия усиливает выход аэрозольных частиц на два-три порядка в зависимости от толщины оксидной пленки: чем она толще, тем больше выход. Был выявлен характер поведения пиков концентрации в области упругих деформаций: генерация аэрозолей прекращается при некотором уровне нагрузки и возобновляет-

ся при прохождении следующих порогов нагрузки (рис.б). Такая тенденция позволяет определять порог нагрузки по уровню аэрозольной концентрации. В области пластических деформаций наблюдались мощные пики концентрации частиц из всех размерных диапазонов, предшествующие непосредственному разрушению образца.

Любопытно, что при деформации сначала возникают трещины в более толстых покрытиях, тогда как трещинообразова-

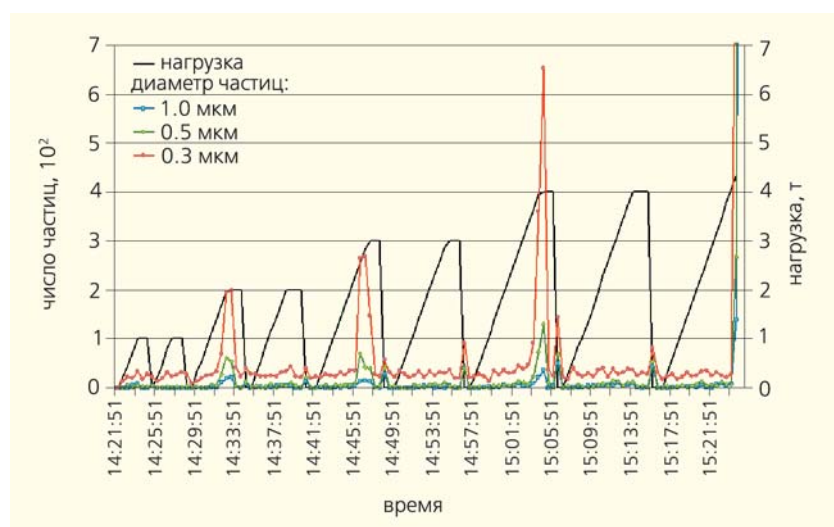


Рис.6. Поведение концентрации частиц разного размера при приложении циклической нагрузки на растяжение к образцу с покрытием толщиной 12 мкм.

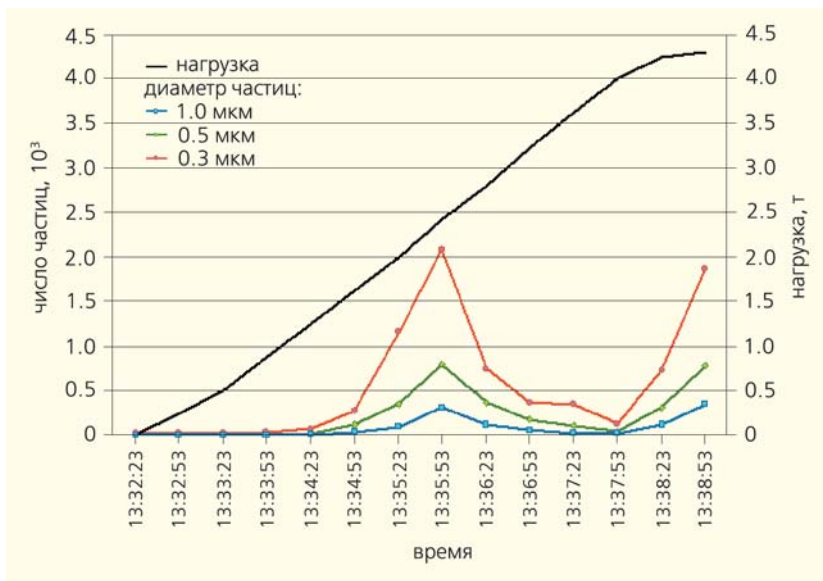


Рис.7. Концентрация частиц при монотонном растяжении образца с покрытием толщиной 18 мкм.

ние и, соответственно, выход аэрозолей в более тонких покрытиях происходят при бóльших значениях деформации. Рис.7 демонстрирует случай непрерывного увеличения нагрузки вплоть до разрыва. Видно, что при толщине покрытия 18 мкм максимум генерации аэрозолей

приходится на упругую часть кривой деформации основного материала (сплава В95). При другой толщине этот максимум будет смещаться. Следовательно, мы сможем сдвинуть максимум в область напряжений, еще допустимых с точки зрения многоциклового усталости. Тогда резкое увеличение выхода аэрозолей будет показывать, что достигнуты те напряжения, при которых в результате многоциклового усталости может произойти разрыв образца.

Но вернемся к задаче верификации аэрозольного метода. Сравнение сигналов, подаваемых генерацией аэрозолей и акустической эмиссией (в первую очередь ее интенсивностью), показывает явную корреляцию между измеряемыми характеристиками, рис.8. Две линейные аппроксимационные зависимости в двойных логарифмических координатах относятся к нагружению образцов в двух областях: в области упругих и упруго-пластических деформаций ($\epsilon < 2\%$, прямая 1), когда в оксидных тензоиндикаторах интенсивно образуются трещины, и в области значительных пластических деформаций, ког-

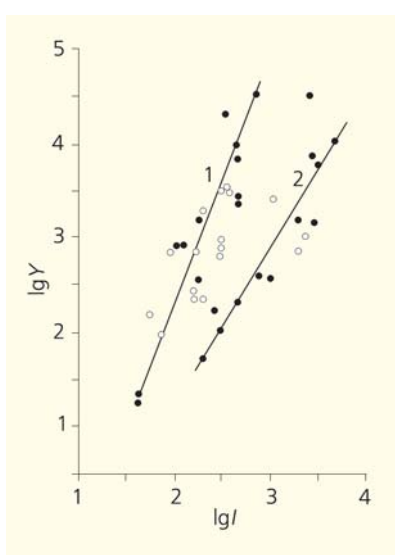


Рис.8. Сопоставление концентрации микроаэрозолей (Y) и сигналов акустической эмиссии (I) в двойном логарифмическом масштабе, регистрируемых при испытаниях двух различных образцов (● и ○ соответственно).

да разрушается не только тензоиндикатор, но и материал подложки (прямая 2). Итак, аэрозольный метод дает достоверную информацию о состоянии материала.

Взгляд в глубь горных пород

Твердые полезные ископаемые часто добываются подземным способом на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях. Под действием статических и динамических нагрузок горные породы вокруг выработок и скважин переходят в предельно напряженное состояние и разрушаются в условиях неоднородных объемных напряжений.

Ради безопасности ведения работ в горнодобывающей промышленности разработано множество методов и средств изучения напряженно-деформированного состояния массивов пород. Однако из-за высокой трудоемкости, слабой оперативности и других причин их применение пока ограничено. Значит, нужно совершенствовать существующие и создавать новые. И здесь опять может пригодиться подсчет аэрозольных микроаэрозолей, генерируемых при напряжениях [7]. Ряд модельных экспериментов, в ходе которых были исследованы концентрация и дисперсный состав аэрозолей, генерируемых при одноосном сжатии образцов различных горных пород, был проведен группой исследователей (С.Д.Викторовым, А.Н.Кочановым, В.Н.Одинцевым, А.А.Осокиным) из ИПКОН РАН в сотрудничестве с НИЦ «Курчатовский институт» [8].

Результаты для песчаника представлены на рис.9, где по оси абсцисс отложен относительный уровень нагружения σ/σ^* (σ — действующее напряжение сжатия в образце; σ^* — предельное значение напряжения сжатия), а по оси ординат количество частиц. Аналогичные за-

висимости были получены при испытаниях образцов доломита, уртита, мрамора и известняка. Видно, что при приближении к точке разрушения наблюдается рост числа частиц во всех диапазонах, который служит предвестником приближающегося макроразрушения образца. Поведение концентрации аэрозолей всех размерных рядов хорошо описывается формулой $Y = A(\exp kx - 1)$, где A и k — эмпирические коэффициенты; x — относительный уровень нагружения, $x = \sigma/\sigma^*$. При более детальном рассмотрении (рис.10, опыт с доломитом) можно заметить, что при увеличении нагрузки возникают сколы небольших кусков, сопровождающиеся генерацией аэрозолей преимущественно крупной фракции. Это свидетельствует о неоднородности образца, а также о возможных неровностях, где концентрируются напряжения.

Очень важно, что дисперсный состав генерируемых аэрозолей зависит от материала образца. Для каждого из исследованных типов геоматериалов (известняка, уртита, доломита, гранита, железистого кварцита, калийной соли, дунита, змеевика, мрамора, песчаника) была получена своя картина дисперсного состава. Особенно интересны различия для образцов взрывоопасного и невзрывоопасного угля (рис.11). В первом случае число частиц микрометровых размеров значительно превышает концентрацию частиц аналогичных размеров для невзрывоопасного угля, что хорошо коррелирует с характерной поверхностной структурой образцов.

Полученные результаты положены в основу принципиально нового инструментального метода определения состояния, предшествующего разрушению (предразрушению) не только горных пород, но и строительных материалов/конструкций [9]. Так, из-за действия сейсмических и других естественных факторов может произойти измене-

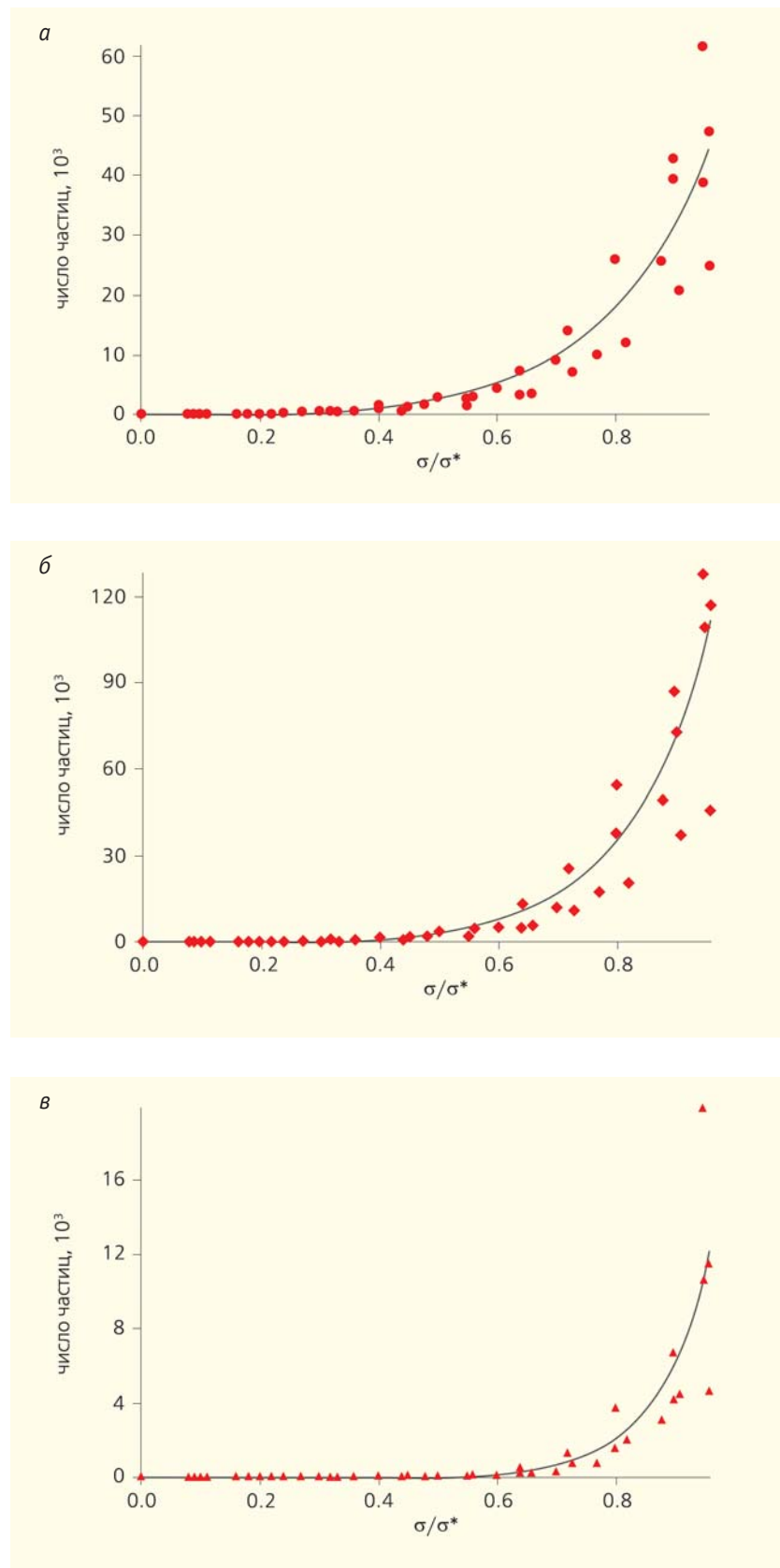


Рис.9. Интенсивность генерации частиц разных диаметров при одноосном сжатии образцов песчаника: а — 0.3–0.5 мкм ; б — 0.5–5.0 мкм ; в — >5.0 мкм.

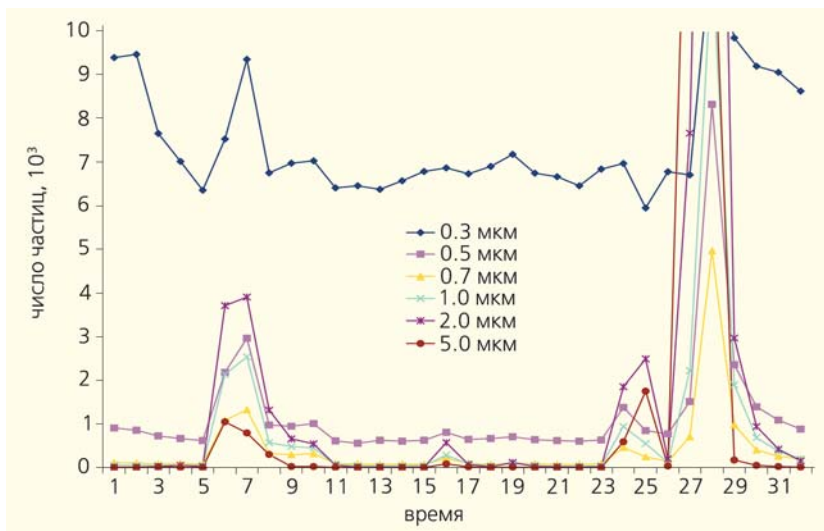


Рис.10. Динамика генерации частиц различных размеров при нагружении образца доломита (каждое деление по горизонтальной оси соответствует 20 с). Небольшие пики (6, 16, 19, 25) соответствуют отламыванию небольших фрагментов образца, более мощный — разрушению образца.

ние механических напряжений в фундаментах сооружений. Это способно вызвать локальное превышение предела прочности, а в дальнейшем и аварию. Такое изменение можно обнаружить, если регистрировать аэрозоли, возникающие при растрескивании стенок специального измерительного канала, который закладывается при строительстве.

С определением предразрушения горных пород тесно связаны вопросы прогнозирования землетрясений. В этом направлении совместно с В.А.Алексеевым (Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований) также были получены первые экспериментальные результаты, показывающие перспективность этого направления исследований [10, 11].

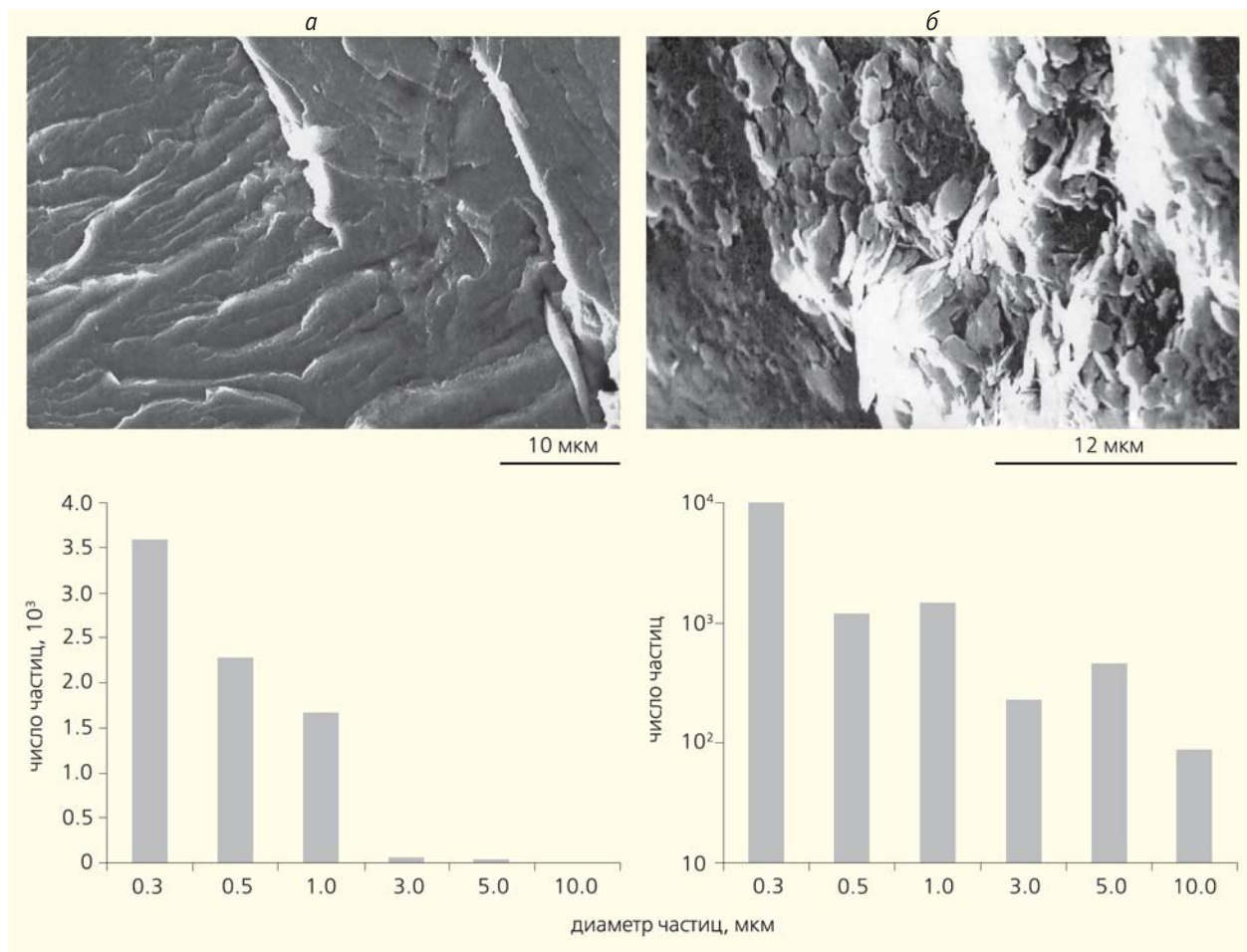


Рис.11. Структура поверхности образцов и дисперсный состав генерируемых при нагрузке частиц для невзрывоопасного антрацита (а, слоистая структура) и для взрывоопасного угля (б, пластинчатая структура с характерными элементами).

Задачник для законодателя

На производствах с высокой ценой аварии жизненно необходимо иметь систему, заранее предупреждающую о возможных нештатных ситуациях, — чтобы аварию предотвратить или хотя бы сократить потери, и в первую очередь вывести из опасной зоны и спасти персонал. Требования к такой системе достаточно очевидны: это минимальное число, а в идеале полное отсутствие ложных срабатываний и не очень высокая стоимость. Первое требование в значительной мере удовлетворяется при одновременном использовании нескольких методов раннего предупреждения. Наш аэрозольный метод — один из наиболее чувствительных и относительно недорогой, однако его полезно совмещать с еще каким-то, основанным на другом физическом принципе.

Важнейший вопрос — кто и на каком основании должен принимать решение при получении сигнала системы раннего предупреждения. С одной стороны, остановка производственного процесса ведет к серьезным экономическим потерям, и этого хотелось бы избежать. С другой стороны, переход аварии в необратимую форму вызовет гораздо больший ущерб и даже, возможно, человеческие жертвы. В этом случае, независимо от формы собственности на рассматриваемом предприятии, последствия аварии выходят за пределы материальной и юридической ответственности собственника предприятия — ответственность возлагается на государство. Вообще говоря, крупные аварии довольно редки, за время существования конкретного производства их может просто не произойти, и у собственника

нет экономических аргументов для использования системы раннего предупреждения. Однако, если взять все однотипные предприятия, серьезные аварии все-таки случаются, и экономические потери от них много больше, чем стоимость системы раннего предупреждения. Отсюда следует вывод о необходимости конкретизировать государственную политику в этой области. Во-первых, необходимо ранжировать все предприятия по максимально возможной цене аварии и законодательно обязать их предпринимать меры по ранней диагностике и предупреждению аварий. Во-вторых, нужно четко установить человека (должность), независимо принимающего решения об остановке производства в аварийной ситуации. Законодательство в этой области еще ждет своей разработки. ■

Литература

1. Александров П.А., Калечиц В.И. Раннее предупреждение аварийных ситуаций по мониторингу микрочастиц // Топливо-энергетический комплекс. 2003. №2. С.110—111.
2. Александров П.А., Калечиц В.И., Маслаков О.Ю. Мониторинг аэрозолей и раннее обнаружение предаварийных и аварийных ситуаций // Атомная энергия. 2000. Т.89. Вып.5. С.376—381.
3. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Чечуев П.В. Обнаружение малых течей в трубопроводах АЭС по измерениям аэрозолей // Атомная энергия. 2004. Т.97. Вып.3. С.189—195.
4. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Чечуев П.В. Исследование генерации частиц при разрыве металла // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Термоядерный синтез». 2003. Вып.3. С.73—77.
5. Александров П.А., Шахов М.Н. Исследование влияния усталостных повреждений на генерацию частиц металла при механических воздействиях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. №2. С.32—35.
6. Махутов Н.А., Шемякин В.В., Ушаков Б.Н. и др. Применение акустической эмиссии для контроля за процессом образования трещин в хрупких оксидных тензоиндикаторах // Заводская лаборатория. 2011. №6. С.41—44.
7. Викторов С.Д., Кочанов А.Н., Александров П.А. и др. Изучение микроструктуры и дисперсного состава горных пород после интенсивного динамического воздействия // Инженерная физика. 2010. №6. С.39—44.
8. Викторов С.Д., Кочанов А.Н., Осокин А.А. Эмиссия микрочастиц при деформировании и разрушении образцов горных пород в условиях одноосного сжатия // Вестник Тамбовского университета. Т.15. Вып.3. 2010. С.1163—1164.
9. Викторов С.Д., Трубецкой К.Н., Чантурия В.А. и др. Способ определения состояния, предшествующего разрушению горных пород и строительных сооружений, и устройство для его осуществления. Патент РФ №2418165 (2011 г., приоритет 2009 г.).
10. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Муравьев Я.Д. и др. Аэрозольный предвестник извержения Авачинского вулкана в январе 1991 г. // Доклады Академии наук. 1995. Т.345. №5. С.667—670.
11. Alekseev V.A., Aleksandrov P.A., Alekseeva N.G. et al. Aerosol precursor of earthquakes and volcanic eruptions: the 2010 expedition on the Elbrus volcano // INQUA 501 Seventh Plenary Meeting and Field Trip. Odessa, 2011.

Многоликий кальций

О.П.Балезина

Ja, Kalzium das ist alles!
Otto Loevy. 1959 г.

Кальций — один из самых интересных химических элементов на Земле, играющий необычайно активную роль в живой природе. Именно поэтому знаменитый фармаколог и физиолог XX в., лауреат Нобелевской премии Отто Леви в своей широко цитируемой лекции воскликнул «Да, кальций — это все!»[1].

Соли кальция в живой природе

Открыл этот новый химический элемент с массой 40 кд (^{40}Ca) и охарактеризовал его как щелочноземельный металл со специфическими свойствами и высокой реактивностью Х.Дэви в 1808 г. В отличие от типичных щелочных металлов, кальций не воспламеняется на воздухе, однако его куски быстро превращаются в окись, гидроокись и карбонат кальция, поскольку среда окислов углерода (CO и CO_2), инертная для большинства металлов, для кальция — агрессивная (он сгорает в их атмосфере). Это уникальное свойство во многом определило неисчислимо количество соединений кальция в природе, в основном в виде солей кислородсодержащих кислот. На поверхности Земли известно около 400 минералов, содержащих кальций, среди которых очень распространены силикаты, фосфорные соли — фосфорит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{CO}_3)$ и апатиты $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl})$, а также сульфа-



Ольга Петровна Балезина, профессор кафедры физиологии человека и животных, доктор биологических наук, специалист в области синаптической физиологии. Область научных интересов — кальциевая регуляция белков, ферментов и экзцитоза медиатора в синапсах.

ты — например, гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Но больше всего на Земле, конечно, карбонатов кальция — кальцита CaCO_3 и его природных форм — известняка, мела, мрамора, доломита $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ и др.

Минералы на основе CaCO_3 покрывают около 40 млн км² земной поверхности. Большое количество известняка находится в природных водах благодаря глобальному карбонатному равновесию между практически нерастворимым CaCO_3 , хорошо растворимым $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и находящимся в воде и воздухе CO_2 . В природе существуют также известняки биогенного происхождения. К ним относятся уникальные по красоте покровы: экзоскелеты фораминифер, раковины моллюсков, чешуи рыб, скорлупа яиц птиц, костная ткань всех позвоночных (табл.1). Несмотря на значимость твердых солей кальция для жизни организмов, интерес последних десятилетий в физиологии сосредоточен вокруг роли и активности свободного ионизированного кальция.

Таблица 1
Основные биоминералы кальция

Химический состав	Форма минерала	Где представлен и его функция
CaCO_3	Кальцит, арагонит, ватерит аморфный	Экзоскелеты (скорлупа яиц, раковины моллюсков, кораллы полипов)
$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$ $\text{CaC}_2\text{O}_4(n\text{H}_2\text{O}) (n = 1, 2)$	Гидроксиапатит Флуороапатит Вельвелит, ведделит	Эндоскелеты (кости позвоночных и зубы) Кальциевые сенсоры и пассивная защита растений
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}, \text{CaC}_2$	Гипс, карбонат кальция	Отолиты — сенсоры гравитации и положения тела в пространстве у животных и человека

© Балезина О.П., 2012

Ионизированный кальций в жизни клетки

Участие твердых нерастворимых солей кальция — карбонатов и фосфатов — в построении скелетов живых организмов обнаружилось достаточно давно. Растворимые соли кальция содержатся в водах Мирового океана, а также во внутренних средах нашего организма. Так, в плазме крови человека — порядка 1 мМ ионизированного кальция, но внутри клеток его всего 10^{-6} – 10^{-7} М, т.е. на четыре порядка меньше, чем снаружи! Ни один другой ион (натрия, калия, магния, хлора и др.), транспортируемый через мембрану клетки, не имеет столь мизерной внутриклеточной концентрации и столь крутого ее перепада между цитоплазмой и наружной средой клетки [2]. Поскольку в клетке в состоянии покоя кальция очень мало, очевидно, что любое увеличение его количества (при поступлении из наружной среды или внутриклеточных депо) воспринимается клеткой как новый сигнал [3] (рис.1).

Первым свидетельством регуляторной роли кальция стали исследования С.Рингера, который в 1889 г. показал необходимость кальция для сердечных сокращений. В середине XX в. установили, что для работы скелетных мышц также требуется повышенная концентрация кальция в цитоплазме, но он должен поступать не из наружной среды (как при сокращении сердца), а выбрасываться из цистерн эндоплазматического ретикулума. Наряду с регуляцией мышечных сокращений выяснилось и другой чрезвычайно важный факт: ионы кальция участвуют в запуске секреции медиаторов в химических синапсах [4].

Универсальная роль кальция как внутриклеточного сигнала стала очевидной, когда на мембранах клеток обнаружили многочисленные семейства потенциал-зависимых и хемоактивируемых каналов, способных пропускать кальций в клетки [4]. В конце XX в. появление в клеточной физиологии внутриклеточных флуоресцентных красителей позволило воочию наблюдать, где

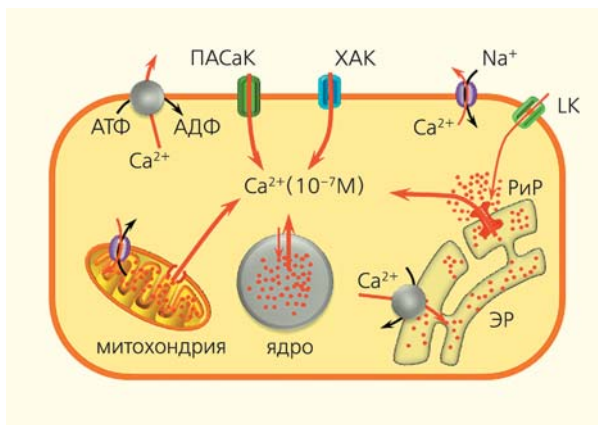


Рис.1. Схема клетки и внутриклеточных органелл, содержащих кальций. Из наружной среды ионы кальция поступают в цитоплазму по потенциал-зависимым Ca^{2+} -каналам (ПАСаК) и хемоактивируемым Ca^{2+} -каналам (ХАК); внутри клетки — из митохондрий по Ca^{2+} -поре, из цистерн эндоплазматического ретикулума (ЭР) по рианодиновым рецепторам (РиР). Указаны белки, выкачивающие кальций из цитоплазмы в наружную среду или внутрь органелл.

именно кальций появляется в клетке, как распространяется внутри нее и как долго сохраняется там его повышенная концентрация [5]. Многоликость внутриклеточных Ca^{2+} -сигналов поразила физиологов. Оказалось, что концентрация кальция может повышаться от 10^{-7} до 10^{-4} М. Кратковременный локальный всплеск концентрации кальция в цитоплазме (Ca^{2+} -сигналы) может выглядеть как маленькое, быстро рассасывающееся «облако», или как пик, возникающий вблизи места его входа в клетку (рис.2), или как спираль либо комета, распространяющаяся по цитоплазме, но возможен и равномерный подъем уровня кальция во всей цитоплазме [6]. Такое разнообразие объясняется множеством путей поступления кальция в клетку из наружной среды — по одиночному или группе каналов, отличающихся разной



Рис.2. Регистрация Ca^{2+} -сигналов клеток. Слева — трехмерная реконструкция локального внутриклеточного Ca^{2+} -сигнала, регистрируемого с помощью микроскопа и предварительной нагрузки клетки флуоресцентным Ca^{2+} -красителем, и шкала разных цветовых оттенков, отражающая концентрацию кальция в цитоплазме клетки в диапазоне от 10^{-7} М (бледно-голубой цвет) до 10^{-4} М (ярко-красный). Справа — кальциевое «свечение» в обонятельном нейроне, нагруженном флуоресцирующим кальциевым красителем: а — в покое (свечение равномерное, умеренное); б — при возбуждении нейрона возникают зоны красного свечения, отражающие места возросшей концентрации кальция в нейроне.

плотностью распределения на мембране, а также выбросом из цистерн ретикулума [5]. Из их мембран выделили внутриклеточные Са-каналы — рианодиновые рецепторы (рис.1), которые открываются в ответ на воздействие кальция (их называют Са²⁺-активируемыми). Благодаря тому, что эти каналы расположены группами и в разных точках мембраны ретикулума, кальций может появляться в разных областях цитоплазмы. Такая своеобразная локализация рианодиновых рецепторов на мембранах эндоплазматического ретикулума формирует внутри клеток особые траектории выброса кальция в цитоплазму [6].

В конце XX в. сложную систему внутриклеточной Са-сигнализации дополнил широкий спектр внутриклеточных Са²⁺-зависимых белков и ферментов. Согласно последним данным, в клетке насчитывается как минимум 40 типов таких специфических белков [3, 7]. Их подразделяют на семейства: Са²⁺-зависимые ионные каналы (например, для калия и хлора); Са²⁺-зависимые ферменты — киназы, фосфатазы, протеазы; Са²⁺-связывающие регуляторные белки типа кальмодулина, кальдендрина; белки-хелаторы кальция, связывающие и изымающие кальций из цитоплазмы, контролируя тем самым изменения внутриклеточной концентрации кальция и форму Са²⁺-сигналов (например, белки парвальбумин, кальбиндин) [7]. Особенности сопряжения Са²⁺-сигналов разной модальности и разного генеза с Са²⁺-зависимыми белками и внутриклеточными реакциями — актуальная проблема клеточной физиологии. Это относится и к синапсам, где эти вопросы стали изучать лишь в последние 10—15 лет.

Кальциевая регуляция секреции медиатора

Роль кальция как триггера экзоцитоза синаптических везикул общеизвестна. Синаптические везикулы, содержащие медиатор, сосредоточены в активных зонах, вблизи от потенциалзависимых Са²⁺-каналов. Распространяющийся по нервным окончаниям импульс открывает Са²⁺-каналы, через которые устремляется поток ионов кальция. Они, связываясь с везикулярными белками, запускают слияние мембран везикулы и нервного окончания. Таким образом, кальций служит триггером экзоцитоза везикул. Но существует ли у него более широкая регуляторная роль, осуществляемая сигналами, которые поступают по другим путям? Цистерны эндоплазматического ретикулума и рианодиновые рецепторы уже описаны в нервных окончаниях центральных и периферических синапсов, но при каких условиях они активируются, участвуют ли в регуляции секреции медиатора, пока еще мало изучено. Поиски ответов на эти вопросы ведутся в последние годы как на центральных, так и периферических синапсах [8, 9].

Изучая нервно-мышечные синапсы скелетных мышц мыши, нам впервые удалось раскрыть условия взаимодействия разных типов Са²⁺-сигналов и обнаружить взаимосвязи кальциевой и ферментной систем, участвующих в регуляции секреции медиатора ацетилхолина. Мы установили, что в моторных синапсах, работающих в режиме коротких ритмических залпов, кальций поступает по Са²⁺-каналам (P/Q-типа), которые находятся вблизи готовых к высвобождению ацетилхолина везикул, но не активирует рианодиновые рецепторы и выброс депонированного кальция [10]. Если же в работу вовлечен еще один тип потенциалзависимых Са²⁺-каналов — «медленных» Са²⁺-каналов L-типа, то входящий по ним кальций активирует рианодиновые рецепторы и выброс депонированного кальция, а также усиливает секрецию ацетилхолина [11]. Выяснилось также, что в этом случае необходимо еще участие Са²⁺-зависимого фермента протеинкиназы С, который также облегчает экзоцитоз везикул [12]. Предотвратить усилившийся выброс медиатора можно, заблокировав этот фермент — например, хелеритрином (4мкМ). Но обычно в нервно-мышечных синапсах медленные каналы находятся в латентном состоянии и не участвуют в секреции медиатора. Считается, что это резервный механизм моторных синапсов, используемый для усиления передачи в особых случаях, например если не работает основной пул Са²⁺-каналов (P/Q-типа), запускающих экзоцитоз везикул. Однако в моторных синапсах существует множество других ситуаций, когда синаптическая передача ослаблена или нарушена. Заманчиво было бы научиться управлять активностью медленных каналов (L-типа) с помощью регулирующих их переключение ферментов. Мы установили, что в нервно-мышечных синапсах скелетных мышц этот тип каналов находится под влиянием двух Са²⁺-зависимых ферментов — протеинкиназы С и кальцинейрина. Усиливая активность первого фермента форболовым эфиром [10] либо тормозя активность второго специфическим ингибитором, можно растормозить Са²⁺-каналы L-типа и облегчить синаптическую передачу (рис.3).

Совсем иной каскад реакций (с участием других Са²⁺-сигналов и Са²⁺-зависимых ферментов) мы обнаружили в тех же моторных ослабленных синапсах. Известно, что при длительной работе любого синапса (в течение десятков секунд, с частотой 30—50 Гц) в их окончаниях накапливается кальций, но количество выбрасываемого медиатора на каждый нервный импульс неуклонно падает и спустя 30—40 с от начала залпа снижается в 1.5—2 раза по сравнению с исходным (рис.4). Утомление работающих синапсов и депрессия передачи при интенсивной активности характерны и для центральных синапсов. Считается, что тетаническая депрессия (утомление передачи) предохраняет синапсы и клетки-мишени от перевоз-

буждения. Однако механизмы этого важного процесса в центральных и периферических синапсах не очень понятны. Общепринято, что тетаническая депрессия синаптической передачи может быть связана с истощением пула везикул в продолжительно работающих синапсах либо с десенситизацией постсинаптических рецепторов при избытке медиатора в щели.

Мы впервые показали, что в холинергических нервно-мышечных синапсах скелетных мышц утомление синапсов вызвано другими причинами. Оказалось, что тетаническая депрессия — это проявление авторегуляции синапсов по механизму отрицательной обратной связи, когда выбрасываемый в синаптическую щель медиатор, действуя пресинаптически, подавляет собственный расход (выброс). Хорошо известно, что в холинергических нервных окончаниях имеются пресинаптические холинорецепторы никотинового типа (нХР). Среди них особенно интересны рецепторы $\alpha 7$, которые отличается от других подтипов тем, что их каналы при активации избирательными агонистами (ацетилхолином и холином) пропускают значительные порции ионов кальция [13]. Мы установили, что при длительной тетанической активности в нервно-мышечных синапсах накапливаются ацетилхолин и холин, которые и возбуждают пресинаптические ацетилхолиновые рецепторы $\alpha 7$ -типа, а те, в свою очередь, Ca^{2+} -сигналами активируют рианодин-депонированного кальция через каскад Ca^{2+} -зависимых K^+ -каналов вызывает гиперполяризацию мембраны терминали. А это подавляет активность потенциалзависимых Ca^{2+} -каналов, снижает количество кальция вблизи везикул и их экзоцитоз (рис.3). Более того, в каскаде этих Ca -зависимых реакций необходимо участие специфического Ca^{2+} -зависимого фермента. Проведя тестирование ингибиторов ряда таких ферментов, мы убедились, что в угнетении синаптической передачи, вызываемой $\alpha 7$ нХР и холином, участвует Ca /кальмодулинзависимая киназа II типа (СаМКII). Достаточно подавить активность этого фермента избирательным ингибитором, чтобы остановить депрессию, вызванную действием холина на нервные окончания синапсов (рис.4). Таким образом, мы впервые показали, что хорошо известный феномен — утомление синаптической передачи в интенсивно работающих моторных синапсах — можно предотвратить (на 85–90%), если заблокировать пресинаптические $\alpha 7$ -холинорецепторы и последующий каскад Ca -зависимых реакций в терминалах [13].

Итак, на примере Ca^{2+} -зависимых реакций, происходящих в синапсах, видно, что Ca^{2+} -сигналы могут вызывать прямо противоположные воздействия на одну и ту же функцию клетки (в данном случае на секрецию ацетилхолина). Знак эффекта зависит от конкретного входа кальция: че-

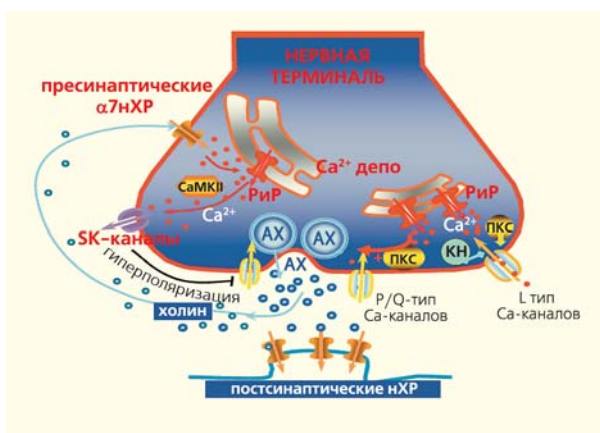


Рис.3. Схема регуляции везикулярного экзоцитоза ацетилхолина (АХ) с участием кальция, входящего в нервное окончание: по Р/Q-, L-типу Ca^{2+} -каналов, каналам $\alpha 7$ нХР. Показаны активация РиР и выброса депонированного кальция; каскады реакций с участием Ca^{2+} -зависимых ферментов — протеинкиназы С (ПКС), кальциейрина (КН), Ca^{2+} -кальмодулинкиназы II типа (СаМКII), а также Ca^{2+} -зависимых K^+ -каналов SK-типа, участвующих в регуляции экзоцитоза АХ, показаны стрелками.

рез наружную мембрану, от рианодиновых рецепторов, от ферментов и мишеней, активируемых депонированным Ca^{2+} (рис.3). Такое разнообразие возможно благодаря системе пространственно-временного разграничения Ca^{2+} -сигналов: сложной геометрии Ca^{2+} -входов, участию Ca^{2+} -буферов и внутриклеточных органелл, откачивающих

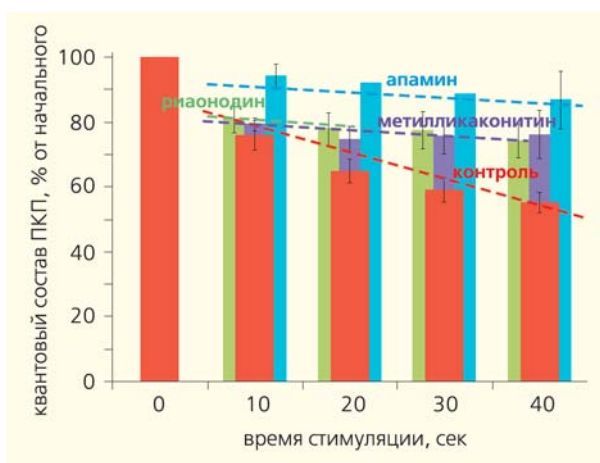


Рис.4. Изменения квантового состава потенциала конечной пластинки (ПКП) нервно-мышечных синапсов во время ритмической залпа с частотой 50 Гц. Столбиками показаны средние значения квантового состава ПКП от начала непрерывной ритмической активности синапса. Видно, что депрессия передачи и падение квантового состава ПКП в контроле (красные столбики) изменяются в присутствии апамина (1 мкМ), метилликаконитина (20 нМ) и рианодина (3 мкМ).

кальций. Наконец, сами мишени для ионов кальция (Ca^{2+} -зависимые ферменты и ионные каналы) также разнесены в пространстве или имеют разную чувствительность к ионам кальция, поэтому вовлекаются в активность только при определенных условиях. В результате в нервных окончаниях, как и в любой другой клетке, возможно существование множества Ca^{2+} -управляемых процессов.

Сегодня на вопрос неопита «Ну и что же делает кальций в клетках?» легче ответить, чего он не делает (табл.2). В одной статье трудно перечислить все аспекты клеточной жизни и ее гибели, связанные с активностью ионов кальция. Но следует обратить внимание, что, хотя многие из белков, имеющих высокое сродство к кальцию, повторяются и присутствуют в самых разных клетках, есть и специфические для каждой клетки Ca^{2+} -зависимые и управляемые белки. Это означает, что кальций обладает двоякой регуляторной природой — он и универсальный сигнализатор, и высокоспецифический регулятор избранных внутриклеточных процессов. Практически в любой клетке нашего организма существует сложная сеть автономных и перекрывающихся Ca^{2+} -управляемых процессов (рис.5). Учет и понимание ра-

боты такой системы уже невозможны без построения математических моделей Ca -зависимых процессов и их компьютерного анализа [14].

Кальциевая перегрузка клеток

Роль кальция как универсального внутриклеточного сигнала поставила перед многоклеточными организмами задачу поддерживать постоянный уровень кальция и в плазме, и внутри клетки. Задача эта решается тремя способами: кальций всасывается напрямую из потребляемой пищи (наиболее предпочтительный способ); если его не хватает в пище, может поступать в кровь из костей (процесс регулируют специальные гормоны); наконец, почки, фильтруя кровь, уменьшают количество кальция в крови.

Все это удерживает клетки от избыточного поступления кальция при открывании Ca^{2+} -каналов на их мембранах; кроме того, имеются многочисленные системы откачивания кальция из цитоплазмы для поддержания его на очень низком (порядка 10^{-7}) базальном уровне [14].

Тем не менее в организме может возникать гиперкальциемия. Наличие множества кальциевых

Таблица 2

Ca^{2+} -регулируемые мишени клетки и связанные с ними функции

Мишени	Функции или регулируемые процессы
Ca^{2+}-связывающие белки	
Кальмодулин КМ	Активность других белков и ферментов, множество процессов и механизмов
Тропонин С	Сократительный белок скелетных и сердечной мышц
Синапсотагмин	Везикулярный белок, участвует в слиянии везикулы с мембраной и секреции медиатора
Белок S100	Активность теломеразы
Ca^{2+}-зависимые ферменты	
Кальций-кальмодулинзависимые протеинкиназы	Регулятор многих белков, каналов, транскрипционных факторов, синаптической пластичности, процессов памяти
КМ-зависимая киназа легких цепей миозина	Сокращение гладкомышечных клеток
Протеинкиназа С	Регуляция ионных каналов, других белков и ферментов, регуляция белков экзоцитоза в синапсах
Аденилатциклаза	Образование циклических нуклеотидов, активность киназ
Нейрональная и эпителиальная NO- синтаза	Синтез NO в клетках
Ca^{2+} -активируемые цистериновые протеазы (кальпаины)	Лизис белков, нейродегенеративные процессы и апоптоз
Серин-треониновые протеинфосфатазы (кальцинейрин)	Регуляция ионных каналов, киназ, синаптической пластичности
цАМФ активируемая фосфоди эстераза	Образование циклических нуклеотидов
Ca^{2+}-зависимые транскрипционные факторы	
Транскрипционные факторы NFAT, CREB и DREAM	Активность генов
Ca^{2+}-зависимые ионные каналы	
Низкопроводящие SK-каналы	Регуляция ритмической активности нейронов
Высокопроводящие BK каналы	Влияние на следовую гиперполяризацию, активность L-каналов в моторных синапсах
Ca^{2+} -чувствительные хлорные каналы	Изменения потенциала мембраны

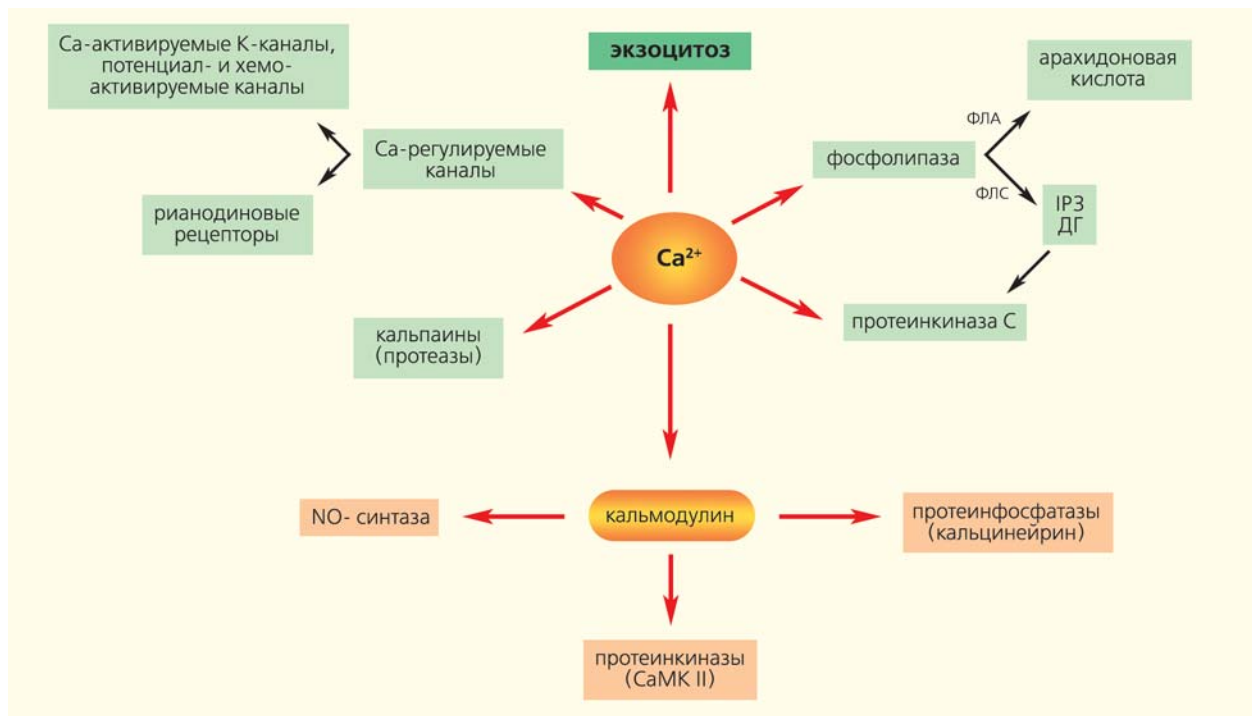


Рис.5. Схема основных Ca^{2+} -зависимых мишеней в клетке. ФЛА — фосфолипаза А, ФЛС — фосфолипаза С, IP_3 — инозитол-трифосфат, ДГ — диацилглицерол, СаМК II — Са/кальмодулинзависимая киназа II типа.

входов в сочетании с повышенной реактивностью кальция при взаимодействии с белками имеет, как оказалось, для клеток и обратную сторону. Избыточное поступление кальция в цитоплазму клетки чревато развитием в ней токсических процессов. Сегодня кальциевая цитотоксичность не менее актуальна, чем изучение спектра Ca^{2+} -сигналов и Ca^{2+} -зависимых процессов в норме.

В настоящее время установлено, что в клетках генетически заложена программа их гибели [11]. Такую программируемую смерть называют еще кальциевой смертью клеток. Она имеет много разных причин, но сводится к тому, что ионы кальция поступают в избытке в протоплазму клетки из наружной среды или внутриклеточных органелл (митохондрий, цистерн эндоплазматического ретикулума). Повышенный уровень кальция в клетке вызывает активацию Ca^{2+} -зависимых протеаз, что ведет сначала к нарушению обмена веществ, а затем лизису и распаду клетки (рис.4). Фактически любое повреждение мембраны (механическими, химическими повреждающими факторами, генетическими дефектами различных Ca^{2+} -каналов) чревато избыточным поступлением кальция в цитоплазму клетки и ее гибели [15]. Генетические и метаболические нарушения в работе митохондрий также сопровождаются кальциевой цитотоксичностью — митохондрия начинает выбрасывать дополнительное количество кальция в цитоплазму клетки (рис.6). Широко распространенное заболевание — спазм сосудов мозга (ишемия), вызываю-

щий недостаток кислорода (гипоксию нейронов), приводит к гибели нервных клеток (инсульту) также вследствие кальциевой перегрузки. Оказалось, что при гипоксии нервные окончания синапсов деполяризуются и выбрасывают избыток возбуж-

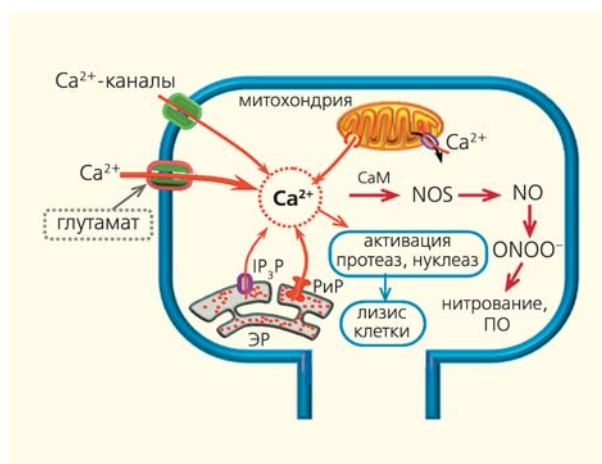


Рис.6. Схема дендритного шипика и процессов, возникающих при длительном действии глутамата на NMDA-рецепторы и избыточном поступлении кальция в цитоплазму. Показаны цепи Ca^{2+} -зависимых реакций, приводящих к гибели нейрона. СаМ — кальмодулин; NOS — NO-синтаза, Ca^{2+} -активируемый фермент, синтезирующий оксид азота (NO) и его кислородные радикалы; ПО — перекисное окисление липидов, повреждающее целостность мембраны.

дающего медиатора — глутамата. При его долгом действии на постсинаптические рецепторы NMDA-типа их каналы пропускают в цитоплазму большое количество ионов кальция. В результате у нейронов возникает кальциевая перегрузка, которая и приводит к их гибели (рис.6). Согласно данным современной неврологии, повышенное внутриклеточное содержание кальция возникает не только при гипоксии, но и при нейродегенеративных процессах в мозге, при церебральной ишемии. Это позволило неврологам сформулировать гипотезу «единого конечного пути» повреждения нейронов, согласно которой независимо от пускового механизма на конечном этапе гибель нейронов опосредуется общими механизмами, в том числе внутриклеточным повышением содержания ионов кальция [16]. Исходя из этого, ведутся поиски агентов, уменьшающих этот избыточный поток кальция в клетки. Например, используются препараты, блокирующие потенциалзависимые кальциевые каналы клеток (нервных или мышечных). Это должно уменьшать поток кальция в клетки и его внутриклеточное накопление, а также оказывать универсальный нейропротективный эффект при инсульте и миопротекторный — при инфаркте миокарда [17].

В последние годы для лечения кальциевых перегрузок нейронов при инсультах и глутаматной токсичности пытаются использовать внутриклеточные ферменты (и/или их модуляторы), воздействующие на глутаматергические каналы (NMDA-типа), регулирующие время их открытия состояния, чтобы не допустить долгий вход по ним кальция в нейроны [18].

Последствия дефицита кальция

Однако наряду с гиперкальциемией опасна и гипокальциемия, т.е. сниженное содержание кальция в плазме и/или недостаточное его поступление в клетки. Причины снижения уровня кальция в плазме могут быть различными, в большинстве случаев это гормональный дисбаланс: дефицит паратгормона или витамина D, реже — нарушения диеты и поступления кальция с пищей. Из пищи кальций всасывается в кишечнике в минеральной форме и переносится белками альбуминами, поэтому его дефицит может привести и к недостатку этих белков в крови человека. В нейронах и мышечных клетках при гипокальциемии снижается уровень порогового потенциала, что сопровождается увеличением возбудимости нейронов (клинически это проявляется в судорогах, тетании) и — нередко — в аномальном ритме сердца. Основные симптомы дефицита кальция в организме (табл.3), как правило, знакомы большинству людей во второй половине их жизни.

Поскольку 90% кальция сосредоточено в наших костях, то самый заметный симптом его де-

фицита — проблемы со скелетом. Костные клетки, образующие отложения гидроксипапатитов кальция, черпают кальций из плазмы крови, поэтому любое снижение его содержания чревато для костной ткани. Она, чтобы поддержать его постоянную концентрацию в плазме крови, выделяет кальций, при этом кости становятся менее плотными — развивается *остеопороз*. По данным Всемирной организации здравоохранения, это заболевание у женщин встречается в четыре раза чаще, чем у мужчин, и занимает четвертое место после болезней сердечно-сосудистой системы, онкологической патологии и сахарного диабета.

Остеопороз называют еще тихим убийцей: его очень тяжело диагностировать на ранней стадии — им страдает примерно каждая третья россиянка старше 60 лет, но знает о нем менее 1% женщин. В организме присутствуют специальные гормоны, регулирующие содержание кальция, — паратиреоидный гормон кальцитонин и витамин D. Восполнить дефицит кальция можно правильным питанием. Человеку требуется 1 г кальция в сутки. Но при этом надо помнить, что соотношение кальция и фосфора должно составлять 1:1. К сожалению, содержание фосфатов в плазме крови у современных людей значительно, в несколько раз больше необходимого — из-за переизбытка богатых фосфором продуктов (мяса, яиц, газированных напитков).

Сейчас предлагается множество биодобавок для компенсации дефицита кальция — от кораллового кальция до его органических солей. Но все же лучше получать кальций из натуральных и полезных продуктов питания. Если в диете достаточно витамина С, витамина D, магния, нет избытка продуктов с высоким содержанием фосфора, физическая нагрузка достаточна, организм поддерживает кальций на должном уровне.

Таблица 3

Симптомы дефицита кальция в организме

1. Тонкие и ломкие ногти, хрупкие, секущиеся волосы
2. Кариес, нарушения состояния зубов, кровоточивость десен
3. Боли в костях, ранний остеопороз, частые, плохо срастающиеся переломы
4. Судороги (особенно икроножных мышц в ночное время)
5. Легко возникающие синяки, длительные менструальные кровотечения
6. Предменструальный синдром, раздражительность, агрессивность
7. Повышенная утомляемость, неэффективный сон
8. Гипертония, нарушения сердечного ритма по типу тахикардии или брадикардии
9. Неврозы, головные боли, нарушение сосредоточенности и памяти
10. Нарушения мелкой моторики, ориентации в пространстве

* * *

Итак, о важности солей кальция для прочности костей знают все, о его роли в работе мышц и свертывании крови догадываются многие, но уникальная роль кальция как внутриклеточного сигнализатора открылась сравнительно недавно. Поражает многообразие Ca-сигналов в нейронах и синапсах, где кальций управляет множеством процессов. Каким образом один и тот же ион опосредует столь разные программы внутри клетки — вопрос, который решает со-

временная клеточная физиология. Заклучая свой рассказ, хочется процитировать А.Е.Ферсмана, утверждавшего, что «кальций — один из самых энергичных и подвижных атомов мироздания». Согласимся и с О.Леви: да, кальций — это сигнал, который может изменить работу генов, ферментов, белков и множество функций клеток. Сегодня нам открылась широчайшая палитра внутриклеточных Ca²⁺-сигналов, но предстоит еще многое понять в молекулярных механизмах их действия, а главное — научиться управлять ими. ■

Литература

1. *Carafoli E.* Calcium signaling: A tale for all seasons // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2002. №99. P.1115–1122.
2. *Williams R.* Calcium: the developing role of its chemistry in biological evolution // *Biochim. Biophys. Acta.* 2006. V.1763. №11. P.1139–1146.
3. *Berridge M.J. et al.* Calcium signaling: dynamics, homeostasis and remodeling // *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* 2003. №4. P.517–529.
4. Calcium: a matter of life or death / Ed. J.Krebs, M.Michalek // *New comprehensive biochemistry.* V.41. Amsterdam, 2007.
5. *Tsien R.Y.* A non-disruptive technique for loading calcium buffers and indicators into cells // *Nature.* 981. V.290. P.527–528.
6. *Ross W.N.* Understanding calcium waves and sparks in central neurons // *Nature Reviews Neuroscience.* 2012. №13. P.157–168.
7. *Petersen O.H.* Calcium signaling: past, present and future // *Cell. Calcium.* 2005. №38. P.161–169.
8. *Verkhratsky A.* Physiology and pathophysiology of the calcium store in the endoplasmic reticulum of neurons // *Physiol. Rev.* 2005. №85. P.201–279.
9. *Bouchard R., Pattarini R., Geiger J.D.* Presence and functional significance of presynaptic ryanodine receptors // *Progress in Neurobiology.* 2003. V.69. P.391–418.
10. *Гайдуков А.Е., Марченкова А.Е., Балежина О.П.* Облегчение выброса медиатора при разных способах активации протеинкиназы С в моторных синапсах мыши // *Бюлл. exper. биол. мед.* 2012. Т.153. №5. С.321–324.
11. *Гайдуков А.Е., Мельникова С.Н., Балежина О.П.* Облегчение секреции ацетилхолина в моторных синапсах мыши, обусловленное выбросом депонированного кальция при активации кальциевых каналов L-типа // *Бюлл. эксп. биол. мед.* 2009. Т.147. №8. С.124–129.
12. *Huang C.C., Yang D.M., Lin C.C., Kao L.S.* Involvement of Rab3A in vesicle priming during exocytosis: interaction with Munc13-1 and Munc18-1 // *Traffic.* 2011. V.12. №10. P.1356–1370.
13. *Федорин В.В., Балежина О.П.* Участие н-холинорецепторов нейронального типа в регуляции выброса медиатора в нервно-мышечных синапсах мыши // *Нейрохимия.* 2008. Т.25. №1–2. С.99–104.
14. *Friel D.D., Chiel H.J.* Calcium dynamics: analyzing the Ca²⁺ regulatory network in intact cells // *TINS.* 2008. №11. P.576–679.
15. *Brnjic S., Olofsson M.H., Havelka A.M., Linder S.* Chemical biology suggests a role for calcium signaling in mediating sustained JNK activation during apoptosis // *Mol. Biosyst.* 2010. V.6. №5. P.767–774.
16. *Kawamoto E.M., Vivar C., Camandola S.* Physiology and pathology of calcium signaling in the brain // *Front Pharmacol.* 2012. V.3. P.61–68.
17. *Захаров В.В.* Блокаторы кальциевых каналов в лечении когнитивных нарушений и деменции // *Неврология.* 2009. №2. С.29–31.
18. *Diego I., Kuper J., Bakalova N. et al.* Molecular basis of the death-associated protein kinase-calcium/calmodulin regulator complex // *Sci. Signal.* 2010. V.26. №3. P.106–112.

Феномен симметрии дна океана

А.В.Ильин

Взгляд из прошлого

Конечно, мир и природа вокруг нас постоянно меняются, но более всего изменяются наши представления о них. Оставляя в стороне глубокую древность, вспомним, что лишь за три минувших века знание геологической истории Земли прошло путь от нептунистов (А.Вернер) и плутонистов (Дж.Геттон) до тектоники литосферных плит. Весь промежуток времени между ними заполнен чередованием счастливых озарений и досадных заблуждений относительно строения и развития нашей планеты. Ученый мир был свидетелем появления и исчезновения разнообразных гипотез, по которым Земля расширялась, сжималась или сохраняла свой первоначальный объем. У сторонников каждой из них были свои аргументы, и переубедить своих оппонентов редко кому удавалось. Эта привычка сохранилась и до сих пор, а во многих отношениях обострилась.

Понятно, что наиболее таинственными объектами исследований выступали океаны. Их также не обошла самая крутая мифология. Океан побывал в сознании людей бездонной пропастью, а если уж существование дна предполагалось, то оно было абсолютно ровным, раскинутым на необъятных просторах и немислимых глубинах. В середине XIX в. основатель



Александр Васильевич Ильин, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Акустического института имени академика Н.Н.Андреева. Область научных интересов — морская геология, геоакустика, экология. Лауреат Премии и Золотой медали Ф.П.Литке (1978).

американской гидрографической службы М.Ф.Мори, человек увлекающийся и романтичный, писал: «Если бы можно было осушить воды Атлантики, чтобы открыть взору этот громадный морской шрам, разделяющий континенты и простирающийся от Арктики до Антарктики, нам представился бы пейзаж чрезвычайно сложный и величественный. Самые ребра твердой земли, являющиеся основанием моря, были бы выведены на свет, и нам открылось бы зрелище пустой колыбели океана» [1]. Мори уже имел повод так высказываться. В те годы мир стал свидетелем героической и весьма драматической эпопеи прокладки первого трансатлантического телеграфного кабеля. В конечном счете 16 августа 1858 г. королева Виктория через океан телеграфировала президенту США Дж.Бьюкенену. Это означало официальное открытие телеграфной связи между Америкой

*Случайно на ноже карманном
Найди пылинку дальних стран,
И мир опять предстанет странным,
Закутанным в цветной туман.*

Александр Блок

и Европой. Стефан Цвейг назвал данное событие «звездным часом человечества». Другое дело, что эта связь продлилась всего 27 дней, а затем почти десятилетие (восемь лет) понадобилось, чтобы добиться ее стабильности. Главной причиной неудач были обрывы кабеля на дне — во многих случаях на хребте Рейкьянес, через который пролегла трасса. По иронии судьбы этот хребет тогда назывался Телеграфным плато. В то время оно было единственным местом в Атлантике, по которому можно было судить о сложности и величии «пустой колыбели океана». На батиметрической карте, составленной Мори в 1854 г., Срединно-Атлантический хребет даже не показан. Океан представлялся Мори корытом, разделяющим Старый и Новый Свет.

Прогресс в изучении дна океана связан с изобретением эхолотов в 20-х годах прошлого

столетия. Благодаря этим приборам была открыта система срединно-океанических хребтов. Точнее, об их существовании знали и раньше, но в 50-х годах были обнаружены важнейшие элементы их структуры — рифтовые долины и трансформные разломы. Открытие рифтов, разделяющих срединные хребты на две симметричные части, стало основой нового научного направления — концепции расширения дна океана, преобразованной в 60-х годах в концепцию тектоники литосферных плит.

Поскольку тектоника литосферных плит — порождение в основном американской науки, то и терминология, естественно, оттуда. Для пущей важности приведем русские эквиваленты только что упомянутых терминов. Рифт в тектонике

плит — это глубинный разлом, уходящий в земную кору и мантию океана на десятки километров, вплоть до астеносферы — геосферы Земли ослабленной прочности и пониженной вязкости, где часть вещества находится в расплавленном состоянии.

В астеносфере действуют медленные — так называемые конвекционные — течения. Поднимаясь вверх, они раздваиваются у подошвы твердой оболочки Земли — литосферы, разрывают ее на части, формируя отдельные блоки земной коры и мантии — литосферные плиты. Отсюда и название новой концепции — тектоника литосферных плит. Между плитами образуется глубинный разлом, куда и устремляется расплавленное вещество астеносферы. Поверхностное выражение вос-

ходящих конвекционных потоков — срединно-океанические хребты. По рифтовому ущелью магма поднимается вверх и дает начало образованию океанической земной коры. Проявлением глубинного рифта на поверхности дна океана служит рифтовая долина. Она располагается вдоль осевой зоны срединно-океанического хребта и простирается на тысячи километров, подобно гигантскому спуту, обнимающему земной шар. Рифтовая долина по внешнему виду напоминает речную долину с руслом, склонами и бровками склонов. Различие лишь в размерах. Рифтовая долина характеризуется глубинами от нескольких сот метров до 1,5–2 тыс. м и шириной от 10–20 км до 70–80 км. Склоны ее террасированы и разбиты

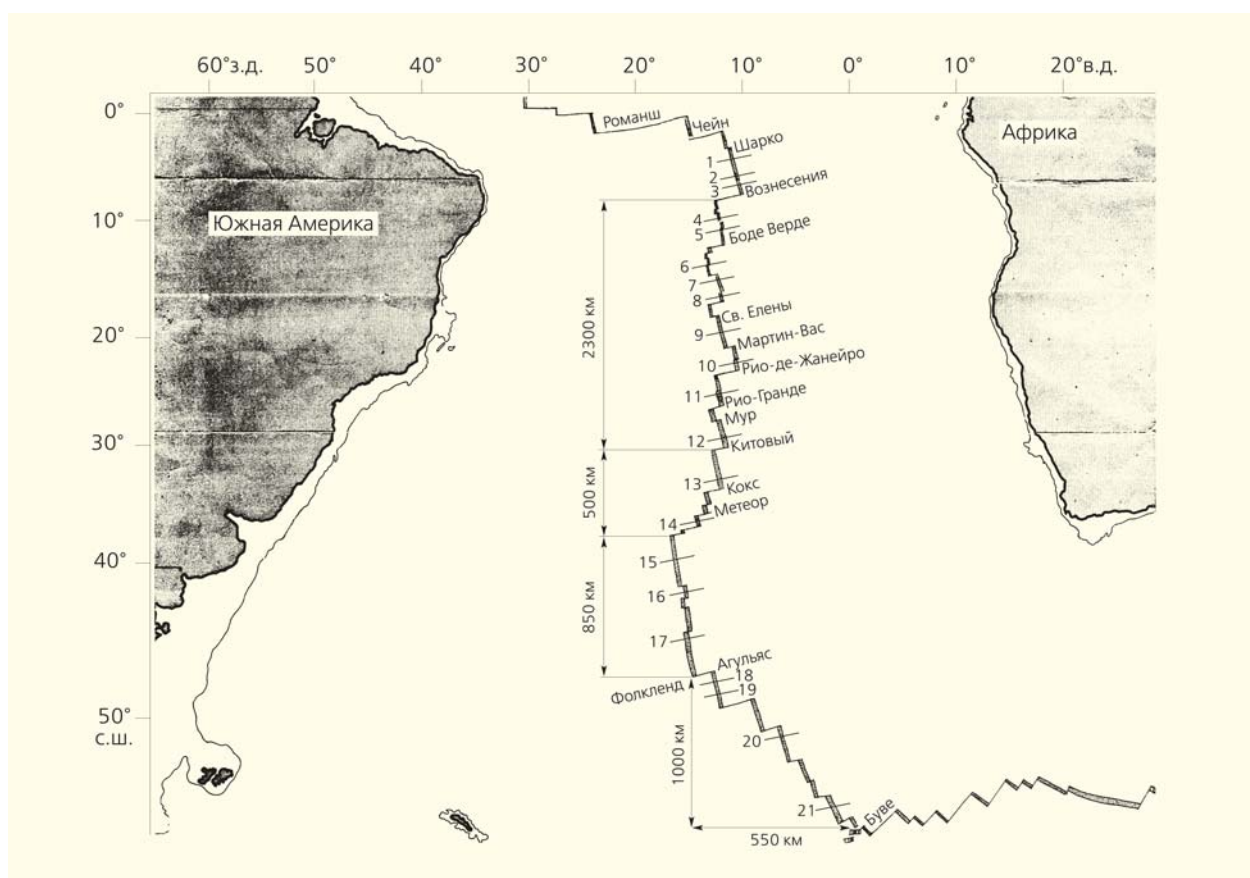


Рис.1. Схема расположения рифтовых сегментов и трансформных разломов (их названия подписаны) в Южно-Атлантическом срединно-океаническом хребте. Цифрами обозначено положение батиметрических профилей через рифтовые сегменты, показанные на рис.5. Осевая линия Срединно-Атлантического хребта нанесена с использованием данных Международного геолого-геофизического атласа Атлантического океана [2].

тектоническими сбросами, которые образуют своеобразный лестничный пролет. Русло рифтовой долины представлено так называемым центром спрединга — узкой полосой на дне, в которой происходит изливание расплавленной магмы на поверхность. Сам термин «спрединг» означает расширение, растекание, расползание. Именно от этой узкой полоски и начинается раздвижение литосферных плит и наращивание земной коры океана.

Центры спрединга, так же, как вмещающие их рифтовые долины, не непрерывны. Они смещены в боковых направлениях относительно друг друга. Окончания двух смежных сегментов соединяются поперечными разломами, получившими название трансформных, так как механизм раздвижения плит в рифтовых долинах (спрединг) при переходе к смежному сегменту трансформируется (преобразуется) в другой механизм — горизонтальный сдвиг. По линии сдвига противоположно направленные движения двух противостоящих плит находятся в тесном контакте, что приводит к мощному трению, истиранию коренных магматических пород, образованию больших объемов обломочного материала. Такое контактное взаимодействие плит в зоне трансформных разломов сопровождается сейсмической активностью. Простая геометрия строения рифтовой зоны (сочетание субмеридиональных рифтовых сегментов и перпендикулярных к ним трансформных разломов) показана на рис.1.

Новые времена — новые проблемы

С развитием нового теоретического направления в геологии стали возникать и новые проблемы. Среди них — геометрическая симметрия дна океана. Ее наглядным примером может служить дно Атлантического

океана, разделенное Срединно-Атлантическим хребтом (САХ) на две равновеликие части — западную и восточную. Тот факт, что они равновеликие, впервые установил известный американский исследователь дна океана Г.Менард. В конце 50-х годов прошлого века он, не «замечая» САХ, определил срединную линию океана на различных широтных разрезах, отмеряя равные расстояния от изобаты 1000 м на материковых склонах противоположащих материков: Европы — Северной Америки и Африки — Южной Америки. Соединив точки срединной позиции океана, он получил некую кривую, которая поразительным образом совпала с осевой линией срединно-океанического хребта. Так было показано, что САХ срединный не только в визуальном восприятии, но и медианный, по расчетным данным (рис.2).

На первый взгляд общая картина представляется ясной и понятной. Мы давно привыкли к безупречному совпадению контуров материков обеих Америки с береговыми контурами противоположащих материков Европы и Африки. Многочисленные реконструкции доказали это совершенно безукоризненно. Единый материк, объединявший в прошлом Америку, Европу и Африку, действительно существовал и известен теперь как суперконтинент Пангея. Логика подсказывает, что первоначальный раскол между разобщенными ныне материками сохранился в виде своеобразного шва, на месте которого и находятся современные срединно-океанические хребты. Например, контуры САХ без преувеличения можно назвать родственными контурам противоположащих материков. САХ изящной змейкой расположился между своими «предками», в точности повторяя их внешние очертания. Подобный феномен геометрической симметрии при всей своей внешней простоте вызывает неоднозначные толкования.

Мы понимаем, что симметрия — не сиюминутное явление, возникшее на современном этапе развития дна океана. Иначе пришлось бы признать, что наше время уникально в геологической истории океана. Но никаких других аргументов исключительности современной эпохи в геологии не существует. Следовательно, геометрическая симметрия дна океана есть неотъемлемая, родовая, черта океанической земной коры, которая неизменно воспроизводилась на всех этапах ее формирования. Важно отметить, что термин «геометрическая симметрия» употребляется не случайно. О какой-либо столь же строгой симметрии морфоструктурного или тектонического толка в пределах противостоящих литосферных плит речь не идет. Ее просто нет. Но из этого лишь следует вывод, что геометрическая симметрия океанического дна и конкретные структуры на границах литосферных плит —

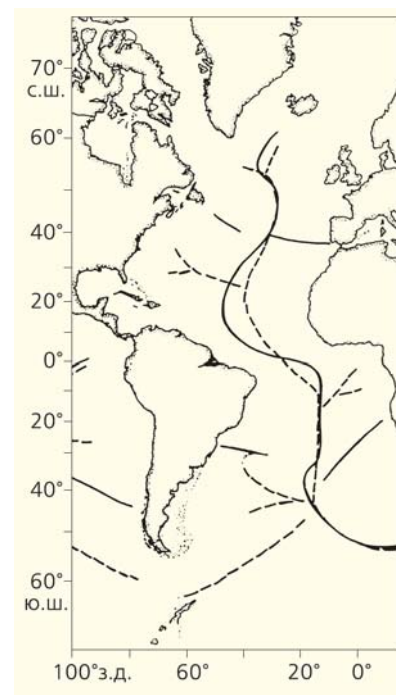


Рис.2. Сопоставление срединной линии (пунктир) Атлантического океана, определенной Г.Менардом, с осевой линией (сплошная) Срединно-Атлантического хребта.

явления разного порядка. Геометрическая симметрия — понятие более общее, изначальное, надгеологическое. Она всецело обусловлена геодинамическими причинами, которые скрыты в глубинах мантии под океаном. На материках эта особенность структуры земной коры и литосферы в таких масштабах не проявляется и вообще для них не характерна.

Простые объяснения — не всегда верные

Теперь желательнее прояснить вопросы происхождения геометрической симметрии, которая едва ли не с математической точностью воспроизводится в океанической земной коре на протяжении всей геологической истории океана. Есть разные подходы. Самый простой из них предложен на заре зарождения тектоники литосферных плит Г.Хессом [3], который рассматривал геометрическую симметрию как результат раздвижения плит конвекционными потоками, удаляющимися от осевой линии САХ с одинаковой скоростью. Хесс полагал, что литосфера и мантия Земли под океаном скреплены воедино и представляют жесткую конструкцию (рис.3). Если к этому добавить, что он оперировал в своих построениях конвекционными потоками мощностью около 750 км, обладающими гигантской энергией, то такой подход не вызывал особых сомнений.

Продолжая развивать подобный взгляд на симметрию, согласимся, что возникающая морфоструктура должна быть идентичной и однообразной по обе стороны рифта. Этот пункт в истории представлений о симметрии был ключевым и требовал обоснования. Однако его не последовало. Вскоре новые исследования показали исключительное разнообразие морфологической структуры осевых зон САХ, где создается и преобразуется новая земная

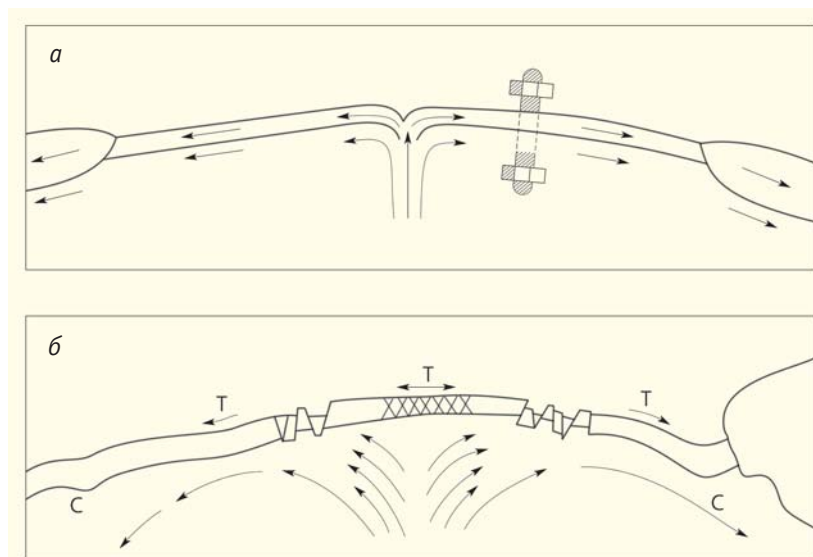


Рис.3. Некоторые представления о происхождении геометрической симметрии дна океана: *a* — литосфера и мантия надежно скреплены воедино и перемещаются конвекционными потоками в стороны с одинаковой скоростью. Симметрия очевидна (по Хессу); *б* — литосфера движется по мантии с вязким трением, испытывая сжатие и деформации. Симметрия не очевидна (по Менарду). Т — растяжение, С — сжатие.

кора. Как уже отмечалось, были открыты трансформные разломы, разделяющие срединно-океанические хребты на многочисленные большие и малые сегменты. Установлено, что литосферные плиты расходятся с различными скоростями от осевых линий срединных хребтов (дивергентных границ).

Версию, сходную с предположением Хесса, высказал и Менард, но по его мнению, литосферные блоки двигаются по мантии с вязким трением (рис.3). Литосфера при этом может сжиматься и деформироваться. Такие условия, однако, противоречат реальным стрессам в океанической земной коре — растяжениям. Да и сами конвекционные потоки отнюдь не всеми признавались движущей силой литосферных плит. Замечательный английский геофизик Э.Буллард, например, не отрицал полностью такую гипотезу, но отмечал, что «конвекция обычно не идет вдоль линий», изломанных многочисленными смещениями сегментов САХ. Кс.Ле-Пишон (выдающийся плейт-тектонист) пола-

гал, что конвекция как движущая сила плит противоречит геометрии их перемещения вокруг собственных полюсов вращения, поскольку угловые скорости изменяются от 0° у полюсов до максимальных на экваторе. В качестве альтернативы он предпочел идею раскалывания литосферы с передачей напряжений на далекие расстояния, никак, впрочем, не комментируя свою позицию. Доводы гипотезы расширения Земли (когда речь идет о геометрической симметрии) не отвечают условию равномерного расширения, необходимого для сохранения ее сферичности. Известно, что большая часть спрединга происходит относительно меридианов (80—90%), а минимальная — поперек широт (10—20%). В приложении к Атлантике направление спрединга от меридианов сохранялось на протяжении всей истории развития дна океана. Об этом предельно ясно свидетельствуют данные, полученные с помощью геоинформационных спутников Земли, согласно которым субширотные разломы на дне Атлантики про-

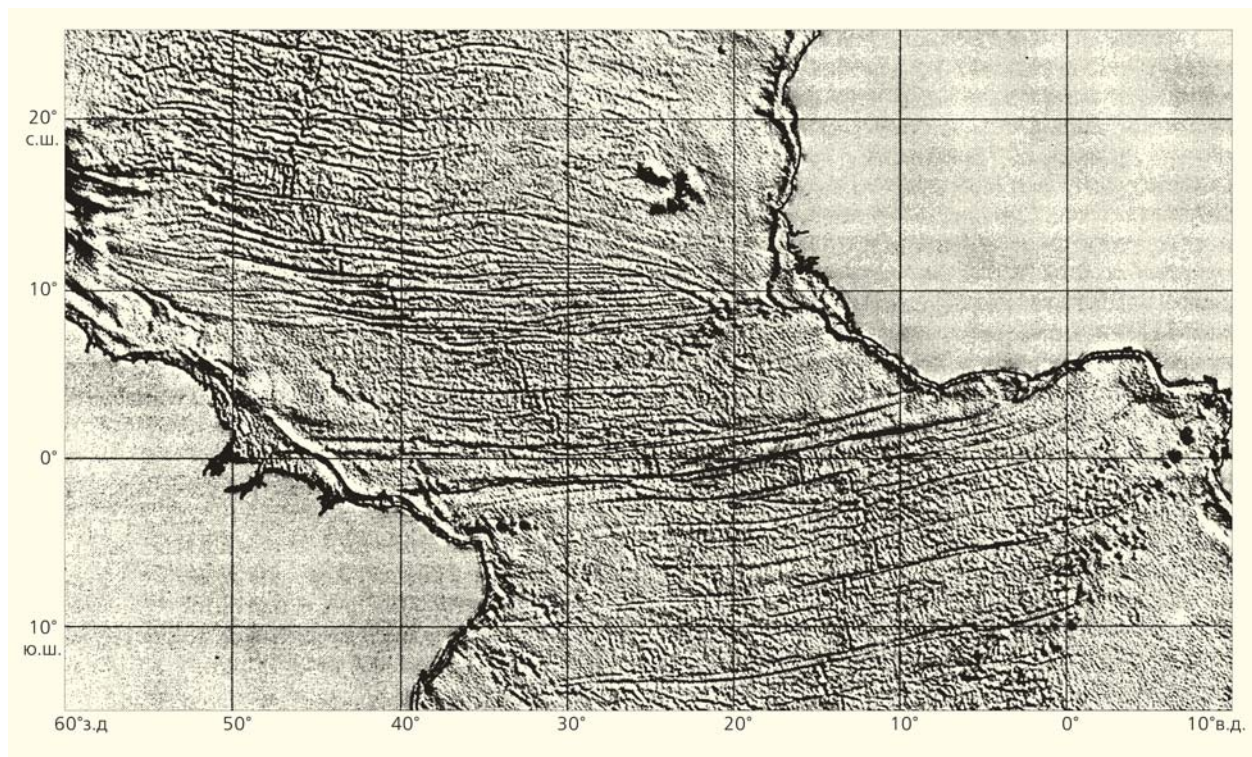


Рис.4. Поперечные разломы дна Атлантического океана (по данным альтиметрических измерений с геоинформационных спутников Земли).

слеживаются через весь океан (рис.4). Об этом же говорит и ориентировка магнитных аномалий, сохранившая субмеридиональное направление (включая мезозойский этап развития земной коры). Вместе с тем не вполне ясно, насколько безошибочно приведенные аргументы могут свидетельствовать против концепции расширения Земли. Можно ли напрямую связывать расширение нашей планеты с развитием морфоструктуры и тектоносферы ее тончайшей внешней оболочки?

Нельзя не упомянуть представления о симметрии еще одного видного представителя тектоники литосферных плит — В.Моргана, который ввел понятие о полюсах вращения плит. Он считал само собой разумеющимся, что, даже если одна плита стоит на месте, а другая удаляется от нее, все равно (в результате последовательного внедрения даек одна в другую) симметрия двух плит будет воспроизводиться. Действительно, симмет-

рия сохраняется, и с этим можно было бы согласиться, если бы не одно обстоятельство. В построениях Моргана нет места реальной морфоструктуре центра спрединга, которая создается при видоизменении новообразованной земной коры. В обобщенном виде она представлена на рис.5. Видно, что морфоструктура — продукт двустороннего процесса, результат взаимодействия двух плит, которые двигаются, а не стоят на месте. Укрупним рисунок и посмотрим, что же происходит в святой святых плитовой тектоники — в центре спрединга двух плит. Там постоянно идет двусторонний процесс созидания структуры рифтовой зоны (рис.6). Восстановление гравитационного равновесия центра спрединга с удалением от осевой линии приводит к формированию рифтовой долины и всей гармоничной морфоструктуры рифтовой зоны (чего никак нельзя ожидать при движении лишь одной из плит).

Загадки остаются

В итоге приходится признать, что рассмотренные представления о движущих силах литосферных плит не решают проблемы происхождения симметрии дна океана. Парадокс заключается в том, что при повсеместных различиях в скоростях спрединга геометрическая симметрия дна океана сохранялась и таковой дошла до наших дней. Более того, ось геометрической симметрии САХ переходит от одного крупнейшего сегмента хребта к другому по принципу эстафеты. При этом сегменты имеют различный геологический возраст. Самому северному из них, хребту Книповича, около 30 млн лет. Хребты Мона и Рейкьянес возникли 50–60 млн лет назад. Сегмент САХ от разлома Гиббса до Азорского плато существует 80–90 млн лет. Южнее Азорских о-вов (15–35°с.ш.) располагается самый древний фрагмент Атлантики с возрастом 150–180 млн лет.

Приэкваториальному сегменту 85—110 млн лет, а становление южной части Атлантического океана началось около 140 млн лет назад (рис.5).

Один из подходов к пониманию феномена геометрической симметрии заключается, на наш взгляд, в сопоставлении правосторонних и левосторонних смещений центра спрединга САХ (рис.7). Но здесь надо более четко определиться с терминологией. Еще В.В.Белоусов отмечал, что в тектонике плит правому смещению центра спрединга на длину смежного трансформного разлома соответствует левосторонний трансформ и наоборот, левому смещению центра спрединга — правосторонний трансформ. Мы здесь не касаемся функционального аспекта трансформных разломов. Они интересуют нас лишь как мера горизонтальных смещений центра спрединга. При этом смещениям центра спрединга придается классический смысл: сдвиг того или иного знака (хотя в действительности происходит лишь перескок оси).

Наибольшее сгущение смещений центра спрединга отмечается в приэкваториальной зоне Северного полушария и в южной приантарктической Атлантике. Поскольку длина трансформных разломов, как мы условились, служит мерой горизонтального смещения центров спрединга, то подсчет этих длин показывает, что центр спрединга в упомянутых регионах мигрирует в сторону американской плиты [4]. В то же время нельзя не отметить едва ли не равное соотношение правосторонних и левосторонних смещений центра спрединга в центральной части Южно-Атлантического срединного хребта. Здесь не все ясно и требует дальнейшего разбирательства.

Приведенная информация имеет прямое отношение к интерпретации геометрической симметрии дна Атлантики. Куда бы и с какой скоростью ни двигались плиты, центры спредин-

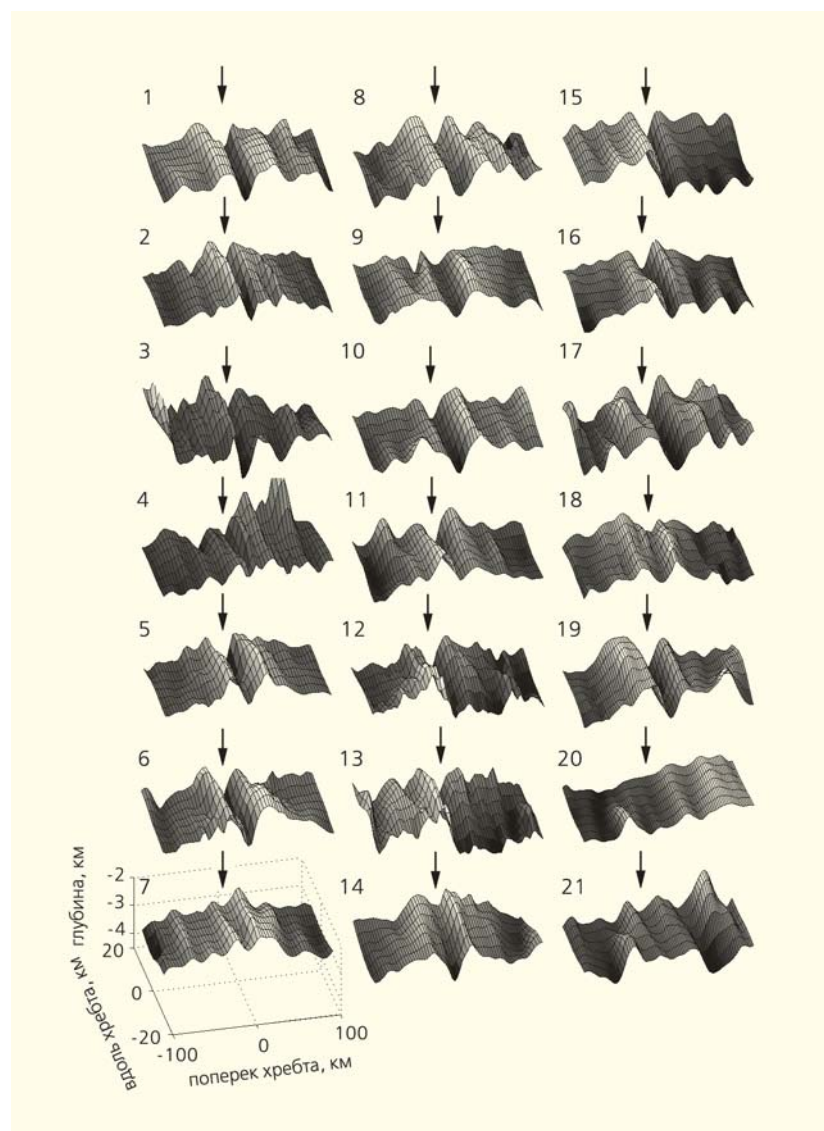


Рис.5. Серии батиметрических профилей через отдельные сегменты Южно-Атлантического хребта от экватора до о.Буве. Положение профилей показано на рис.1. Очевиден единый стиль рельефообразующих процессов. Второстепенные различия в морфоструктурном облике гребня САХ связаны с различными ситуациями, возникающими в центре спрединга (см. рис.6). Стрелками показано местоположение рифтовой долины.

га неизменно занимают в океане медианное положение по отношению к противоположным окраинам континентов. С позиций канонической концепции тектоники плит это в высшей степени странно, поскольку континенты в данном случае — не более чем пассивные геологические структуры, «впаянные» в более масштабные плиты и сидящие у них «на закорках». Поэтому важнейшее наблюдение

о непосредственной взаимосвязи симметрии дна океана с очертанием континентов долго оставалось в тени, иначе пришлось бы признать, что континенты служат границей литосферных плит и определяют течение геодинамических процессов в мантии под океаном. Но ни один континент сам по себе не является литосферной плитой. Подчеркнем еще раз: симметрия существует не по от-

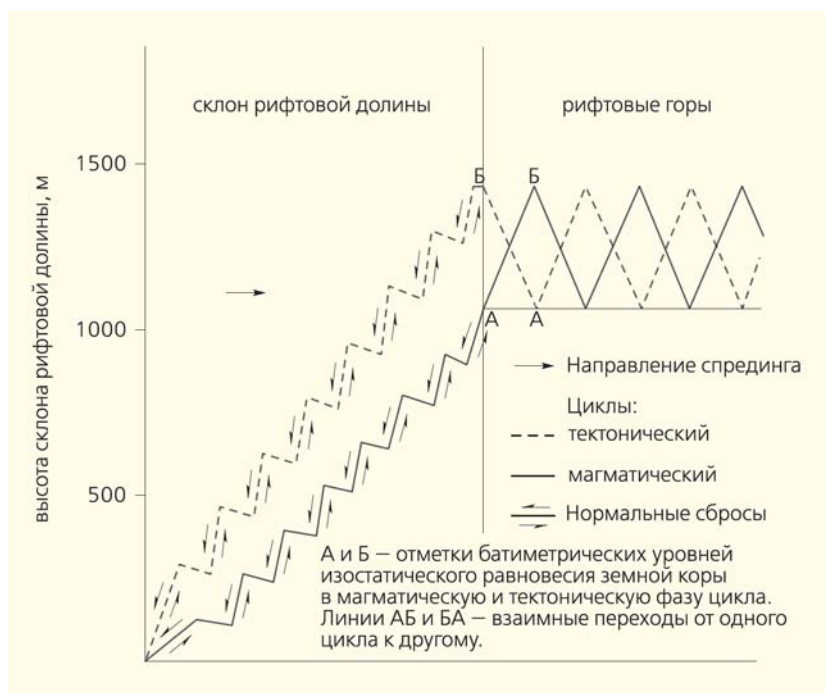


Рис.6. Принципиальная схема процесса формирования грядово-долинного рельефа на гребне САХ, обусловленного чередованием тектонического и магматического циклов в центре спрединга.

ношению к каким-либо границам литосферных плит, а по отношению к окраинам континентов. Возможно, разгадку феномена симметрии и следует искать в особой роли континентов, оказывающих влияние на движение плит.

Поворот к Вегенеру

В связи с этим представляют интерес попытки модернизировать [5] гипотезу плавающих континентов А.Вегенера. Численное моделирование показало, что континенты играют роль подвижных клапанов для теплового потока Земли, регулируют конвекционные течения и глобальные тектонические процессы, в том числе самостоятельные перемещения континентов. Таким образом, движутся уже не литосферные плиты с впаиваемыми в них континентами, а сами континенты с постоянно «примерзающей» к ним океанической литосферой. Можно предположить, что в случае взаимно-

го удаления двух континентов, существовавших ранее в единой структуре Пангеи, линия раскола между ними всегда будет оставаться посередине — как линия наименьшего сопротивления для поступающего на поверхность глубинного вещества. Это естественно, поскольку с боков требуются более мощные усилия, чтобы «продавить» уже затвердевшую литосферу. Другими словами, разделительная полоса (все-таки не линия) двух континентов и жестко прилегающих к ним океанических плит (как бы далеко они ни удалялись друг от друга) всегда будет унаследованной тектонической структурой между ними, тяготеющей к срединной линии океана. Вслед за удаляющимися континентами американской плиты, как тень, перемещается и центр спрединга. Тем самым обеспечивается сохранение геометрической симметрии между плитами. В нашем случае эта разделительная полоса есть не что иное, как центр спрединга. Дистальную (тыловую) зону

прирастания новых фрагментов океанической плиты можно назвать ситуативной, поскольку для нее характерны неоднозначные процессы возникновения и трансформации новообразованной земной коры и литосферы [6]. Здесь происходит восстановление изостатического равновесия земной коры. Оно сопровождается воздыманием периферических частей центра спрединга с образованием рифтовой долины. На сбросовых склонах долины обнажаются выведенные на поверхность породы (иногда с глубин 1.5–2.0 км). Рельеф по периферии рифтовой долины формируется как совокупность гряд и долин, поскольку эти события протекают на фоне постоянного проявления тектономагматической цикличности в центре спрединга (рис.6).

Активные процессы трансформации новой земной коры совершаются в ситуативной зоне шириной немногим более 100 км. Этого пространства хватает для того, чтобы сформировались основные структуры и рельеф новообразованной земной коры, которые затем без существенных изменений переходят на периферию и становятся достоянием океанического фундамента на всем пространстве дна океана. Ось спрединга в ситуативной зоне может неоднократно менять свою позицию и азимутальную ориентировку, пока не приобретет устойчивое направление. При этом не исключен обмен фрагментами новой коры между противостоящими плитами.

Как следствие такого поведения центра спрединга, по простиранию САХ образуется осевая сегментация. Неслучайно средняя длина трансформных разломов в общих чертах совпадает с границами ситуативной зоны. Но ситуации возникают разные, и современная картина сегментации, расположение трансформных разломов, их протяженность не обязательно должны быть унаследованными от

прошлых этапов спрединга, как это предполагалось ранее. Каждый этап измеряется 1.5—2 млн лет, что соответствует полному циклу формирования рифтовой долины медленно-спрединговых хребтов при условии раздвижения плит в режиме non-stop (без остановки). В качестве же центра спрединга остается структура, занявшая наиболее устойчивое положение.

Представляется вероятным, что центр спрединга выстраивается от места к месту по направлениям, предписанным ему необходимостью соблюдать симметрию по отношению к окраинам материков. Середина между ними, как уже упоминалось, фиксирует положение оптимального канала для проникновения магматического расплава из глубины. Другими словами, симметрия представляется динамической константой, отвечающей равному расстоянию от краев континентов до центра спрединга любого сегмента САХ. Возникающее же несоответствие корректируется в ситуативной зоне. В качестве механизма коррекции выступает миграция центра спрединга путем «перепрыгивания» с одного места на другое, что и получило название «джампинг». Проявление симметрии действует здесь как фактор преобразования морфоструктуры осевой зоны САХ. Эта роль симметрии в формировании морфоструктуры прослеживается в ретроспективе до окраин современных континентов. Стилистика морфоструктурных преобразований от центра спрединга на всем латеральном пространстве одна и та же. Везде наблюдается сегментация осевой зоны САХ, хотя ее разнообразие в прошлом может быть выявлено лишь при детальных геолого-геофизических исследованиях [4]. Прекращение активных структурных преобразований новой литосферы в ситуативной зоне фиксируется внешними окончаниями трансформных разломов, где они переходят в пассивную фазу, и след их нередко тянется до

подводных окраин материков. Еще раз обратимся к рис.4, на котором показана нерукотворная, а следовательно, наиболее объективная картина распределения трансформных поперечных разломов. Искусственные спутники «SeaSat» и «GeoSat», вращающиеся по субполярным орбитам, пересекали поперечные разломы вкрест простирания. Естественно, что эти структуры максимально четко отразились на картах, составленных по альтиметрическим данным. Интересно отметить, что простирание трансформных разломов от Америки к Африке без изменений генеральных направлений спрединга не согласуется с предположением о его разделении на несколько этапов. Проявлением подобных различий (по некоторым данным) считалось как раз несоответствие направлений кайнозойских и докайнозойских трансформных разломов.

Если бы можно было направить спутники по субэкваториальным орбитам, то получившаяся картина отражала бы субмеридиональные разломы (рифтовые структуры). Совокупность субмеридиональных и субэкваториальных структур позволит получить адекватную картину морфоструктуры дна океана, которая сможет показать, что океаническая земная кора представляет собой своеобразное «крошево» — мозаику бесчисленных блоков, образованных взаимно перпендикулярными разломами. Впрочем, детальные современные данные о глубинах, полученные в результате альтиметрических измерений, уже сами по себе позволяют именно так охарактеризовывать современный рельеф акустического фундамента дна океана.

В приложении к Атлантике все структуры, сформированные в центре спрединга и его ближайшей периферии, имеют субмеридиональную ориентировку, характерную и для периферийного пространства акустического фундамента. Структурный каркас новообразован-

ной литосферы свидетельствует о длительной унаследованности и безусловной стабильности глубинных геодинамических процессов на протяжении всего этапа эволюции дна океана. Феномен симметрии играет при этом важную роль, поскольку, повторимся еще раз, постоянно восстанавливает центр спрединга в срединном положении по отношению к окраинам континентов.

От теории к практике

В этом смысле симметрия дна океана может использоваться как критерий при уточнении границ материковых и океанических блоков земной коры. Характерный пример — заложение рифтового хребта Гаккеля между материковым склоном Северной Европы и хребтом Ломоносова. Последний, видимо, представляет собой континентальный реликт материковой земной коры, существовавшей ранее в Северном Ледовитом океане. Проще говоря, хребет Ломоносова не что иное, как отторженец Европейской плиты, отделившийся от нее путем внедрения рифта, который сформировал и спрединговый хребет, в недавнее время названный в честь советского геолога Я.Я.Гаккеля. Расстояния от оси хребта Гаккеля до подножия хребта Ломоносова и материкового склона Европы практически одинаковы, а их генеральные очертания идентичны. Поскольку Северный Ледовитый океан представляет большой интерес с точки зрения разведки природных ресурсов (нефти и газа), важно понимать распределение континентальных сегментов, перспективных на нефть и газ и менее перспективных в этом отношении областей дна. В настоящее время идут, в частности, дискуссии по поводу происхождения хребта Ломоносова. Наши данные о симметрии осевой зоны хребта Гаккеля по отношению к хребту Ломоносова

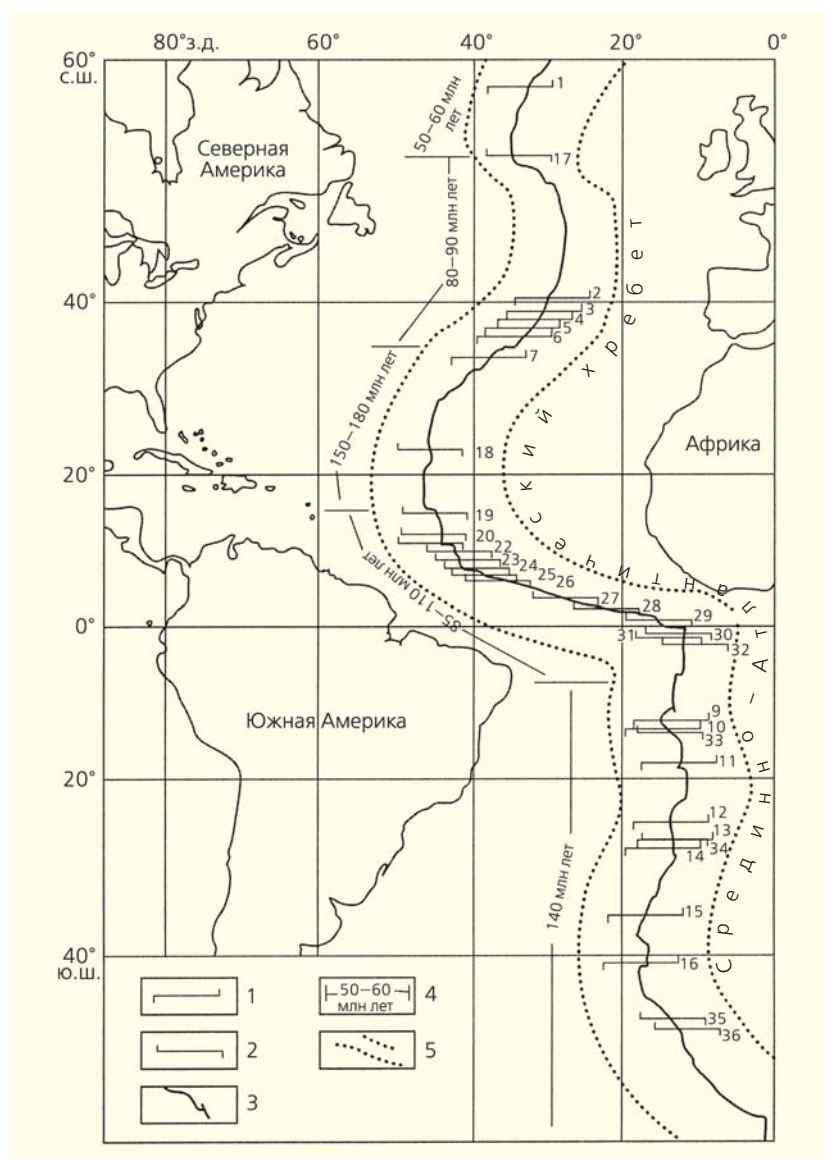


Рис. 7. Единая ось симметрии дна Атлантического океана объединяет по принципу эстафеты центры спрединга, заложившиеся в крупнейших сегментах Атлантики на различных этапах ее геологического развития. Смещения центров спрединга САХ на современном этапе: 1 — правосторонние; 2 — левосторонние; 3 — осевая линия САХ; 4 — разграничение сегментов земной коры Атлантики по возрасту; 5 — контуры САХ.

однозначно свидетельствуют о его континентальной природе. Другими словами, симметрия в данном случае служит дополнительным индикатором в оценке геологических структур в пределах океанического дна. Говоря о практическом значении данных о симметрии, которая в значительной степени определяет особенности расчленения рельефа САХ и других

подводных хребтов, надо отметить и ее роль в оценке геоакустических условий дна океана. Без их понимания невозможно полноценное геоакустическое районирование важнейшего элемента моделей акустики океана. Излишне говорить, насколько эти данные необходимы военно-морскому флоту для характеристики гидроакустических обстановок в океане.

К новому знанию

Итак, из всех современных геотектонических концепций геометрическая симметрия дна океана лучше всего согласуется с модернизированной гипотезой плавающих континентов, которые могут считаться определяющим фактором организации мантийной конвекции. В свою очередь, мантийная конвекция ответственна за формирование океанических литосферных плит. Симметрия океанической земной коры свидетельствует о преобладании в ней стрессов растяжения. Она лучше всего согласуется с «растаскиванием» литосферы, которое обеспечивается плавающими континентами [5]. Однако вопросы остаются. Они касаются прежде всего проблемы формирования непрерывной медианной полосы САХ, пересекающей хребет по всей длине. При этом различия в возрасте отдельных сегментов САХ, как уже упоминалось, достигают 150 млн лет, а в смежных возрастных сегментах — нескольких десятков миллионов лет (рис. 7). Мы видим, что было время, когда в экваториальном сегменте современной Атлантики существовал континентальный мост шириной 1000—1500 км. В тропических лесах маршировали динозавры, а поскольку времени в запасе было много, то и змеи, ящерицы и даже улитки (послужившие впоследствии Вегенеру одним из аргументов былого единства современных континентов) переползали на далекие расстояния. К северу же и к югу от моста уже десятки миллионов лет бушевали мини-океаны — фрагменты единой ныне Атлантики. Но к моменту активизации субмеридионального разлома середина этого моста практически «уткнулась» в середину северного мини-океана с одной стороны и южного — с другой.

Сформулируем осторожное предположение, что медиана САХ унаследована от первич-

ной «линии слабости», вдоль которой произошел субмеридиональный раскол единого материка Пангеи, развивавшийся затем крайне неравномерно. Именно от первичного разлома берет свое начало геометрическая симметрия. Но для каждого возрастного сегмента (рис.7) первый раскол — свой собственный. В этом заключается неравномерность развития некоего начального раскола Пангеи. Вообще возрастная сегментация Атлантики ставит перед тектоникой плит сложные вопросы. Действительно, сегменты Северной (150—180 млн лет) и Южной (140 млн лет) Атлантики двигались автономно, поскольку были разделены экваториальным континентальным мостом, который незыблемо скреплял Южную Америку и Африку до времени ~80 млн лет назад — т.е. до начала их разъединения. Что же, к этому моменту оба материка входили в единую литосферную плиту? Такую конфигурацию представить непросто. Но когда наступило полное разъединение Африки и Южной Америки, то далее на протяжении всей геологической исто-

рии океана симметрия, как тень, сопровождает раздвигающиеся плиты и «жметесь» к более скоростной плите, располагаясь всегда по центру дна. Наблюдается некая самоорганизация структуры дна океана.

Таким образом, геометрическая симметрия дна океана представляет собой динамическую константу мантии и земной коры, отвечающую равному расстоянию от краев континента до центра спрединга. В условиях неравномерного расхождения литосферных плит возникает отклонение от симметрии, которое корректируется миграцией центра спрединга в сторону плиты, удаляющейся с большей скоростью. Образуется сегментация рифтовой зоны с различным сочетанием главных элементов морфоструктуры — рифтовых долин и трансформных разломов.

Трансформные разломы при этом следует рассматривать как вторичные структуры. Их возникновение целиком определяется динамикой центра спрединга, и главным образом миграцией и джампингом. Постоянное восстановление геометри-

ческой симметрии происходило в течение всей истории формирования дна Атлантического океана и дошло до наших дней. Сейчас мы наблюдаем ее современный вариант. Он эфемерен, как и все предыдущие.

Геометрическая симметрия дна океана — один из узловых аспектов геоморфологических исследований дна океана. Рельеф наглядно воплощает результаты геодинамических процессов и поддается непосредственному анализу. Конечно, геометрическая симметрия нуждается в дальнейшем изучении. Она представляется пока неким кодом, расшифровка которого равносильна решению многих основополагающих вопросов геодинамики земной коры и океанической мантии. Многое зависит от детализации морских геоморфологических исследований как весьма эффективного направления в изучении дна океана. Не все пока складывается, но так или иначе исследования продолжают. И слава Богу. Торопиться не надо. Как говорил Александр Сергеевич Пушкин, «служение муз не терпит суеты». ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 10-05-00196а.

Литература

1. Маури М.Ф. Physical geography of the sea. N.Y., 1885.
2. Международный геолого-геофизический атлас Атлантического океана / Ред. Г.Б.Удинцев. М., 1989—1990.
3. Хесс Х. Срединно-океанические хребты и тектоника дна океана // Геология и геофизика морского дна. М., 1969. С.246—261.
4. Ильин А.В. Симметрия дна океана — ключ к пониманию генезиса морфоструктуры рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта // Геоморфология. 2011. №4. С.3—11.
5. Трубицын В.П. Основы тектоники плавающих континентов // Физика Земли. 2000. №9. С.4—40.
6. Ильин А.В. Происхождение и развитие морфоструктуры рифтовых зон медленно-спрединговых срединно-океанических хребтов // Океанология. 2010. Т.50. №2. С.262—276.

Основная карта России

Т.В.Верещака

«Географические карты открывают взору всю нашу планету и вместе с тем могут воспроизводить детальную картину ее отдельных частей, характеризуя природу, население, хозяйство, культуру. Несомненно, они принадлежат к великим творениям человеческой мысли» [1]. Эти слова К.А.Салищева можно полностью отнести к топографической карте. Покажем ее существенные свойства.



Тамара Васильевна Верещака, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой картографии Московского государственного университета геодезии и картографии. Область научных интересов — географическая картография (топографическое, тематическое, экологическое картографирование), дистанционное зондирование, география.

Математическая и геодезическая основа карты

*Изучая суть проекций,
надо помнить положение:
С переходом сферы в плоскость
неизбежны искаженья.
Карты вовсе не безгрешны
и в пределах разных норм
Нарушают верность линий,
площадей, углов и форм.*
А.В.Гедымин

Топографические карты строятся по законам проектирования физических тел на плоскость. При переходе от физической поверхности Земли к ее отображению на плоскости (карте) необходимо сначала спроектировать земную поверхность на поверхность эллипсоида*, а затем

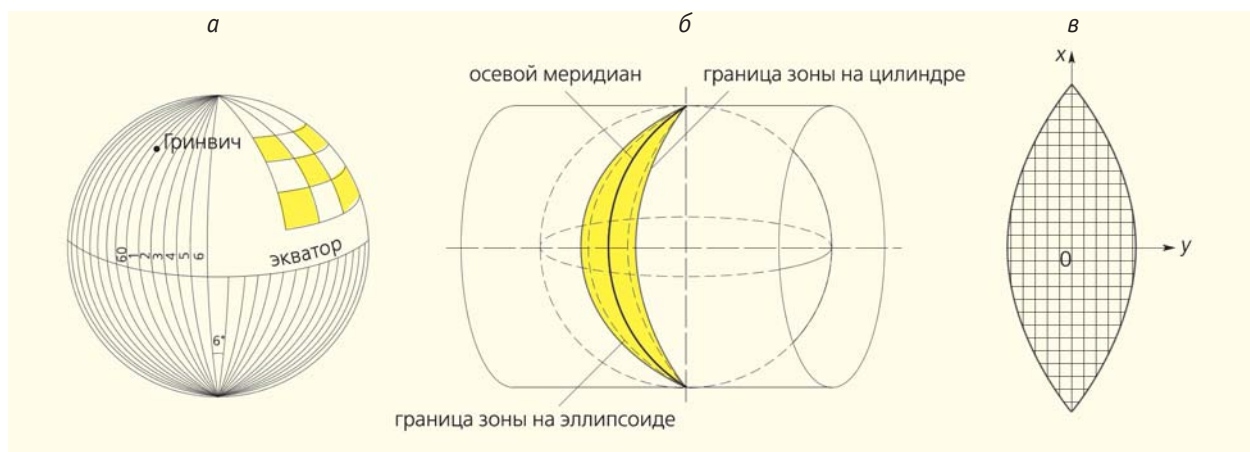
* Построение карт предполагает проектирование земной поверхности с ее сложным рельефом на математическую поверхность Земли, которая в картографии заменяется на близкую по форме поверхность эллипсоида вращения (фигуры, полученной вращением эллипса вокруг его малой оси).

изобразить поверхность эллипсоида на плоскости в одной из картографических проекций. Проекция устанавливает соответствие между географическими координатами точек земного эллипсоида и прямоугольными координатами тех же точек плоскости.

Для топографических карт принята равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса—Крюгера, вычисленная по элементам эллипсоида Ф.Н.Красовского. При построении этой проекции в качестве вспомогательной поверхности выступает боковая поверхность цилиндра, касательного к эллипсоиду. Поверхность эллипсоида разделяют на сфероидические двуугольники — геодезические зоны, каждая из которых изображается на плоскости самостоятельно. Двуугольники ограничены меридианами, отстоящими друг от друга на 6° (при составлении крупномасштабных карт и планов — на 3°). В каждой из шестиградусных зон строят самостоятельную систему прямоугольных координат, имеющую в качестве осей средней меридиан зоны и экватор. Соответственно, в отличие от других географических карт, топографические имеют не только градусную сетку долгот и широт, но и квадратную километровую сеть.

Проекция топографических карт позволяет получить полное геометрическое подобие очертаний местности и сохранить постоянство масштаба практически по любым направлениям. Но при сохранении равенства углов длины линий изображаются с искажениями. Без геометрических деформаций земную поверхность изобразить нельзя, на любой карте искажения неизбежны. Это «расплата» за пользование плоским изображением географических объектов, расположенных на сфере. Но на топографических картах искажения длин линий практически незаметны (они находятся в пределах ошибок геодезических построений).

Каждый лист топографической карты представляет собой ограниченную выпрямленными дугами меридианов и параллелей трапецию, размер которой зависит от масштаба карты и широты местности. Единая система деления карт, обеспечиваемая проекцией, позволяет легко и удобно сводить воедино листы одного масштаба и в пре-



Равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса—Крюгера: *а* — деление поверхности земного эллипсоида на шестиградусные зоны (цветом показаны листы карт, цифрами — номера зон), *б* — проекция зоны на цилиндр, касательный к земному эллипсоиду по осевому меридиану, *в* — километровая сетка зоны.

делах зоны склеивать их без разрывов в многолистные блоки.

Топографические карты имеют опорную плановую и высотную геодезическую сеть — совокупность равномерно расположенных по всей территории страны пунктов с известными координатами и высотами. Для обеспечения взаимной видимости между пунктами устанавливают геодезические знаки — деревянные или металлические пирамиды высотой до 10—12 м и сигналы высотой от 12—15 до 40 м. Координаты и высоты пунктов геодезической сети определены в единой государственной системе. Отсчет высот ведется от среднего многолетнего уровня Балтийского моря в Финском заливе в районе Кронштадта (нуль Кронштадтского футштока*). На базе пунктов государственной геодезической сети создается более густая съемочная сеть — основа для проведения точных топографических съемок на больших площадях.

Издаются карты, как правило, многолистными сериями, имеющими определенную схему разграфки и порядкового обозначения листов, называемую номенклатурой. По этой номенклатуре всегда можно определить масштаб, географическое положение и площадь территории, изображенной на данном и соседнем с ним листах.

Тип и содержание топографической карты

География только тогда выходит из младенческого возраста, когда основой ей служит топография.

А.А.Тилло

Тип топографической карты сложился исторически в соответствии с потребностями практичес-

* Футшок — рейка с делениями для наблюдений за уровнем воды.

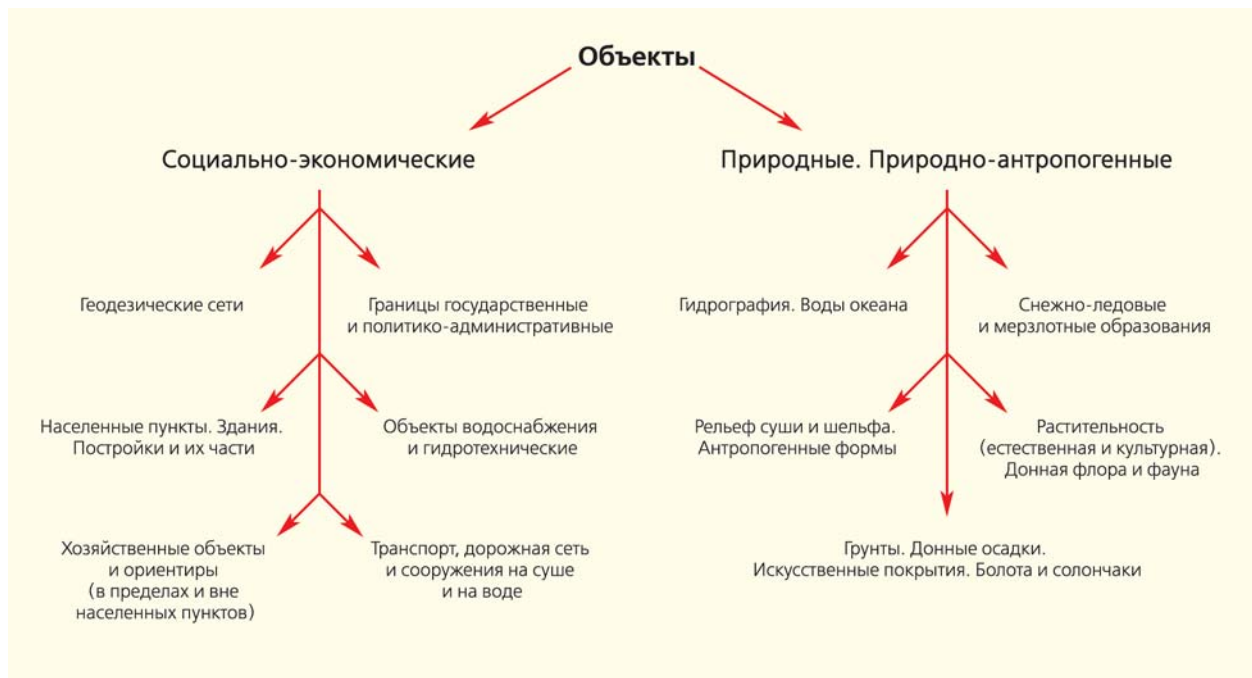
кой деятельности людей. Изображение внешнего облика земной поверхности складывается из визуально различных (видимых) элементов местности с качественными характеристиками и количественными показателями. На картах показываются форма поверхности (рельеф) и расположенные на ней объекты — воды (гидрографическая сеть), растительный покров, грунты, населенные пункты, пути сообщения, государственные и административные границы, хозяйственные объекты, ориентиры, памятники природы и культуры. Все перечисленные элементы равнозначны, взаимосвязаны по положению и образуют целостное интегральное изображение местности. Таким образом, карты имеют комплексное содержание и общегеографическое назначение.

По степени объективности топографические карты относятся к первичным (документальным)**. Они показывают реальные объекты по результатам их исследования на местности с необходимой подробностью и точностью (ограниченной заданными наперед предельными ошибками в плане и по высоте для каждого масштаба).

Для топографических карт принят единый ряд масштабов: 1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000 (топографические карты и планы); 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000 (собственно топографические карты); 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000 (обзорно-топографические карты).

Содержание карт — совокупность отображаемых на них сведений — определяется единой сис-

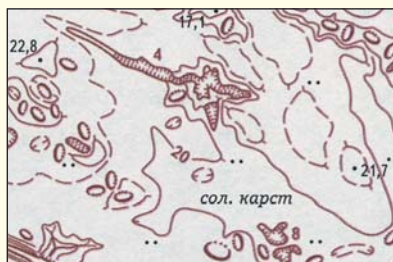
** Первоначально топографические карты создавались съемочным путем вплоть до масштаба 1:200 000, но технический прогресс способствовал перенесению центра тяжести работ в камеральные (лабораторные) условия. Поэтому при оценке топографических карт выдвинут критерий их первичности — обязательное в минимальном, но достаточном объеме производство съемок и полевого обследования.



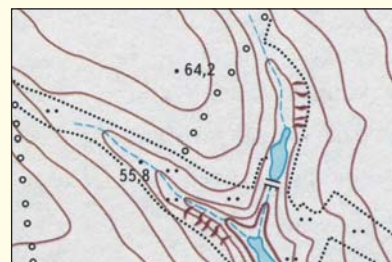
Классы объектов топографических карт.



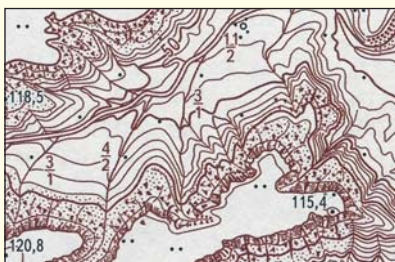
Озерно-болотно-солончаковые комплексы с непостоянной береговой линией озёр, прибрежно-водной растительностью в котловинах и полупустынной на повышениях



Равнина с полупустынной растительностью и развивающимися карстовыми образованиями – воронками и слепами оврагами. Преобладает соляной карст



Эрозионные понижения (балки) с полукустарниковой растительностью, используемые для строительства небольших водохранилищ и прудов



Уступ плато с эрозионным расчленением (промоины), осыпями, с крайне редкой растительностью



Поймы с древесно-кустарниковой растительностью вдоль рек, участки степей и пашен на террасах



Мелкосопочник с солончаковыми котловинами и полукустарниковой растительностью

Образ местности, отображаемый условными знаками в сочетаниях.

темой обозначений. Она представлена изданными таблицами для карт отдельного масштаба (1:10 000; 1:1 000 000) или их групп (1:500 — 1:5000, 1:25 000 — 1:100 000, 1:200 000 — 1:500 000). Разработана система отбора и обобщения показываемых объектов в зависимости от масштаба карты (методы генерализации). Во всех таблицах условные знаки группируются в разделы по основным элементам содержания. Каждый знак указывает на положение, вид и характеристику объекта. Форма знаков определяется плановыми очертаниями объектов, к тому же многие обозначения имеют ассоциативный (напоминающий) рисунок и цвет.

Топографические карты — многолистное, но целостное картографическое произведение. Они обладают единой проекцией и масштабами, находящимися в простых соотношениях, имеют согласованные содержание и системы обозначений и располагают точными сводками листов по всем рамкам. Исходя из такой высокой степени унификации по всем параметрам, термин «топографическая карта» можно употреблять в собирательном значении.

На топографических картах изображаются социально-экономические, природные и природно-антропогенные объекты, которые условно объединены в классы. Объекты, отображаемые внутри этих классов, дают возможность получить по картам множество разных сведений — о типе поселений, их плотности и характере планировки; о хозяйственном значении территории; о классах и техническом устройстве дорог; о сооружениях воздушного, сухопутного и водного транспорта; о размерах и типах рек, озер, их водном режиме и свойствах вод; о рельефе суши и дна водоемов, о строении, происхождении и развитии форм рельефа; о растительности разных природных зон; о болотных массивах и их проходимости; об открытых грунтах; о памятниках природы и культуры. Карты обычно отображают местность на определенном моменте времени (дату съемки) в течение летнего периода.

Действующие таблицы условных знаков топографических карт насчитывают в самых крупных масштабах 495, а в средних — 361 обозначение отдельно отображаемых объектов и их характеристик, не считая перечня условных сокращений для пояснительных подписей. Но информативность карты определяется не отдельными знаками и их количеством. Зрительный образ формы, величины, взаимного положения объектов, их пространственные связи и соподчиненность воссоздаются всеми графическими средствами: рисунком обозначений, их величиной, ориентировкой, цветом, а главное — внутренней структурой, создаваемой умелым, основанным на географическом знании ландшафта, применением условных знаков в сочетаниях. Так формируется картографический образ местности, ее природный рису-

нок. Именно он определяет ценность карты для читателя [2].

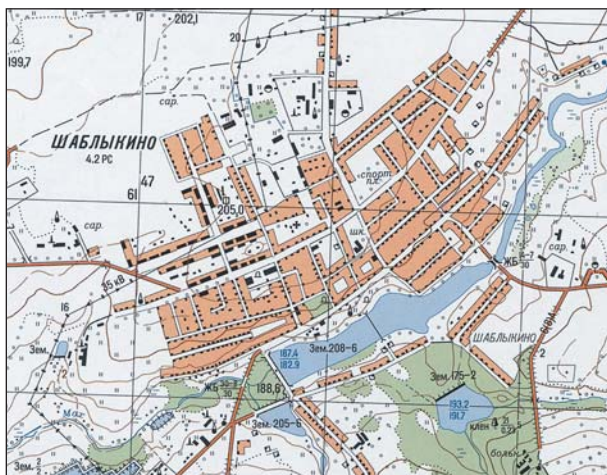
Система общегосударственных карт

Топографической изученности государств всегда придавалось большое значение во всем мире. В России топографические карты составляют основной картографический фонд многоцелевого использования. Они необходимы для решения экономических, оборонных, научных задач и для развития самой картографии, т.е. имеют общегосударственное значение. Выдающийся советский геолог академик И.М.Губкин писал: «Топографические карты и планы служат необходимым условием для последующего успешного осуществления работ геолога, разведчика, гидролога, гидротехника, географа, астронома, почвовед, лесоведа, инженера-проектировщика, инженера-строителя и т.д. и т.п. Все эти специалисты без топографической карты — все равно что плотник без топора или кузнец без молотка».

Создание карт — постоянная забота картографо-геодезической службы России. В настоящее время в нашей стране существует система топографических карт, многократно испытанная и сыгравшая важную роль на разных стадиях развития государства, в том числе и в годы войны. Ее основу составляют карты масштабов 1:25 000 — 1:1 000 000, 1:10 000 и 1:200 000 — 1:5000.

Топографические и обзорно-топографические карты масштабов от 1:25 000 до 1:1 000 000 созданы на всю территорию России. В указанном диапазоне масштабов следует особо выделить самую крупномасштабную карту, имеющуюся сегодня на всю территорию России. Это основная государственная карта масштаба 1:25 000. Начало работе над ней положено в 1946 г., а завершено ее создание в 1988-м. Изданы 300 тыс. листов, содержащих уникальную информацию. Спрос на карту постоянно растет, поэтому ведется ее обновление. В создании карты участвовало более 100 тыс. геодезистов, топографов и картографов. Основная карта страны, если склеить ее листы, разместилась бы на площади 207×445 м. Стоимость выполненных топографических и геодезических работ составила 3.6 млрд руб. В полевых топографических съемках принимали участие организации Главного управления геодезии и картографии (85% общего объема работ), Военно-топографического управления Генерального штаба Вооруженных сил РФ (10%), в работах по побережью Северного Ледовитого океана — организации Главного управления навигации и океанографии (5%) [3]. Для стран мира в целом наличие карты масштаба 1:25 000 служит показателем высокой степени топографической изученности.

Карта масштаба 1:50 000 — «основная тактическая карта» — имеет большое значение для реше-



Фрагмент топографической карты масштаба 1:25 000.

ния военных задач. Во многих развивающихся странах она создается также в качестве основной карты, обеспечивающей экономическое развитие и использование природных ресурсов.

Карта масштаба 1:100 000 — основная карта государства. Она завершила первый тур полного картографирования нашей страны и сыграла особенно большую роль в освоении Севера и Сибири. Сегодня эта карта полностью обновлена и служит вместе с космическими снимками источником для обновления «устаревших» обзорных карт (базовых для комплексного исследования и картографирования природных ресурсов). Более того, карты масштаба 1:100 000 и обзорно-топографические карты масштабов 1:200 000 и 1:1 000 000 имеются на всю территорию России в цифровом виде. В свое время их перевод из бумажной в цифровую форму стал задачей целевой ведомственной программы. Сегодня оцифровка традиционных (бумажных) карт одновременно с их обновлением ведется и для более крупных масштабов.

Карта масштаба 1:10 000 обеспечивает преемственность от предыдущей группы карт к самым крупномасштабным и охватывает все промышленные и сельскохозяйственные районы общей площадью более 5 млн км² [3]. Рубеж 1:10 000 условно разграничивает карты и крупномасштабные картографические изображения, традиционно называемые планами.

Топографические карты и планы масштабов 1:2000 и 1:5000 созданы на все города, поселки городского типа и промышленные зоны. Их отдельные участки могут иметь крупные планы — масштабов 1:500 — 1:1000. Во многих городах такое картографирование выполнено со съемкой подземных коммуникаций. На основе крупномасштабных карт и планов решаются инженерные задачи: детальная планировка и размещение строительства разного назначения, обустройство инже-

нерных сетей и коммуникаций, земельно-хозяйственное устройство и озеленение, разведка и подсчет запасов полезных ископаемых, а также многие другие.

Рассмотренные группы карт и планов — это основная топографическая продукция. Когда же возникают задачи углубленного изучения природы или экономики региона, горизонты топографической картографии существенно расширяются. Одно из направлений — создание специализированных топографических карт (с измененным содержанием) для целей различных отраслей хозяйства.

Для изучения и освоения минерально-сырьевых и биологических ресурсов Мирового океана, проектирования схем улучшения технического состояния и благоустройства водохранилищ, обеспечения населения водой разработан новый тип карт — топографические карты акваторий (шельфа морей и внутренних водоемов). Съемки выполнены на площади примерно 350 тыс. км².

Замечательны по своей точности и подробности топографические карты Антарктиды. Космические съемки материка позволили создать карты с впечатанным фотографическим изображением — фотокарты. Ведется работа по созданию цифровой карты Антарктиды в масштабе 1:250 000. В ходе топографического картографирования



Фрагмент топографической карты прибрежной части суши и акватории (шельфа).

географическим объектам континента присвоено более 500 русских названий.

На базе топографических карт и планов выпускаются серии карт для широкого открытого использования и продажи населению: серия обзорно-топографических карт масштаба 1:500 000, областные топографические карты масштаба 1:200 000, серия «Общегеографические карты Российской Федерации по субъектам РФ» в диапазоне масштабов от 1:200 000 до 1:1 000 000, серии «Топографические карты России» и «Карты городов России».

Топографические карты и планы во всем их многообразии по территориальному охвату, масштабам, типам, содержанию и форме (графической, цифровой, фотографической) представляют собой уникальные информационные ресурсы, имеющие государственное, межотраслевое значение. Кроме традиционно сложившихся направлений использования карты необходимы для решения задач политического и экономического развития страны: определения положения на местности государственных границ, принятия управленческих решений на всех уровнях государственной власти, учета и контроля природных ресурсов, экологического потенциала территории, экологической безопасности России.

Топографический мониторинг

Мы знаем: время растяжимо. Оно зависит от того, Какого рода содержимым вы наполняете его.

С.Я.Маршак

Сегодня на всю территорию страны существуют топографические карты разных масштабов. Однако топографам и картографам не приходится отдыхать. Земля живет, дышит, изменяется, и карты необходимо постоянно обновлять.

Обновление топографических карт — приведение их в соответствие с современными требованиями и состоянием местности — актуальная и емкая проблема сегодняшнего дня, которая стала называться топографическим мониторингом. Этот термин появился сравнительно недавно, и его использование имеет свои основания. Мониторинг — слежение за состоянием окружающей среды и ее изменениями. Это многоцелевая информационная система, основу которой составляют аэро- и космические съемки земной поверхности и обработка полученных снимков, а также организация наземных наблюдений на базе имеющейся картографической информации. Виды мониторинга разнообразны по пространственному и временному охвату, методам, целям и объектам слежения, которыми могут выступать многочисленные компоненты разных сфер географической оболочки. Но любой мониторинг начинается с видимой части земной поверхности, доступной непосредственному наблюдению (в том чис-

ле из космоса), т.е. с внешнего облика местности. Именно отображением этих объектов определяется тип топографической карты, которую мы относим к исходной базовой информации мониторинга любого характера.

Топографические карты — источник разносторонней пространственно-временной информации, включающей в себя данные дистанционных исследований, статистические показатели, множество сведений о природных и социально-экономических объектах. Благодаря высокой точности плановой и высотной основы карт изучаемые по ним объекты могут быть оценены по множеству показателей: местоположению (координаты), размерам (протяженность, площади, объемы, высоты, глубины), ориентировке (экспозиция, углы наклона), форме (общие очертания, вытянутость, извилистость, кривизна), плотности (густота, концентрация), расчлененности поверхности (общая, вертикальная, горизонтальная) и др. Эти метрические характеристики тесно связаны с генетическими и динамическими особенностями и процессами, определяющими характер развития географических систем. Природно-территориальные комплексы отображаются на топографических картах в разных масштабах, и в зависимости от территориального охвата, детальности и назначения исследований их можно проводить на разных уровнях, соответствующих тем или иным масштабам карт (или их группам).

В связи с этим в разработках теоретических, методических и организационных основ разных видов мониторинга (геологического, географического, биологического, биосферного, экосистемного, социального и др.) так же, как и в его реализации, практически всегда присутствует топографический аспект. Это усиливает необходимость обновления топографических карт.

Государственный топографический мониторинг — система постоянного, регламентируемого в государственном масштабе, слежения за изменениями объектов местности и непрерывной их регистрации на карте. Организация мониторинга необходима для всего масштабного ряда топографических карт, но особенно актуальна для основных государственных карт нашей страны (1:25 000, 1:100 000).

По своей сути обновление топографических карт — сложный и емкий процесс, включающий множество научных, методических и технологических сегментов — географический, космический, картографический, геоинформационный (имеющий своим назначением автоматизацию процессов на основе компьютерных технологий). Все вместе они представляют систему, обеспечивающую процессы сбора и обработки исходной информации, ее документирование, контроль и создание выходной продукции на основе единых научных принципов и высокотехнологичных методов.

Фундамент русской картографии

Картография должна начинаться в поле.

Ф.Н.Красовский

У создателей карт — топографов, геодезистов, картографов — есть такой термин: «полевые работы». Этим термином именуется съемка, проводимая в топографических и геодезических партиях, отрядах, экспедициях. Для создания карт применяются разные виды съемок: одни осуществляются целиком на местности наземным способом, другие — частично, в сочетании с камеральной (лабораторной) обработкой материалов на специально разработанных приборах.

Исходные данные, получаемые путем непосредственного обследования местности, а также государственная направленность издавна отличали постановку картографических работ в России.

Русская картография получила огромный первичный фактический материал полевых съемок и ряд замечательных законченных произведений. Это первые государственные «сенатские» съемки, начатые по указу Петра I (1720—1744); съемки, проводимые в связи с генеральным межеванием земель (1765—1822); съемки Корпуса военных топографов (1822—1917); съемки, выполненные Межевым корпусом (1845—1866) под руководством генерала А.И.Менде, а также съемочные и геодезические работы советского и настоящего времени.

Топографическое картографирование прошло большой и сложный путь развития, на протяжении которого менялись изученность страны, техническое оснащение, методы и приемы создания (обновления) карт, их точность и содержание. Фундаментом картографии в России стали крупномасштабные топографические карты, созданные в разное время огромным трудом астрономов, геодезистов, топографов и картографов на основе точных инструментальных съемок с подробным выразительным изображением рельефа.

Возможно, кто-то скажет, что карту можно сделать не выходя из дома. Действительно, сегодня создатели карт располагают материалами съемок с самолетов, космических съемок, спутниковых наблюдений и высокими компьютерными технологиями их обработки, включая рисовку рельефа

и окончательное составление карт. Однако от аэрофотоснимков и космических изображений до карты лежит еще большой путь, базовая часть которого проходит через полевые работы.

Большие трудоемкие полевые работы выполняют геодезисты. Они создают опорные сети геодезических пунктов. Следом за геодезистами топографы определяют координаты пунктов плановой и высотной основы карты на всю снимаемую площадь и «привязывают» к ним аэро- или космические снимки. Затем, сравнивая аэроснимки непосредственно с местностью, распознают (дешифрируют) объекты, составляющие содержание карт, и определяют их характеристики: ширину, глубину, скорость течения рек, высоту обрывов, породы деревьев, их высоту, диаметр стволов и многое другое. Чтобы карта не оставалась немой, выясняют или уточняют на местности географические названия. Очень важно в процессе полевых исследований подметить характерные особенности картографируемого региона: от этого зависят качество создаваемой карты, ее ориентирные свойства и ценность для последующего многоцелевого использования. Дешифрованные в поле снимки или полностью составленные образцы карт впоследствии служат эталонами, базой всех камеральных работ вплоть до издания тиража.

Жизнь создателей топографических карт сопряжена с трудностями и лишениями походной жизни. Топографы и геодезисты всегда считались первопроходцами, а их труд — подвигом. Они подготовили карты для людей многих профессий, решающих свои задачи на неосвоенных человеком территориях. И это про них сказано:

*Не циркулем по карте миллионной,
Шагами собственными вымеришь точней,
Землепроходцев внук неугомонный,
Все расстоянья Родины своей.*

В.П.Максаковский

Впечатления полевых будней надолго сохраняются в памяти людей трудной, но романтической профессии. «Карта... Как просто на нее смотреть и как непросто, порой мучительно, создавать ее» (Г.А.Федосеев).■

Литература

1. Салищев К.А. Картоведение. М., 1976.
2. Верещак Т.В. Топографические карты: научные основы содержания. М., 2002.
3. Государственная картографо-геодезическая служба. М., 2004.

Когда жизнь и не думала умирать

А.П.Расницын

Голод, болезни, мор, войны, цунами, ураганы и т.д. — жизнь людей во все времена висела на волоске. Неудивительно, что начиная с легенды о Всемирном потопе человеческую мысль притягивали идеи мировых катастроф и вымираний. Когда же эволюция жизни на Земле стала очевидностью, изучение прошлых катастроф стало respectable, а затем и модным занятием, вылившимся в бесчисленное множество публикаций и теорий, связывающих разнообразные бедствия и кризисы с другими фактами и закономерностями эволюции. Последние десятилетия особенно популярными стали гипотезы закономерности и регулярности массовых вымираний, в том числе и космически обусловленных («астероидная зима» и подобные апокалипсические картины).

Наиболее известный и активно обсуждаемый даже в непрофессиональной среде пример массового вымирания — это, конечно, история с динозаврами в конце мелового периода. Однако самыми обоснованными, подкрепленными научными фактами и наблюдениями (парадигмальными) ученые считают события, произошедшие на границе перми и триаса, или палеозоя и мезозоя. Их издавна связывают с крупнейшим массовым вымиранием различных таксонов в море и на суше, после которого ощущалось сильное обеднение био-



Александр Павлович Расницын, доктор биологических наук, заведующий лабораторией артропод Палеонтологического института им. А.А.Борисяка РАН, научный сотрудник Музея естествознания (Лондон). Заслуженный деятель науки РФ (2001), кавалер ордена Дружбы (2012). Область научных интересов — палеонтология, филогения и систематика насекомых, а также эволюционная теория, принципы филогенетики, таксономии и зоологической номенклатуры.

ты в течение всего раннего триаса. «Когда жизнь почти умерла» — так озаглавил книгу об этом времени британский палеонтолог М.Дж.Бентон [1].

Общепринятое мнение о пермтриасовом рубеже отражено в соответствующей главе «Википедии»: «Массовое пермское вымирание (неформально именуемое как англ. *The Great Dying* — великое вымирание, или как англ. *The Greatest Mass Extinction of All Time* — величайшее массовое вымирание всех времен) — одно из пяти массовых вымираний, сформировало рубеж, разделяющий такие геологические периоды, как пермский и триасовый, и отделяет палеозой от мезозоя, примерно 248 млн лет назад. Является одной из крупнейших катастроф биосферы в истории Земли, привело к вымиранию 96% всех морских видов и 70% наземных видов позво-

ночных. Катастрофа стала единственным известным массовым вымиранием насекомых, в результате которого вымерло около 57% родов и 83% видов всего класса насекомых. Ввиду утраты такого количества и разнообразия биологических видов восстановление биосферы заняло намного более длительный период времени по сравнению с другими катастрофами, приводящими к вымираниям. <...> В настоящее время у специалистов отсутствует общепринятое мнение о причинах вымирания. Рассматривается ряд возможных причин: катастрофические события (усиление вулканической деятельности в Сибири — наиболее вероятное предположение; падение одного или многих метеоритов либо столкновение Земли с астероидом диаметром в несколько десятков километров); постепенные изменения окружающей

© Расницын А.П., 2012



Местонахождение Исады, где за последние годы нами собрана крупнейшая в мире коллекция позднепермских насекомых (около 3.5 тыс.), расположено на обрывистом левом берегу р. Сухона недалеко от Великого Устюга. Здесь обнажаются породы верхов северодвинского яруса, нижнего подразделения верхней перми.

Фото Д.С.Копылова

среды (повышение сухости климата, изменение океанических течений и/или уровня моря под влиянием изменений климата). <...> Наиболее распространена гипотеза, согласно которой причиной катастрофы явилось излияние траппов (вначале относительно небольших эмейшаньских траппов около 260 млн лет назад, затем колоссальных сибирских траппов 251 млн лет назад). С этим могли быть связаны вулканическая зима, парниковый эффект из-за выброса вулканических газов и другие климатические изменения, повлиявшие на биосферу».

Результаты наших исследований оказались во многом неожиданными и не согласующимися с доминирующими представлениями: похоже, жизнь на перм-триасовом переходе, вопреки Бентону, и не думала умирать. По крайней мере на континентах. Мы изучали насекомых, которых, как известно, в море почти нет, зато на суше и в пресных водах они встречаются практически везде, где возможна жизнь. Работы проводились на севере и востоке Русской платформы

(Архангельская, Вологодская, Костромская, Ярославская и Владимирская области), где континентальные отложения конца перми и начала триаса образуют самую полную и подробную палеонтологически охарактеризованную последовательность в мире. Важным дополнением к этим материалам служат находки в межтрапповых отложениях Сибири, образовавшихся в промежутках между именно теми вулканическими излияниями, которые, как считается, и вызвали катастрофу. Еще один контроль — сведения о насекомых, живших в тот же временной интервал, но в совсем других местах — на древнем континенте Гондвана, на территории нынешних Австралии и Южной Африки.

Процессы преобразования биоты мы анализировали, считая разными способами изменения в составе семейств насекомых в локальных палеонтологических комплексах (из конкретных местонахождений или их групп, близких по расположению и возрасту). Таких комплексов у нас было 15. Замечу, когда речь идет о континентальных отложениях,

которые образуются в условиях, гораздо более изменчивых в пространстве и во времени, чем морские осадки, стратиграфия (определение геологической и временной последовательности и их корреляции) — всегда очень сложная проблема. По сути это своего рода лоскутное одеяло, и сопоставление его лоскутков — мягко говоря, нетривиальная задача. Ведущий метод стратиграфии континентальных отложений — сравнение состава ископаемых организмов и упорядочение отложений по фауне и флоре. Семейства насекомых — сравнительно новый и мало используемый инструмент стратиграфии, однако они уже зарекомендовали себя как оптимальный объект для расчетов, поскольку достаточно многочисленны (в нашем случае их было 115) и в то же время широко распространены, чтобы можно было надеяться на получение осмысленных и устойчивых результатов. И наша попытка, предпринятая в рамках проекта, о котором идет речь, дала вполне убедительные результаты. Те, кому интересны подробности, смогут узнать их из наших публикаций, которые в скором времени выйдут из печати [2, 3]. Здесь же я обращаюсь к сложившейся в итоге картине изменений разнообразия насекомых, а также к тем следствиям и идеям, которые возникли в размышлениях над этой картиной.

Картина изменений

Из многих вариантов, подробно обсуждаемых в упомянутых публикациях, представим только те, что кажутся более надежными и информативными (рис.1). Мы выяснили, что нормированное число семейств в комплексах, приближенно отражающее их разнообразие (толстая линия на рис.1,а), сильно и хаотично колеблется вокруг некоторого постоянного уровня. Почти параллельно ему колеблется и уровень оборота фауны (тонкая линия),

показывающий интенсивность ее обновления во времени. Это означает, что суммарная доля появляющихся и исчезающих (возникающих и вымирающих) семейств сохраняется приблизительно пропорционально нормированному общему числу семейств в комплексе. Из этого следует, что вблизи пермотриасовой границы не происходило явного ускорения обновления состава насекомых.

Два других показателя, рассчитанных для нашей последовательности ископаемых комплексов (рис.1,б), позволяют детализировать картину. Отношение числа семейств древней и молодой когорты (показано толстым пунктиром) вначале снижается быстро, затем замедляется и почти достигает нуля на пограничном межтрапповом уровне, когда древних семейств практически не остается. Негативные процессы (вымирания) преобладали в конце перми (тонкий пунктир, отражающий отношение числа первых и последних находок семейств в северодвинском и особенно вятском ярусах верхней перми, уходит в правой части графика ниже единицы по оси ординат). Казалось бы, это подтверждает гипотезу позднепермского вымирания, однако ей явно противоречит резко позитивный баланс — возникновение семейств на переходном межтрапповом уровне (линия проходит выше единицы). Сомнения еще больше усилились, когда мы рассмотрели появление и исчезновение семейств порознь (рис.1,в). Оказывается, в конце перми вымирание отнюдь не усиливалось. В интервале от Нормандиена до межтрапповых отложений оно лишь колебалось вокруг некоторого устойчивого уровня. Напротив, появление новых семейств от Бельмонта к Недуброву резко падает, и лишь в межтрапповых комплексах вновь подскакивает много выше уровня вымираний. Фактически, если не учитывать относительно бедный и малопоказательный ком-



Обнажение пород недубровской пачки (вохминский горизонт, переходный пермотриасовый интервал) на левом берегу р.Кичменга у д.Недуброво Вологодской области, откуда собрана небольшая, но очень важная коллекция насекомых. Предположительно эти отложения соответствуют времени излияния сибирских траппов, т.е. пику пермотриасового события.

Фото Е.В.Карасева

плекс Соколовой, график описывает почти непрерывное сильное падение темпов возникновения новых таксонов (диверсификации) начиная с Исад, т.е. с конца предыдущего северодвинского века поздней перми.

Итак, в конце перми не было массового вымирания семейств насекомых, а было, наоборот, подавление их диверсификации. Кроме того, восстановление позитивной динамики разнообразия насекомых произош-



Самое позднее пермское местонахождение Вязники (верхи вятского яруса, обнажение у д. Балымотиха, Владимирская обл.).

Фото автора

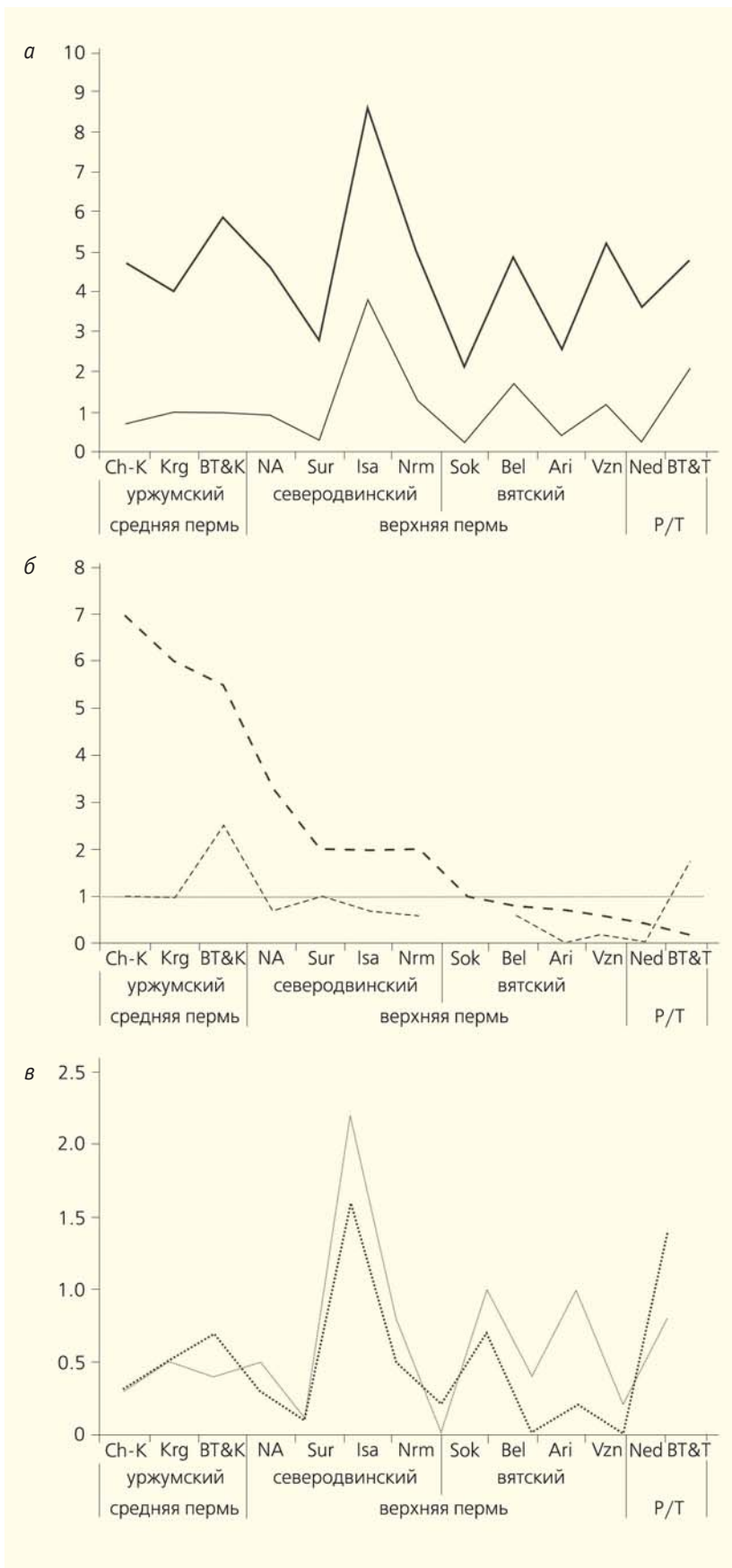


Рис.1. Динамика семейств насекомых, сокращенная последовательность комплексов (Бор-Тологой объединен с Караунгиром, Бабий Камень — с Тунгусской), выстроенная по индексу облика фауны (Pz/pPz); а: толстая линия — нормированное число семейств, тонкая линия — оборот фауны; б: — толстая штриховая линия — индекс облика фауны (Pz/pPz), тонкая штриховая линия — индекс обновления фауны (отношение числа первых и последних находок); в: толстый пунктир — нормированное число первых находок семейств (условно — число возникших семейств), тонкий пунктир — нормированное число последних находок семейств (условно — число вымерших семейств). Комплексы: Ch-K — Чепаниха + Костоваты (Удмуртия), Krg — Каргала (Оренбургская обл.), BT&K — объединенный комплекс Бор-Тологая и Караунгира, NA — Ново-Александровка (Оренбургская обл.), Sur — Суриеково (Кемеровская обл.), Isa — Исады (Вологодская обл.), Nrm — Нормандиен (Южная Африка), Sok — Соколова II (Кемеровская обл.), Bel — Бельмонт (Австралия), Ari — Аристово (Вологодская обл.), Vzn — Вязники (Балымотиха и Соковка, Владимирская обл.), Ned — Недуброво, BK&T — объединенный комплекс Бабьего Камня и Тунгуски. Pz — древняя когорта семейств (число семейств, возникших до начала изученного интервала — до уржумского века средней перми, и не переживших его конца, т.е. вымерших не позднее раннего триаса). Соответственно, pPz — молодая когорта, т.е. число семейств, возникших на изученном интервале (не раньше уржума) и переживших его конец (доживших как минимум до реднего триаса). Нормирование числа семейств того или иного типа производилось путем деления числа семейств на натуральный логарифм числа ископаемых насекомых, собранных в соответствующих местонахождениях. Объединение некоторых комплексов, близкий возраст которых достаточно хорошо обоснован, вызвано объемом расчетов, превышающим ресурс доступного оборудования, который оказался необходимым для обсчета полного набора комплексов по некоторым из использованных параметров [2, 21].

ло не в среднем триасе, как это принято считать, а на, казалось бы, самом драматическом рубеже — точно во время катастрофического излияния сибирских траппов.

Проанализировать динамику разнообразия семейств насекомых на рубеже перми и триаса можно еще одним способом — сравнением числа семейств, зафиксированных на разных этапах изученного интервала. В его начале, в уржумском веке средней перми, обнаружено 59 семейств, в следующем северодвинском веке поздней перми — 87, в ее последнем, вятском, веке — 47, а на переходном пермотриасовом этапе (Недуброво и межтрапповые комплексы) плюс то немногое, что мы знаем из несомненного раннего триаса, — всего 40 семейств. Обедненность вятской и раннетриасовой фаун налицо: там найдено вдвое меньше семейств, чем в предшествующее северодвинское время (соответственно, 54 и 46%). Однако у этой обедненности, помимо напрашивающегося объяснения — позднпермского вымирания, есть еще одно. Существует довольно много так называемых проходящих семейств — найденных до и после того или иного интервала, но не на нем самом. Они, несомненно, существовали все это время, но не везде их ископаемые остатки удалось найти. Если мы учтем эти семейства, картина заметно изменится: в уржумское время общее число семейств будет 80, в северодвинское — 96, в вятское — 67, в переходное и в раннем триасе — 64. Теперь две последние цифры отличаются от предыдущей всего на треть. Если же мы нормируем все эти числа по объему изученного материала [2, 3], то картина изменится еще сильнее. Нормированные числа равны соответственно 10.4, 11.3, 8.3 и 9.4, что для вятского и раннетриасового этапов будет составлять соответственно около трех четвертей (73%) и четырех пятых (83%) северодвинского разнообразия.

Противоречия

Мы убедились, что у насекомых не было массового вымирания на рубеже перми и триаса. Этот вывод не нов [4, 5], но он, напоминая еще раз, противоречит мнению многих ученых, в том числе квалифицированных. Важно понять масштаб этого противоречия (касается ли это только пермотриасового кризиса, или же это общая картина) и его причины. Может быть, это насекомые ведут себя совсем не так, как другие организмы, или же дело в несовершенстве методов анализа и рассуждений, лежащих в основе гипотезы массовых вымираний. Или и то и другое вносит свой вклад в противоречие.

Различия динамики разнообразия у насекомых и у других, более традиционных объектов такого анализа, прежде всего морских организмов, действительно существуют (рис.2). Это ожидаемый высокий уровень динамики изменений, без которого насекомые не могли бы набрать того колоссального разнообразия, которого они достигли. Однако в нашем контексте это обстоятельство не слишком значимо. Другое бросающееся в глаза отличие — резкий скачок разнообразия в эоцене — тем более не должно учитывать-

ся. Этот скачок обусловлен ростом не исходного разнообразия, а изученности ископаемых насекомых, поскольку поздним эоценом датирована хорошо изученная и потому огромная фауна балтийского янтаря. Если бы ее не было, предшествующая часть кривой шла бы круче, т.е. сближалась бы с кривой для морских животных постепенно, а не скачком.

По существу остаются только два отличия. Во-первых, «кривая насекомых» более хаотична, что с очевидностью объясняется их недостаточной изученностью по сравнению с другими, традиционными объектами палеонтологии. Во-вторых, все минимумы на месте предполагаемых массовых вымираний морских организмов — у границ перми и триаса, триаса и юры, мела и палеогена — здесь тоже присутствуют, но гораздо слабее выражены. Это различие уже прямо относится к нашей теме, но и оно вполне объяснимо. Дело в том, что морская среда при всем ее разнообразии несравненно более стабильна, чем условия на суше и в континентальных водоемах, и гораздо менее расчленена, чем разделенные мириадами разного рода барьеров континентальные биоты и биотопы. Если мы гово-

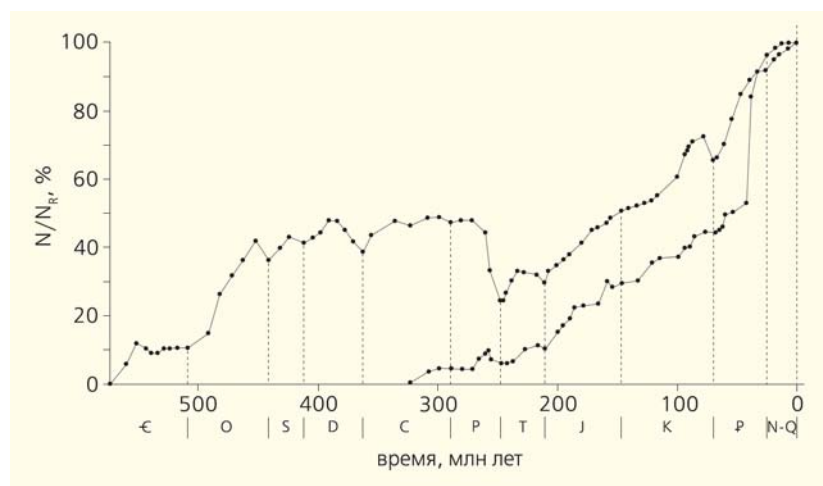


Рис.2. Разнообразие семейств морских организмов (верхняя кривая [4]) и насекомых (нижняя кривая [5]). Точки показывают число семейств на границах веков (ярусов) геологической шкалы в процентах от общего числа семейств соответствующей группы, известных в ископаемом состоянии (N/N_0).

рим не о видах, а об относительно широко распространенных старших таксонах, таких как семейства, то при неблагоприятных изменениях обитатели континентов гораздо чаще, чем морские, смогут найти малоизмененные убежища и избежать вымирания. Контраст между видимым резким обеднением известных нам фаун насекомых вблизи границы перми и триаса и очень скромным числом семейств, действительно вымерших в то время, хорошо иллюстрирует нашу схему. В целом же можно сделать вывод: по динамике биоразнообразия насекомых сходны с другими организмами, но по сравнению с обитателями морей менее склонны к массовым вымираниям. Изменения, коснувшиеся всей биоты суши и континентальных водоемов и отдельно насекомых, сходны [4]. Поскольку биота континентов составляет (и составляла, по крайней мере, с перми) подавляющую часть биоты Земли, именно поведение насекомых следует считать характерным для биосферы в целом.

Фазы кризиса

Теперь вернемся к вопросу, насколько особенности динамики разнообразия насекомых в окрестностях пермотриасового события свойственны другим аналогичным событиям. Единственный случай такого рода, доступный сейчас для сравнения, — меловой биоценотический кризис, которому были посвящены наши более ранние исследования [6—11]. В них охвачен значительно более широкий интервал (конец юры и весь мел), но выполнены более простыми методами и на широком, но менее детально проработанном материале, не позволяющем делать очень детальное сопоставление. Тем не менее тогда удалось выявить характерную этапность процесса. Он был интерпретирован как биоцено-

тический кризис, и были выделены четыре его фазы — подготовительная, парадоксальная, драматическая и успокоительная [9]. Подготовительной фазе свойственно быстрое снижение доли вымерших семейств (в нашем случае им соответствует когорта древних семейств). В парадоксальной замедляется появление новых семейств и временно увеличивается доля вымерших (архаизация фауны). Драматическую фазу отличает ускоренное обновление фауны, успокоительную — снижение темпа обновления фауны до фонового уровня, прежде всего за счет торможения вымирания. Особо отмечено, что в успокоительной фазе «вымирание быстро прекращается, а появление продолжается, временами даже усиливаясь. Очевидно, в результате кризиса возникли сообщества гораздо более емкие, чем прежде» [9].

Нынешние результаты показывают определенное, хотя и неполное сходство с выводами по меловому кризису. Подготовительной фазе кризиса в нашем случае, по-видимому, соответствует уржумское время, когда происходило резкое снижение доли древних семейств, но баланс смен оставался позитивным или нейтральным (см. рис.1). В северодвинское и вятское время доля древних семейств продолжала быстро снижаться, но не столько за счет появления молодых, сколько из-за продолжающегося вымирания древних, потому что новообразование было подавлено и баланс смен удерживался негативным — фауна обеднялась. Этот этап, вероятно, соответствует сильно растянутой парадоксальной фазе кризиса. Правда, архаизация фауны, описанная для мелового кризиса на этой фазе, здесь в явном виде (как временное увеличение доли древних семейств) не выражена.

Начало драматической фазы могут представлять переходные пермотриасовые комплексы, особенно межтрапповые, для

которых характерны резкое доминирование позитивных процессов над негативными и, возможно, общая активизация обновления фауны. Проверка этой гипотезы — дело дальнейших исследований. Драматическая фаза кризиса на нашем материале представлена в лучшем случае самым ее началом, а успокоительная не выражена вовсе, и о ней можно сказать немного. Ясно только, что почти полного прекращения вымирания семейств насекомых, как в палеогене и неогене, в мезозое не происходит. Однако неудержимый рост разнообразия насекомых, описанный для поздней и послемеловой ситуации, не менее ясно выражен и после пермского кризиса. В палеозое разнообразие семейств насекомых, по версии В.Ю.Дмитриева, росло медленно (нижняя кривая на рис.2) и завершилось небольшим снижением во второй половине перми и в начале триаса, а со среднего триаса и донныне происходит стабильный быстрый рост с едва заметным снижением его темпов с конца юры до конца мела.

Таким образом, события в окрестностях границы перми и триаса, отраженные в составе последовательных комплексов семейств насекомых, носили довольно сложный характер, в определенной степени сходный с многофазным меловым биоценотическим кризисом. По аналогии можно говорить и о пермотриасовом биоценотическом кризисе. Однако здесь кризис в еще большей степени, чем в мелу, проявлялся не в негативных процессах (массовом вымирании), а в преобразовании самой структуры сообществ. Возникшая после преобразования новая ценоценотическая структура оказалась настолько емкой, что дала возможность быстрому и практически непрерывному росту таксономического разнообразия насекомых в течение всего мезокайнозоя, лишь с некоторым замедлением в мелу. Поскольку картина таксономи-

Отпечатки фрагментов насекомых древнейших семейств:

а — *Protereismatidae*, характерного представителя древней когорты, существовавшего в течение почти всего пермского периода. Последние его находки, в том числе изображенный здесь фрагмент крыла, сделаны в верхнесеверодвинских отложениях в Исадах.

б — *Caloneuridae* из вымершего отряда *Caloneurida*, возникших до начала изученного интервала и не переживших его конца. Этот отряд был, вероятно, ранним ответвлением ствола, давшего начало и насекомым с полным превращением (жуки, бабочки, осы и многие другие), и хоботным и их родичам (цикадки, клопы, тли, а также трипсы, сеноеды, вши и им подобные). На фото *Eohymen maculipennis* из отложений уржумского яруса в Каргале Оренбургской обл.

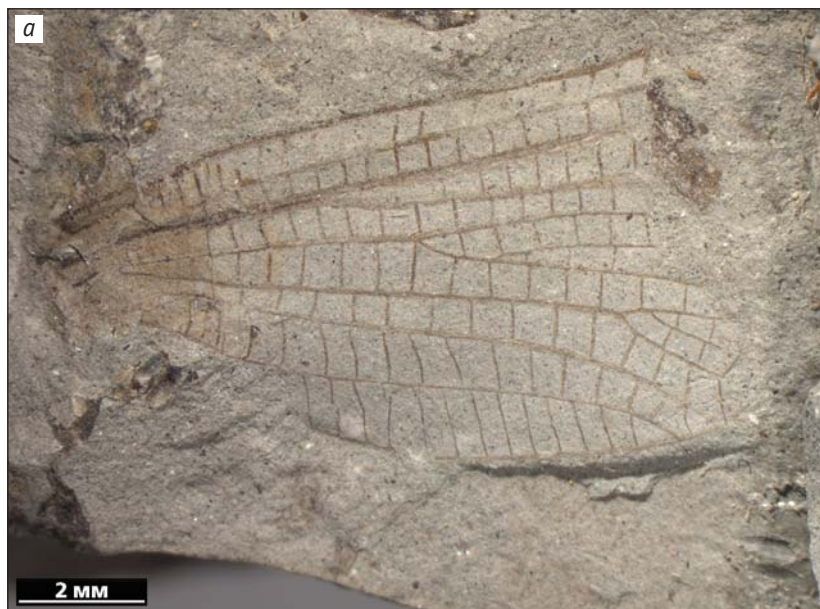
в — *Mogavohymenidae* из другого вымершего отряда *Mischoptera* или *Megascoptera* (новый, еще не описанный из местонахождения Исады в Вологодской обл.). Мисхоптеридовые близки более известному, тоже вымершему отряду палеодиктиоптер.

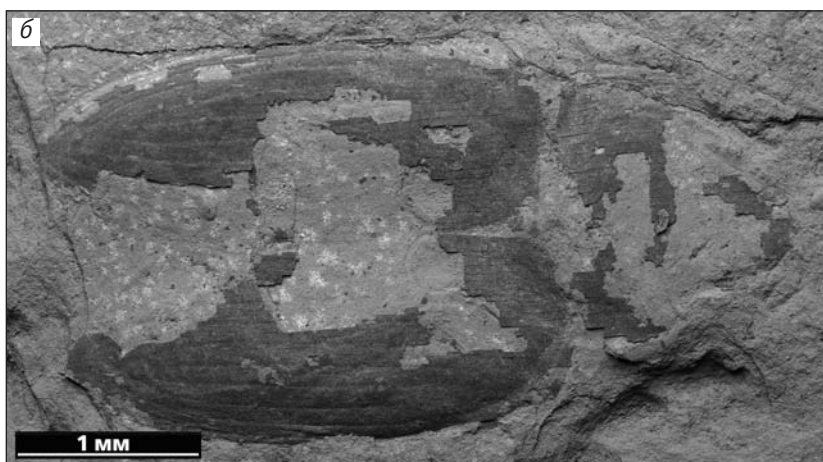
г — *Soyanopteridae* из вымершего в основном каменноугольного отряда *Eoblattida*, предкового для прямокрылообразных насекомых в широком смысле (инфраотряд *Gryllones*, иначе *Polyneoptera*). На фото *Poldarsia relicitaria* из Исад.

Фото Н.Д.Синиченковой (*а*), А.П.Расницына (*б*) и Д.С.Аристовой (*в, г*)

ческой динамики насекомых на уровне семейства, как уже отмечалось, сходна с той, что рисуют для морских организмов (см. рис.2), можно предположить, что реорганизация сообществ не касается одних только насекомых, а была общим важным (важнейшим?) аспектом и результатом многих, если не всех кризисов в развитии биосферы.

Из всего этого следует, что биотическое событие конца перми следует считать ключевым к дальнейшему развитию биосферы Земли, даже если оно и не сопровождалось массовым вымиранием (по крайней мере в случае насекомых). Однако





Отпечатки фрагментов насекомых семейств молодой когорты, которые возникли на изученном интервале и пережили его (по крайней мере до среднего триаса): *a* — веснянка семейства Eustheniidae (отряд Perlida) из позднесеверодвинского местонахождения Исады. До сих пор эвстенииды были известны только из современной фауны и из верхнепермских отложений Австралии. Ничего удивительного: очень многие насекомые, сейчас характерные для южных материков — наследников древнего суперконтинента Гондвана (Африка, Австралия, Антарктида, Южная Америка, а также п-ов Индостан), в прошлом были распространены более или менее всесветно.

б — жук семейства Trachyrachidae, близкого к обычным жужелицам. Трахипахиды впервые появляются в межтрапповых отложениях Сибири и доживают донныне как малочисленные и мало разнообразные реликты.

в — ручейник вымершего семейства Cladochoristidae (отряд Phryganeida, или Trichoptera), известного начиная с конца северодвинского века средней перми (Исады, Нормандиен) и до позднего триаса (в Киргизии и Австралии). Изображенное крыло найдено в Исадах.

Фото Н.Д.Синиченковой (*a*), Р.А.Ракитова (*б*), Д.С.Аристова (*в*)

при всей его важности мы не можем сказать, в чем конкретно оно состояло и чем было вызвано или хотя бы спровоцировано. Для мелового события была предложена гипотеза биоэкологического кризиса, вызванного широким распространением покрытосеменных растений, перехвативших ранние стадии мезозойских сукцессий и тем опрокинувших всю систему мезозойских биоценозов [6, 7, 12]. Однако эта гипотеза, получившая достаточно широкую известность [13], столкнулась с определенными трудностями. «Ангиоспермизация мира» [14, 15] реально началась в середине мелового периода (в альбском веке), а меловое событие («меловой биоэкологический кризис») — в конце юры [8, 9]. Не помогает даже, если к объяснению привлечь, следуя логике К.Ю.Еськова [13], проангиоспермов («предпокрытосеменных» — голосеменных, сходных с покрытосеменными по некоторым, часто по многим признакам [14]). Их развитие идет весьма постепенно, и некоторые функции покрытосеменных (например, энтомофилия) появляются у голосеменных по крайней мере в ранней перми [16]. С другой стороны, основное событие в море произошло в самом конце мела, 40 млн лет после начала активной ангиоспермизации мира, и объяснять его как афтершок ангиоспермизации — все-таки некоторая натяжка.

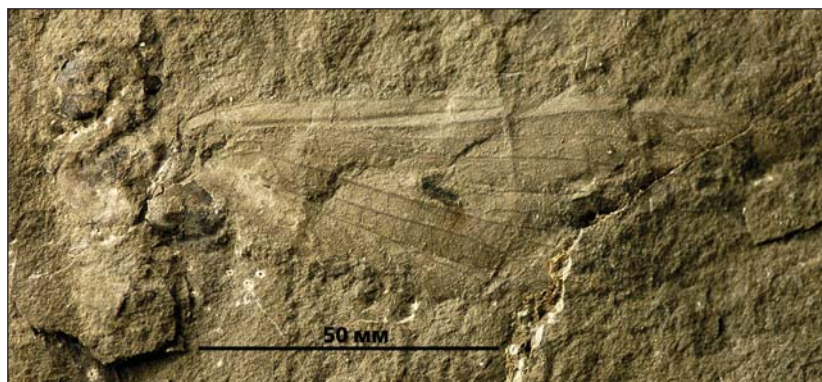
Самая главная проблема состоит даже не в этом. И не в том, что для позднепермского события пока не находится сколько-нибудь убедительного аналогичного объяснения. На мой взгляд, главная проблема в том, что оба разбираемых события происходили на этапе подавленной диверсификации накануне вспышки возникновения новых семейств, причем этот этап охватывает около 10 млн лет — чуть ли не всю позднюю пермь. Привычные палеонтологические и эволюционные факторы никак не объясняют этот

феномен, поскольку это даже не стазис, а избирательное торможение только возникновения новых семейств, тогда как вымирание продолжается в прежнем темпе. Без объяснения, хотя бы самого предварительного, этого парадокса трудно сконструировать гипотезу о причинах позднепермского и мелового событий.

В действительности такое объяснение, как оказалось, уже предложено, причем довольно давно. Удивительно, но предложил его я уже после обнаружения парадокса, однако вне всякой связи с парадоксальной фазой кризиса. Эту связь я усмотрел, увы, только сейчас. Но сначала придется отвлечься, поскольку речь пойдет об эпигенетической теории эволюции и в частности о гипотезе адаптивного компромисса. К сожалению, здесь невозможно дать обоснование этой далеко не общепринятой гипотезе [17, 18], можно лишь попытаться ее очень кратко очертить.

Реалистичная гипотеза

Эпигенетическая теория (на самом деле, конечно, гипотеза, но такова привычная терминология) признает важнейшим онтогенетический, а не молекулярный уровень организации живого. Ее основу составляют морфогенетические механизмы, формирующие пути развития (креоды), а молекулярные механизмы выполняют важную функцию переключателей и модераторов, сопрягающих креоды в целостную систему, регулирующие и тонко настраивающие их деятельность. Эволюционно важный аспект эпигенетики составляет концепция адаптивного компромисса. Из-за упомянутых тесных связей между структурами организма при их становлении и функционировании организация живого существа оказывается напряженным компромиссом между необходимостью одновремен-



Найденный в межтрапповых отложениях Тунгусского бассейна отпечаток крыла насекомого семейства *Tunguskapteridae*, которое относится к отряду тараканосверчков (*Grylloblattida*), обильному в перми, а ныне редкому, малозаметному и, в отличие от древних форм, совершенно бескрылому. Тунгускаптериды тоже давно вымерли, но появились еще в пределах изученного нами интервала и перешагнули его верхнюю границу, дожив до позднего триаса, поэтому семейство *Tunguskapteridae* тоже отнесено к молодой когорте.

Фото автора

ной оптимизации каждой из его адаптивных функций. Перед лицом отбора живые существа предстают не мягкой глиной в руках гончара, а хрупким и капризным материалом, из-за чего вымирание популяций и видов происходит постоянно и повсеместно, а успешная эволюция оказывается непредсказуемой. Даже в изменчивой среде некоторые виды не меняются многие миллионы лет (эволюция забуферена), потому что «эпигенотип вида, его система канализаций развития и обратных связей часто столь хорошо интегрирована, что с замечательным упорством противостоит изменению» [19. С.353]. Однако это блокирование эволюции не может быть фатальным: «Сколь высоко ни поднялась бы устойчивость (забуференность) эпигенотипа даже заметной части обитателей нашей планеты, даже большие катаклизмы вряд ли будут серьезно угрожать разнообразию жизни на Земле, если, конечно, иметь в виду эволюционно значимые отрезки времени. Даже <...> когда заметная часть биоразнообразия, «закосневшая» в совершенстве и, стало быть, жесткости своих эпигенотипов, окажется существенно «прореженной»

очередным субглобальным оледенением, астероидной либо ядерной зимой или подобным апокалипсисом, выжившие виды попадут в ситуацию неполных сообществ с существенно ослабленными конкурентными отношениями. Это будет провоцировать быструю инадаптивную эволюцию, и тем более быструю, чем более обширной была «прополка» ... Правда, наш оптимизм не распространяется так далеко, чтобы обещать новые сообщества похожими на прежние. Как известно, вымирание даже в окрестностях границы перми и триаса было хотя и масштабным, но не подавляющим... Очевидно, сама структура морских сообществ радикально изменилась, дав место гораздо большему росту биоразнообразия» [20. С.20—21].

Последняя цитата, написанная 10 лет назад вне всякой связи с периодизацией этапов кризиса, похоже, предлагает гипотетический механизм его парадоксальной фазы. По-видимому, обновление биоты в подготовительную фазу кризиса (вымирание многих семейств древней когорты) существенно увеличивает в ее составе долю групп, «закосневших в совершенстве» своей организации. Дальнейшие

изменения условий, даже вполне ординарные по своему характеру, продолжают снимать свой урожай вымирания, но диверсификация, заторможенная хорошо сбалансированной структурой эпигенотипа многих групп, не восполняет эти потери. Биота беднеет, ее упаковка становится все более рыхлой и неполной, что снижает требования к приспособленности ее членов, и в частности к сбалансирован-

ности их эпигенотипа. Когда это снижение приближается к некоторому критическому значению, любое дальнейшее изменение может оказаться триггером, спусковым крючком, запускающим лавинообразную диверсификацию, и при счастливых обстоятельствах — более или менее глубокое преобразование структуры сообществ.

Конечно, мы пока ничего не знаем ни о положении упомя-

нутого рубежа, ни тем более о существе преобразований биоты, которые могли бы значительно увеличить ее емкость. Но высказанная гипотеза по крайней мере указывает направление, где можно искать и где есть шанс приблизиться к ответу на эти вопросы. Нужно работать дальше, но хорошо было бы, если бы кто-то еще из коллег присоединился к нашим поискам. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 09-04-01241.

Литература

1. *Benton M.J.* When life nearly died: the greatest mass extinction of all time. L., 2005.
2. *Расницын А.П., Аристов Д.С., Расницын Д.А.* Насекомые у рубежа перми и раннего триаса (уржумский-оленекский века) и проблема пермотриасового кризиса биоразнообразия // Журнал общей биологии. 2013. Т.74 (в печати).
3. *Aristov D.C., Bashkuev A.S., Vasilenko A.S. et al.* Fossil insects of the Middle and Upper Permian of the European Russia // *Paleontol. Journ.* 2013 (in press).
4. *Алексеев А.С., Дмитриев В.Ю., Пономаренко А.Г.* Эволюция таксономического разнообразия. М., 2001.
5. *Dmitriev V.Yu., Ponomarenko A.G.* Dynamics of insect taxonomic diversity // *History of Insects / Eds A.P.Rasnitsyn, D.L.J.Quicke.* Dordrecht, 2002. P.325—331.
6. *Родендорф Б.Б., Жерихин В.В.* Палеонтология и охрана природы // *Природа.* 1974. №5. С.82—91.
7. *Дмитриев В.Ю., Жерихин В.В.* Изменения разнообразия семейств насекомых по данным метода накопленных появлений // Меловой биоценотический кризис и эволюция насекомых. М., 1988. С.208—215.
8. *Расницын А.П.* Проблема глобального кризиса наземных биоценозов в середине мелового периода // Меловой биоценотический кризис и эволюция насекомых. М., 1988. С.191—207.
9. *Расницын А.П.* Динамика семейств насекомых и проблема мелового биоценотического кризиса // Осадочная оболочка Земли в пространстве и времени. Стратиграфия и палеонтология / Ред. Б.С.Соколов. М., 1989. С.35—40.
10. *Расницын А.П.* История палеоэнтомологии и история насекомых // *Природа.* 1990. №6. С.66—80.
11. *Бугдаева Е.В., Волынец Е.Б., Голозубов В.В. и др.* Флора и геологические события середины мелового периода (Алчанский бассейн, Приморье). Владивосток, 2006.
12. *Zberikhin V.V.* Ecological history of terrestrial insects // *History of Insects / Eds A.P.Rasnitsyn, D.L.J.Quicke.* Dordrecht, 2002. P.331—388.
13. *Еськов К.Ю.* История Земли и жизни на ней. М., 2000.
14. *Красилов В.А.* Происхождение и ранняя эволюция цветковых растений. М., 1989.
15. *Пономаренко А.Г.* Палеобиология ангиоспермизации // *Палеонтологический журнал.* 1998. №4. С.3—10.
16. *Krassilov V.A., Rasnitsyn A.P.* Plant remains from the guts of fossil insects: evolutionary and paleoecological inferences // *Proceedings of the First Palaeoentomological Conference.* Moscow, 1998. Bratislava, 1999. P.65—72.
17. *Расницын А.П.* Темпы эволюции и эволюционная теория (гипотеза адаптивного компромисса) // Эволюция и биоценотические кризисы / Ред. Л.П.Татаринов, А.П.Расницын. М., 1987. С.46—64.
18. *Шшишкин М.А.* Индивидуальное развитие и эволюционная теория // Эволюция и биоценотические кризисы. М., 1987. С.76—124.
19. *Майр Э.* Популяции, виды и эволюция. М., 1974.
20. *Расницын А.П.* Процесс эволюции и методология систематики // *Труды Русского энтомологического общества.* СПб., 2002. Т.73.
21. *Rasnitsyn A.P., Aristov D.C., Rasnitsyn D.A.* 3.1. Insects of the permian and early triassic (urzhumian-olenekian ages) and the problem of the permian-triassic biodiversity crisis // *Fossil insects of the middle and upper permian of the european Russia // Paleontol. Journ.* 2013 (in press).

Геологические аспекты строительства дольменов Кавказа

Ю.Н.Шариков, К.Э.Якобсон, О.Н.Комиссар

На Северо-Западном Кавказе, от Таманского полуострова до Абхазии, известны мегалитические культовые сооружения, которые местные жители адыгейцы называли «испун», что в переводе означает «дома карликов». В настоящее время эти мегалиты принято называть дольменами. Хронологические рамки дольменной культуры Кавказа охватывают период от середины III до конца 2-го тысячелетия до н.э. Эти таинственные сооружения дали название одной из культур бронзового века — дольменной.

Кавказский дольмен представляет собой камеру, сложенную из нескольких идеально сопряженных между собой каменных блоков, которые перекрыты покровной плитой. В конструкции дольмена обязательно присутствует портал, образованный выступающими блоками боковых стен и нависающей плитой-крышей. Иногда портал достраивался отдельными плитами. Чаще всего в нижней трети портала, примерно по центру, располагается лаз диаметром 38 ± 5 см. Каменные блоки, из которых сооружены дольмены, могут весить до нескольких тонн.

Дольмены строились из плит, отдельных блоков, вытачивались в глыбах или даже целиком в скалах. Поразительно разнообразие их конструкций.

© Шариков Ю.Н., Якобсон К.Э., Комиссар О.Н., 2012



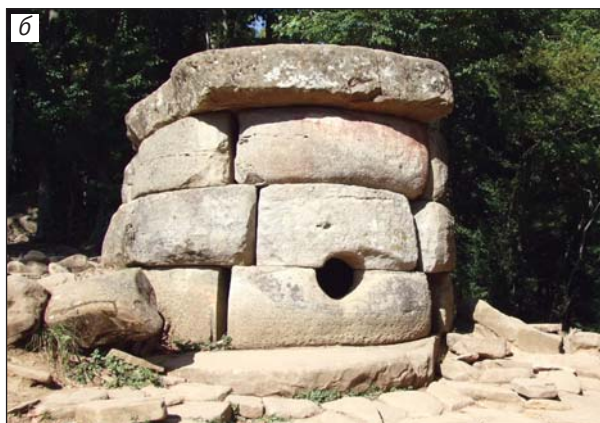
Юрий Николаевич Шариков, кандидат медицинских наук, доцент Сочинского государственного университета. Область научных интересов — физиология, археология, геология, краеведение. Автор шести монографий, в числе которых «Древние технологии дольменов Кавказа» и «Дольмены Кавказа. Геологические аспекты и технологии строительства» (обе в соавторстве с О.Н.Комиссаром).



Ким Эдуардович Якобсон, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского геологического института, Санкт-Петербург. Область научных интересов — геология и полезные ископаемые Европейской части России и ближнего зарубежья, историческая геология, тектоника, вулканизм докембрия. Постоянный автор журнала «Природа».



Олег Николаевич Комиссар, кандидат технических наук, генеральный директор Государственного научного центра ОАО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», член Международной ассоциации SAMPE, член-корреспондент Российской инженерной академии. Автор более 120 научных трудов в области аэрокосмической техники, истории и краеведения.



Основные типы дольменов: *а* — плиточный, «Восьмидольмень», поселок Пшада (Геленджикский р-н Краснодарского края); *б* — составной, река Жане, пос.Возрождение (Геленджикский р-н); *в* — полумонолитный, окраина пос.Пшада; *г* — монолитный, река Годлик, пос.Волконка (Лазаревский р-н).

В 1960 г. Л.И.Лавров предложил классификацию, согласно которой он выделил четыре основных типа дольменов: плиточный, составной, полумонолитный и монолитный [1].

Плиточный дольмен строился из шести плит. Одна — фундамент (или пяточный камень), две боковые, порталная, задняя плиты и плита перекрытия. По данным В.И.Марковина, 92% всех дольменов именно плиточные [2]. Составной дольмен создан из нескольких крупных блоков, и образованная ими камера перекрыта покровной плитой. Полумонолитные, или, как их еще называют, корытообразные дольмены выбиты целиком в скальной глыбе и также перекрыты покровной плитой. Монолитный дольмен полностью высекался в скале через отверстие.

Мегалитические сооружения встречаются и в других частях света, но особенностью дольменов Западного Кавказа стала сверхточная подгонка многотонных каменных плит. В хорошо сохранившихся дольменах в зазор между каменными блоками невозможно вставить даже лист бумаги, хотя линия сопряжения блоков криволинейна.

В 1971 г. Марковин производил раскопки Дегуакско-Даховского поселения, в котором, по его предположению, жили строители дольменов [2]. Люди эти были очень слабо оснащены технически. Они не знали железа, гончарного круга, взрыхляли землю мотыгами, не ведая о плуге, уже изобретенном в то время на Востоке. Строители дольменов обитали, как свидетельствуют материалы раскопок, в жалких глинобит-

ных лачугах. При раскопках не было найдено ни инструментов, ни технических приспособлений, с помощью которых возводились дольмены. И тем не менее они создали эти сооружения, поражающие и нас, современных людей.

Проблемы сооружения дольменов

Существует масса гипотез, объясняющих происхождение дольменов. Все они сводятся к тому, что дольмены представляют собой мегалитические постройки, сложенные из каменных плит и блоков или высеченные в скальном массиве. Но такое представление не объясняет следующих важных проблем сооружения дольменов во времена ранней бронзы:

— как и где строители добывали огромные песчаные блоки необходимого размера?

— как транспортировали многотонные блоки к месту возведения дольмена при отсутствии дорог в горной местности?

— как и какими инструментами обрабатывали камень?

— как добывались точного сопряжения многотонных блоков по криволинейным стыкам?

— как наносили рельефные знаки на поверхности блоков?

— как возникла и почему спустя почти полторы тысячи лет исчезла эта грандиозная культура, оставившая нам в наследие тысячи дольменов на огромной территории Северо-Западного Кавказа?

Остановимся на каждом из этих вопросов подробнее.

Каменоломни. В литературе у многих авторов встречаются упоминания о древних каменоломнях, в которых вырубались строительные элементы будущих дольменов. Вот как, по предположению Марковина, производилась колка камня [2]: «В подготовленные ямки загоняли клинья из дерева, мочили их водой, древесина набухала, и в камне появлялись трещины».

Технологическая справка. Чтобы расколоть камень в заданном направлении, нужно просверлить шпур (отверстия) под деревянные клинья в камне не менее чем на 75% его толщины и на расстоянии 20—30 см друг от друга по линии раскола. На сколе камня должны были бы остаться следы шпуров, в которые вбивались клинья, но их нет ни на одном дольменном блоке.

Мы обследовали несколько мест, указанных как «древние каменоломни». На самом же деле это естественные выходы песчаника, зачастую весьма причудливых форм. Ни в одном из таких мест следов разработки камня найдено не было. Хотя обнаружилось, что в непосредственной близости от дольменов или их скопления обязательно находятся выходы глыбового песчаника.

Транспортировка. Перед создателями дольменов стояла сложная и далеко не тривиальная транспортная проблема. Как доставить многотонные каменные блоки к месту строительства в горных условиях при полном отсутствии дорог? Марковин предполагает, что это было так [2]: «Но вот плиты в необработанном виде вырублены. Их надо доставить на место. И с помощью катков (равной формы бревен), веревок, человеческой и бычьей силы тащили материал к облюбованному уголку, где будет воздвигнут дольмен. Способ очень древний». Но простота описанного способа лишь кажущаяся. Во-первых, все-таки нужна дорога. Дорога как инженерное сооружение, создающее в горном рельефе плоскость, по которой возможно перемещение крупногабаритных, многотонных блоков без угрозы бокового соскальзывания и без чрезмерно крутого угла подъема. Поверхность дороги должна быть достаточно прочной, чтобы многотонные блоки не вдавливали катки в рыхлый грунт. В окружении многих дольменов нет никаких следов дорог, а стоят они в очень труднодоступных сегодня местах.

Обработка. Все исследователи дольменов отмечают такую особенность: каменные блоки, из которых они сложены, снаружи не обработаны и имеют вид природного, «дикого» камня. Портальная плита и внутренняя поверхность камеры, напротив, гладкие и ровные. Особенно обращает на себя внимание тщательная подгонка плит друг к другу. На внутренней поверхности камеры и портала часто можно видеть следы обработки камня в виде затесов. Вот как этот процесс описан у Марковина: «В дело шли клиновидные каменные и бронзовые орудия. Они хорошо заполированы и напоминают ножи наших рубанков. Следы их работы заметны на стенах многих корытообразных дольменов. Лезвие у них имело ширину 3—4 см. За-



Следы затесов на портальной плите дольмена в долине р.Жане.

вершали работу шлифовальные куранты: камни округлой формы с более широкой рабочей частью (основанием). Ими доводили плиты до нужной чистоты и гладки» [2].

В некоторых дольменах на внутренних поверхностях камеры и наружных поверхностях портала явственно видны следы обработки камня в виде затесов, сделанные инструментом с шириной лезвия 3—9 см. Длина затеса от 1 до 4 см. Если сравнить поверхность песчаника, сколотую скарпелем*, и поверхность со следами инструментальной обработки дольмена, то становится очевидным, что камень дольменов не кололи. Скарпель оставляет сколы. Затесы на блоках дольменов больше напоминают следы работы шпателя по незаастывшему раствору. И описанные Марковиным бронзовые инструменты, которые «напоминают ножи наших рубанков», также больше похожи на шпатели, чем на зубила. Тонкими бронзовыми инструментами колоть камень невозможно.

Сопряжение. Поверхности блоков имеют идеальное сопряжение, но часто не прямолинейное. Особенно поражает степень их сопряжения в хорошо сохранившихся дольменах. Предста-

* Скарпель (итал. *scarpello*, от лат. *scarpere* — резец) — инструмент для гладкой обработки камня в скульптуре, круглый или граненый стальной стержень, один конец которого расширяется в виде лопаточки с остро заточенным краем. По другому, тупому концу наносят удары молотком-киянкой.



Фрагмент порталной плиты дольмена с неравномерной укладкой пластичной массы. Гора Нэксис (Геленджикский р-н).

вить, что многотонные блоки постоянно поднимали и подтачивали, трудно, так как при этом блоки неизбежно смещались бы относительно друг друга, и линия сопряжения не могла бы принять столь идеальную форму.

Примером того, что механическое сопряжение блоков с такой точностью — дело сложное и, вероятно, невыполнимое без специального оборудования и мощной техники, может служить попытка перевезти отлично сохранившийся дольмен, описанная в книге А.А.Формозова «Памятники первобытного искусства» [3].

«В 1960 г. решено было перевезти из Эшери какой-нибудь дольмен в Сухуми — во двор Абхазского музея. Выбрали самый маленький и подвели к нему подъемный кран. Как ни крепили петли стального троса к покровной плите, она не двигалась с места. Вызвали второй кран. Два крана сняли многотонный монолит, но поднять его на грузовик оказалось им не по силам. Ровно год крыша Эшери стояла, дожидаясь, когда в Сухуми прибьет механизм помощнее. В 1961 г. с помощью такого механизма все камни погрузили на автомашины. Но главное было впереди:



Петроглифы на порталной плите дольмена в пос. Широкая Щель.

собрать домик заново. Реконструкция осуществлена лишь частично. Крышу опустили на четыре стены, но развернуть ее так, чтобы их края вошли в пазы на внутренней поверхности кровли, не смогли. В древности же плиты пригонялись друг к другу настолько, что клинок ножа между ними не пролезал. Теперь тут остался большой зазор».

Каким образом в начале бронзового века при отсутствии специальной строительной техники (хотя и она, как мы видим на примере Эшери, не все решает) строители добивались сверхточной подгонки многотонных блоков? Вопрос, на который ответа сегодня нет.

Петроглифы. На фронтальных плитах некоторых дольменов имеются рельефные рисунки — петроглифы. Для получения такого рельефа строителям пришлось бы стачивать слой камня со всей плоскости фронтальной плиты. При этом сам барельеф выполнен очень точно. Поверхность камня гладкая и не содержит следов обработки. Объем работы по созданию такого барельефа огромен и требует обладания сложной технологией обработки камня и определенного технического оснащения.

Технологические элементы. На конструктивных элементах дольменов встречаются интересные артефакты, возникновение которых нельзя объяснить процессом механической обработки и подгонки блоков [4].

Покровная плита дольмена имеет вид природного камня с фактурой застывшего раствора со скругленными покатыми гранями и углами. На нижней грани покровной плиты часто можно наблюдать четкую границу, образованную по принципу растекания пластичной массы по твердой горизонтальной поверхности. Торец плиты имеет округлую форму и не носит следов колки или обработки камня.

У больших покровных плит на боковых гранях и фронте



Дольмен в пос.Пшада. Слева — округлый торец покровной плиты, нижняя поверхность покровной плиты и четкая граница разделения. Справа — боковой торец покровной плиты.

можно наблюдать четкую грань между боковой плоскостью и верхней и нижней поверхностями плиты. Верхняя поверхность плиты закругляется и резко переходит в боковую плоскость — как будто пластичная масса растекалась по плоскости, ограниченной опалубкой (вероятнее всего, земляной).

На нижней части покровной плиты в большинстве дольменов видны следы натеков и посадочные выемки, в точности соответствующие граням верхних торцов плит. Следов обработки камня нет.

Боковые плиты плиточных дольменов имеют на разрезе характерную линзообразную форму с выпуклостью наружу. Внутренняя поверхность плиты абсолютно ровная. Торцы плит имеют вид совершенно дикого природного камня, и на них отсутствуют следы от шпуров.

При внимательном осмотре плит дольмена можно увидеть самые разнообразные литьевые артефакты: границы контакта масс, текстуры течения, газовые пузыри, кусочки вмурованной породы.

В составных дольменах особенно хорошо видна идеальная стыковка блоков сложной формы по криволинейным границам сопряжения. Пример — составной дольмен на горе Нэксис в Геленджикском р-не. Качество стыковки многотонных



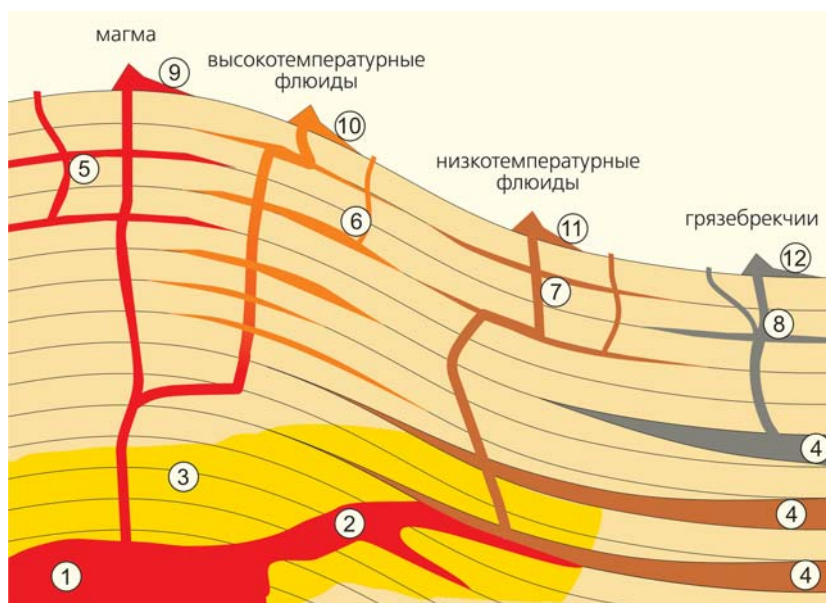
Вид со стороны портала на пяточную плиту, заднюю и боковые стенки и плиту перекрытия составного дольмена на горе Нэксис.

каменных блоков стен и покровной плиты поражает воображение. Боковые блоки Г-образные, они загибаются и переходят на заднюю стенку. Стыковочные швы криволинейные, но блоки сопоставлены абсолютно точно.

Вышеуказанные примеры пластичного формирования блоков привели нас к выводу, что элементы дольменов изготавливались не путем колки и обтесывания камня, а путем формирования их из пластичной массы.

Флюидолиты

Процессы, в результате которых из глубин на дневную поверхность может поступать пластичная или текучая масса, которая в приповерхностных слоях и на поверхности затвердевает и литифицируется, в геологической литературе рассматривались с разных позиций. Согласно обобщенной геологической модели формирования восходящих флюидальных потоков различного генезиса, подобные



Геологическая модель формирования восходящих флюидалных потоков. 1 — батолит, 2 — шток, 3 — зона термометаморфизма, 4 — зоны образования низкотемпературных флюидов (зоны аномально высоких пластовых давлений), 5 — интрузивные магматические породы, 6 — интрузивные высокотемпературные флюидолиты, 7 — интрузивные низкотемпературные флюидолиты, 8 — интрузии грязобрекчии, 9 — эффузивные магматические породы, 10 — эффузивные высокотемпературные флюидолиты, 11 — эффузивные низкотемпературные флюидолиты, 12 — излияния грязобрекчии.

горные породы занимают вполне закономерное место [5, 6].

В.Н.Холодов в работе «О природе грязевых вулканов» [7] пишет: «Когда пласт песка входит в область разуплотнения и

сверхвысоких поровых давлений, он превращается в плавун, пластичность песчаника и глины выравнивается, и они оба деформируются как весьма пластичные и сходные образования.

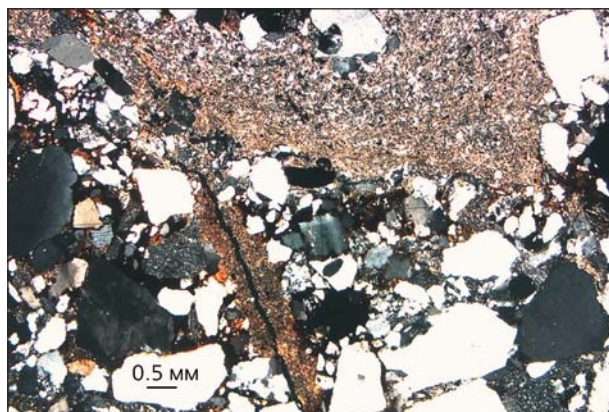


Подчеркнутые выветриванием отдельности песчаника в районе пос.Пшада.

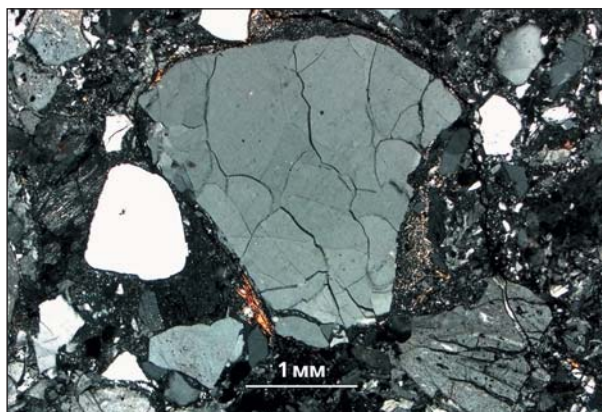
Иногда перепад поровых давлений в глинах и песчаниках настолько велик, что их соприкосновение приводит к более ярким гидроразрывам; под огромным давлением разжиженный песок инъецируется в трещины, заполняет их и после декомпрессии цементируется компонентами, растворенными в пульпе. Именно так формируются песчаные дайки, горизонты с включениями, диапировые апофизы и другие консеквентные тела, описанные нами в ряде предшествующих работ. Они нередко ассоциируются именно с грязевыми вулканами, и это приводит к мысли, что в очаг подобных образований помимо разжиженных флюидами глин могут входить также разжиженные пески-пльвуны. Их проявления особенно типичны для грязевых вулканов Туркмении, где грязобрекчии часто содержат тела песчаников самой причудливой формы».

С других позиций этот процесс рассматривают сотрудники ВСЕГЕИ. В «Петрографическом кодексе России» [8], изданном в 2009 г., подобные породы описаны под названием «флюидолиты» и определены как новый тип эндогенных горных пород. Образовались флюидолиты в результате проникновения (импрегнация) флюидного вещества, зачастую послойного, во вмещающую среду (раму). При этом происходили сброс или экстракция отдельных ингредиентов, в том числе рудных, фиксация вещества флюида в новом пространстве и в конечном счете образование пород и геологических тел со специфическими признаками.

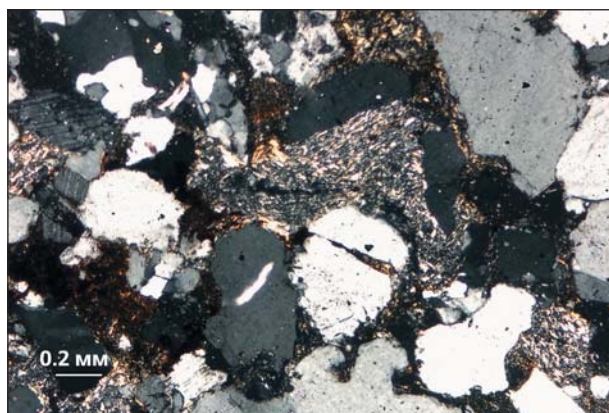
Флюидолиты встречаются в различных геологических обстановках как в складчатых областях, так и на древних платформах [9]. Описанию структуры таких пород посвящена книга «Флюидно-эксплозивные образования в осадочных комплексах» [10]. Отметим также, что И.И.Чайковский в своей докторской диссертации, описывая



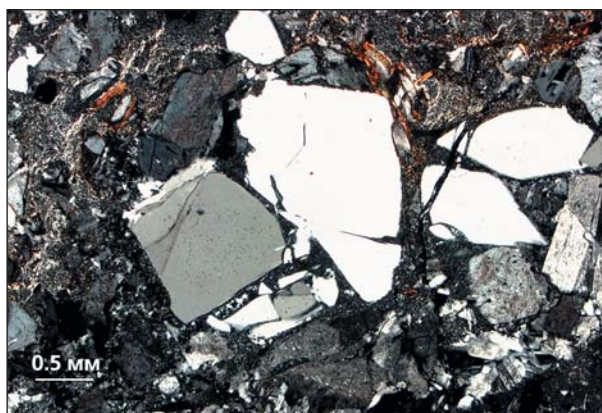
Шлиф горной породы из скалы возле пос. Пшада. След флюидального микропотока, состоящего из алевритистого аргиллита. Песчаник (микстит) разномзернистый, с обломочным материалом размерностью от тонко- (0.07—0.1 мм) до крупнозернистого (1 мм).



Шлиф горной породы из скал в районе пос. Малое Псеушхо. Туф кислого состава псаммитовый литокристалло-клас- тический. На 85—90% состоит из обломков (часто растрескавшихся) кристаллов кварца и полевых шпатов. Обломки угловатые, нередко с признаками «дробления на месте».



Шлиф из породы дольмена в пос. Пшада. Песчаник средне- зернистый со следами флюидной проработки. Ярко выражены признаки дробления и вторичного растворения зерен. Зерна притерты друг к другу по прямой линии — след постседиментационного стресса.



Шлиф из породы дольмена Малое Псеушхо. Горная порода того же типа, что и в дольмене Пшада. Еще более ярко выражены признаки постседиментационного дробления зерен; также видны сростки калиевого полевого шпата с биотитом.

глубинные алмазоносные флюидолиты, относит их к продуктам взрывно-грязевого вулканизма.

В местах предполагаемой добычи сырья для создания дольменов в обнажениях коренных пород и в крупных глыбах массивного песчаника можно наблюдать характерные пластические деформации, возникшие в период их образования. Наблюдаются следы контакта масс, образующих геологическое тело и отпечатки вмещающих пород. Встречается характерное поверхностное растрескивание

песчаника по типу «хлебной корки». В глыбах песчаника наблюдаются различные текстурные признаки, обусловленные прерывистостью процесса формирования пород, его многократной импульсивностью. Часто в песчанике различимы кусочки захваченного из вмещающих пород аргиллита, мергеля, известняка.

Вывод о флюидной природе материала дольменов подтверждается и петрографическими исследованиями. В шлифах наблюдаются следующие особенности пород, характерные для

флюидолитов и аналогичные описанным в «Атласе структур и текстур флюидно-взрывных пород» [11]: неоднородная структура при различных сочетаниях обломочного материала и цемента; присутствие в породе фрагментов вмещающих пород; следы органического вещества; признаки дезинтеграции минеральных зерен и литокластов изнутри с центробежным расположением их частей с конформными границами и заполнением вновь возникающих трещин матриксом; неравновесное сочетание минераль-

ных зерен и специфический петрохимический состав породы.

Петрографический анализ образцов материала, из которого сделаны дольмены, и образцов флюидогенного песчаника близлежащих скальных обнажений показывает сходство минерального состава как обломочного материала, так и цемента. Состав песчаника, из которого сделан дольмен, и песчаника скальных обнажений оказался полностью идентичен. Это позволяет точно определить источник строительного материала.

Реконструкция технологии строительства

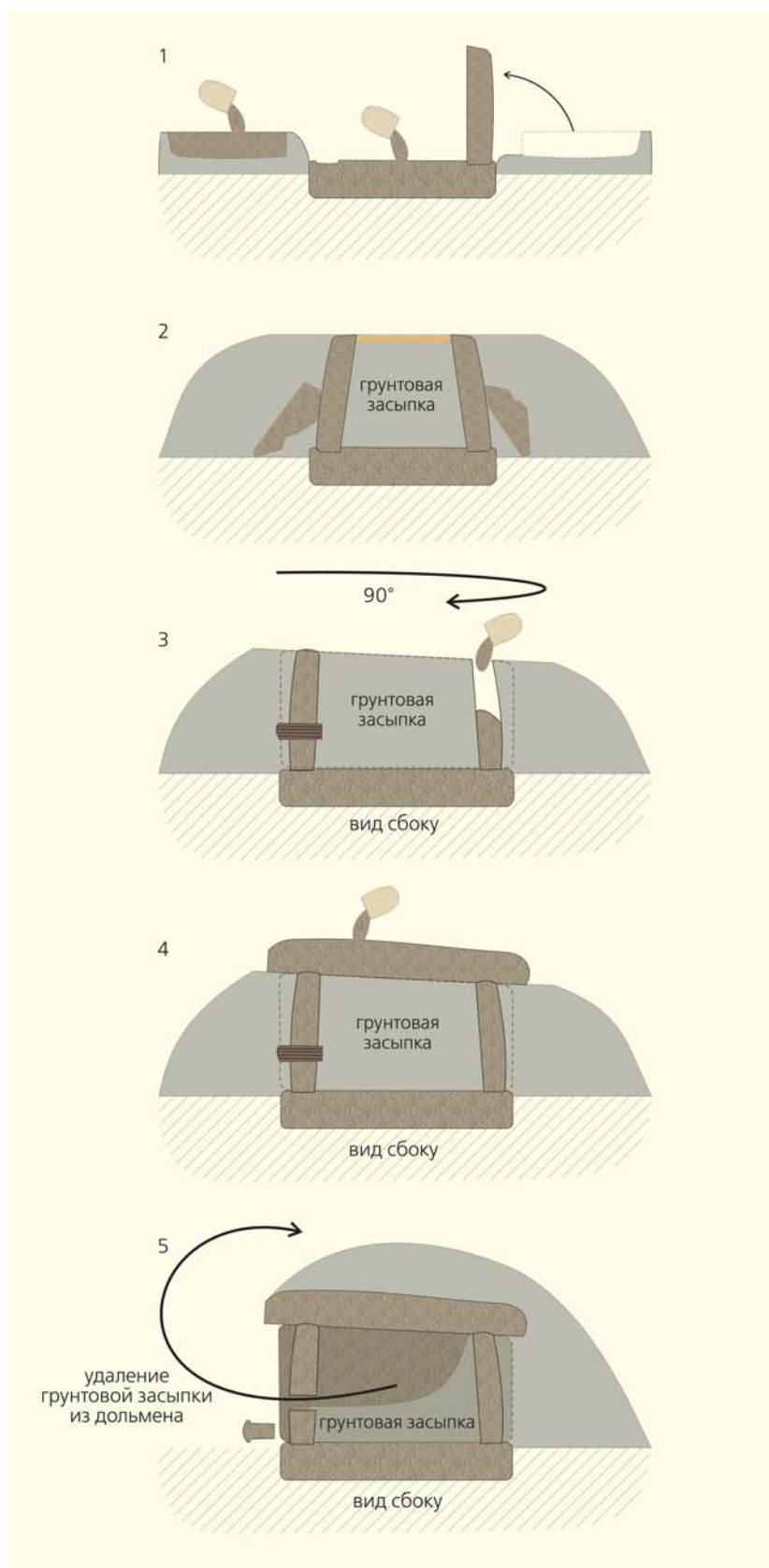
Приведенные нами данные позволяют предположить, какая технология использовалась при строительстве дольменов. Дольмены и их отдельные элементы отливались или лепились из флюидогенной массы *in situ*. Вот как мог возводиться дольмен самого распространенного плиточного типа.

В котлован на месте будущего дольмена укладывалась флюидогенная масса, образующая фундамент будущего строения — пяточный камень. В земле делались формы под плиты будущих боковых стен, и производилась заливка.

После того как раствор набирал необходимую конструктивную прочность, плиту с помощью рычагов ставили на «торец». Боковые стенки опирали на распорки, наклоняя навстречу друг другу под небольшим углом.

Используя земляную засыпку, формировали опалубку для фронтальной и задней стенки между боковыми стенками. Очевидно, что сопряжение с боковыми плитами при наличии пазов было абсолютным.

По завершению изготовления фронтальной и задней плиты-стенки весь дольмен оказывался погребенным под земляным курганом-опалубкой.



Реконструкция последовательных этапов (сверху вниз) строительства плиточного дольмена методом заливки флюидогенной массы в земляную форму.

нивалась, и на нее укладывали флюидогенную массу, формируя покровную плиту. После литификации массы оставалось откопать портал. Через отверстие извлекали землю из дольмена.

При строительстве составных дольменов также изготавливали пяточный камень. Затем насыпалась земляная опалубка и в нее укладывали флюидогенную массу. Размер заливаемых блоков, видимо, определялся количеством добываемого раствора либо его качеством (временем схватывания), а также временем доставки от источника до строительной площадки. Стыковочные швы получались идеальными, а форма блоков могла быть самой причудливой.

Технология заливки элементов дольменов из пластичной массы объясняет, как бригада в несколько человек с минимумом примитивных инструментов (каменные скребки, корзины, рычаги) может построить многотонный дольмен. Технология литья составных частей дольменов полностью объясняет фантастическое многообразие конструктивных решений и качество сопряжения строительных конструкций. Дальнейшее изучение механизма формирования и образования флюидолитов позволит более детально восстановить техноло-

гию создания этих мегалитических построек.

Наша модель формирования дольменов позволяет объяснить упомянутые в начале статьи проблемы, связанные с их строительством:

— строителям дольменов не нужно было добывать в каменоломнях огромные блоки песчаника;

— флюидогенные массы переносились вручную от их выхода на поверхность на место строительства дольмена. При такой транспортировке не было необходимости в прокладке специальных дорог;

— для формирования строительных элементов будущего дольмена флюидогенную массу укладывали в земляную опалубку или же будущий элемент, если позволяла вязкость «раствора», непосредственно формировали (лепили) на месте;

— следы затесов, которые видны на внутренней поверхности дольменов и на портале, вполне могли быть оставлены каменными, бронзовыми и даже деревянными скребками-шпателями;

— изумляющая всех сверхточная подгонка многотонных блоков по криволинейным стыкам, — естественное свойство технологии лепки или литья;

— нанесение на поверхность плит выпуклых знаков

и петроглифов могло быть результатом формирования или резьбы по нелитифицированному флюидолиту;

— дольменная культура возникла во время активных геологических процессов на данной территории, сопровождавшихся излияниями флюидогенной массы. Со временем геологическая активность в регионе угасла, излияния прекратились и дольменная культура угасла, лишившись строительного материала.

* * *

Геологические условия для выделения флюидолитов в пластичном состоянии на поверхности земли не уникальны и характерны не только для Кавказа. На нашей планете существует множество мест, где создаются геологические условия для зарождения флюидов и их выходов на дневную поверхность.

Возможно, что в тех местах, где происходил выход флюидолитов на дневную поверхность, в определенный исторический период, при условии существования на этой территории этноса с некоторыми сформированными религиозными представлениями, возникали условия, при которых люди использовали флюидогенную массу для возведения культовых мегалитических сооружений. ■

Литература

1. Марковин В.И. Дольменные памятники Прикубанья и Причерноморья. М., 1997.
2. Марковин В.И. Дольмены Западного Кавказа. М., 1978.
3. Формозов А.А. Памятники первобытного искусства на территории СССР. М., 1980.
4. Шариков Ю.Н., Комиссар О.Н. Дольмены Кавказа: геологические аспекты и технологии строительства. Краснодар, 2011.
5. Комиссар О.Н., Кузьмин Я.В., Шариков Ю.Н. Исследование осадочных горных пород в районах расположения дольменов Западного Кавказа // Труды III (XIX) Всероссийского археологического съезда. Т.2. СПб.; М.; Великий Новгород, 2011. С.389—392.
6. Холодов В.Н. Песчаный диапиризм — новая сторона катагенетических процессов // Литология и полезные ископаемые. 1978. №4. С.50—66; №5. С.52—63.
7. Холодов В.Н. О природе грязевых вулканов // Природа. 2001. №11. С.47—58.
8. Петрографический Кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб., 2009.
9. Якобсон К.Э., Казак А.П., Толмачева Е.В. Туффзиты под Санкт-Петербургом // Природа. 2003. №5. С.61—63.
10. Казак А.П., Копылова Н.Н., Толмачева Е.В., Якобсон К.Э. Флюидно-эксплозивные образования в осадочных комплексах / Ред. К.Э.Якобсон. СПб., 2008.
11. Якобсон К.Э., Казак А.П., Копылова Н.Н. и др. Атлас структур и текстур флюидно-эксплозивных пород / Ред. К.Э.Якобсон. СПб., 2011.

Невозможные реальные кристаллы

М.М.Левицкий, Д.С.Перекалин

Эта статья — о квазикристаллах, впервые «увиденных» в 1982 г. израильским химиком Даниэлем Шехтманом, который через 29 лет получил Нобелевскую премию за открытие столь необычных структур. Краткая информация об этом была опубликована в «Природе» (2012. №1. С.112—114). Здесь же мы представим картину, рисующую не только более подробную историю открытия, но и его предысторию, представим прообразы невозможных, но тем не менее реальных структур. Мы не будем повторять все те сведения, с которыми читатели уже знакомы, однако по сюжету кое-каких повторов не удастся избежать.

Открытие Шехтмана — одно из самых необычных в химии. Пожалуй, с ним может сравниться только удостоенное Нобелевской премии открытие фуллерена*. Структура этого чисто углеродного соединения оказалась тесно связанной и с архитектурными сооружениями, и с формой спортивных мячей, и с крупным разделом математики, изучающим усеченные многогранники.

Премированная работа за квазикристаллы, в отличие от многих предыдущих, не представляет собой результат многолетних масштабных и планомер-



Михаил Моисеевич Левицкий, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидридов металлов Института элементоорганических соединений им.А.Н.Несмеянова РАН. Научные интересы включают химию координационных и элементоорганических соединений.



Дмитрий Сергеевич Перекалин, кандидат химических наук, старший научный сотрудник того же института. Область научных интересов: органическая и квантовая химии, катализ, металлоорганическая химия рутения, железа, кобальта, родия.

ных исследований. Напротив, это истинное открытие, неожиданное и в определенной степени случайное. Но оно потребовало пересмотра многих устоявшихся понятий и драматически сказалось на судьбе самого автора — Шехтмана.

Мир мозаик

Предварим знакомство с работой нобелевского лауреата небольшим рассказом о мозаике, которая, как станет ясно, имеет отношение к квазикристаллам.

Этот распространенный вид изобразительного искусства, вероятно, знакомый каждому, является собой орнамент или картину, собранную из кусочков какого-либо материала, имеющих всевозможную форму и окраску. Материалом может быть картон (например, в популярных пазлах), дерево, керамика, цветное стекло и др. Множеству людей известна созданная М.В.Ломоносовым из смальты (цветного стекла) мозаичная картина (размером 4,2×2,7 м), на которой изображен Петр Первый во время Полтавской битвы (рис.1).

* Лауреаты Нобелевской премии за 1996 г. По химии — Р.Керл, Г.Крото, Р.Смоли // Природа. 1997. №1. С.96—99.



Рис.1. «Полтавская баталия». Мозаика М.В.Ломоносова. 1764 г.

При решении различных научных вопросов мозаики тоже имеют большое значение. Вначале ими интересовались лишь математики. Они изучали мозаики, составленные из фигур одной формы, причем только таких, которые могут заполнить неограниченную плоскость без зазоров и перекрываний. Таких фигур оказалось немного: треугольники, квадраты, прямоугольники, ромбы и шести-

угольники. Мозаики такого рода часто встречаются в повседневной жизни (рис.2).

Другими фигурами — пяти-, семи- или десятиугольниками — плотно замостить плоскость (например, тротуар) невозможно: либо они будут налезать друг на друга, либо между ними останутся пустоты (рис.3).

У читателя, возможно, возникнет возражение: плоскость можно заполнить не только тре-

угольниками, ромбами, квадратами, прямоугольниками и шестиугольниками, но и другими одинаковыми фигурами. Например, удастся собрать паркет из пластин с вырезами и выступами; такая конструкция хороша тем, что соединяет паркетины в замок типа «ласточкин хвост» и не позволяет им распозаться (рис.4). Примерно так же устроены пазлы, но в них составляющие элементы неодинаковы. Су-

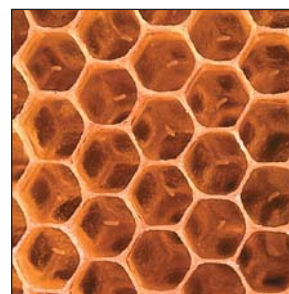
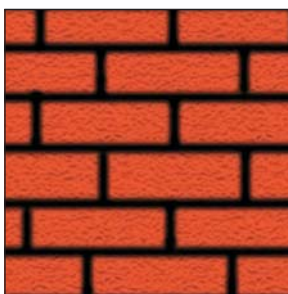


Рис.2. Примеры мозаик. Слева направо: декоративная стена из металлических треугольников; кирпичная кладка; мозаика из ромбовидных кусочков сланца в отделке внешних стен; пчелиные соты.

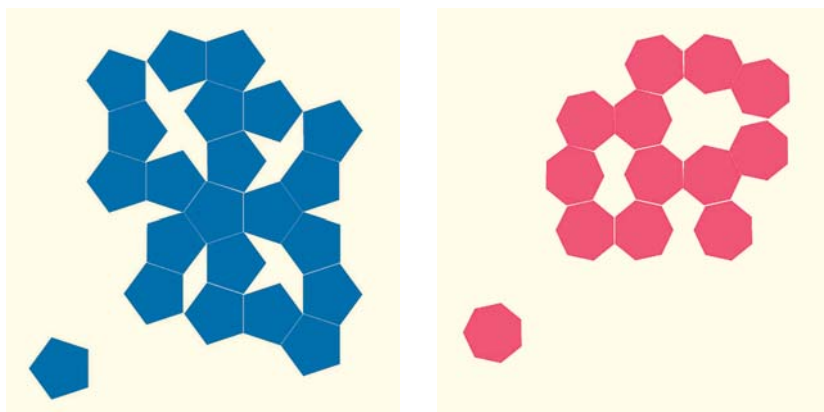


Рис.3. Неплотная упаковка пяти- и семиугольников.

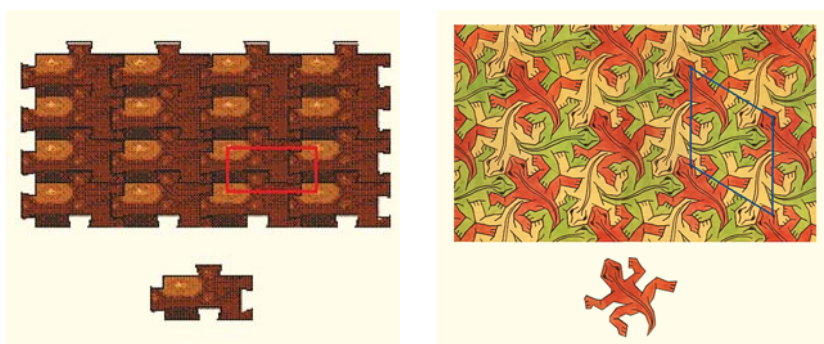


Рис.4. Мозаики, собранные из фигур сложной формы. Виден строгий порядок: отдельные элементы узора располагаются в выбранном направлении на одинаковом расстоянии друг от друга — желтые точки на левом рисунке и глаза ящериц на правом. Если соединить эти элементы линиями, на паркетной мозаике получится прямоугольник, а на той, где ящерицы, — ромб.

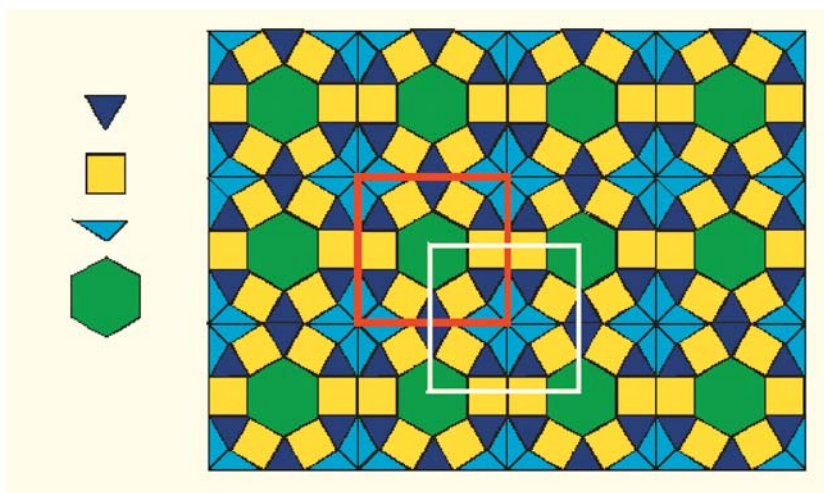


Рис.5. Периодическая мозаика причудливого узора, собранная из шестиугольника, квадрата и двух разных треугольников. Если соединить прямыми линиями центры четырехлучевых голубых звездочек (красный квадрат) или центры зеленых шестиугольников (белый квадрат), то образовавшаяся мозаика окажется составленной из квадратных «кафельных плиток». Снова обычная «квадратная» мозаика, но только причудливо разрисованная.

ществуют и более затейливые мозаики, например работы известного голландского графика Мориса Эшера (1898—1972). Он создавал картины-мозаики из разных фигур — птиц, конных всадников, ящериц (см. рис.4). Кстати, его идеями интересовались кристаллографы.

Какие общие признаки есть во всех упомянутых мозаиках (см. рис. 2, 4)? Прежде всего, в них соблюдается строгий порядок, т.е. отдельные элементы узора располагаются в каком-либо выбранном направлении на одинаковом расстоянии друг от друга.

Второе важное свойство — любая мозаика может расширяться во все стороны путем добавления одинаковых фрагментов (назовем их условно кафельными плитками) к уже имеющемуся участку. Это свойство называют периодичностью. Каждая «кафельная плитка», т.е. прямоугольник с вырезами «ласточкин хвост» или «ящерица», составляет **период**.

Чтобы воспроизвести сложные узоры, совсем необязательно изготавливать причудливые плитки. Можно обойтись совсем простыми деталями. В самом деле, например, в «ласточкин хвосте» и в мозаике из ящериц заметны равноудаленные одинаковые элементы узора: если соединить их прямыми линиями, то в первом случае получается прямоугольник, во втором — ромб (см. рис.4). Если изобразить на таком прямоугольнике или ромбе тот рисунок, который они охватывают, получатся «кафельные плитки», представляющие собой период. Из этих плиток легко собрать мозаику, в которой точно повторяется исходный элемент узора. С точки зрения математики такие мозаики весьма просты, у них периоды — прямоугольник или ромб. И так, не удалось получить периодическую мозаику с весьма непростым рисунком, построенную из каких-то новых фигур.

А можно ли создать мозаичную картину из набора четырех

геометрических фигур: шестиугольника, квадрата и двух разных треугольников? Действительно, мозаика получается — отчетливо упорядоченная и периодическая (рис.5). Но если соединить прямыми линиями центры шестиугольников или фигурок, образованных малыми треугольниками, эта мозаика окажется построенной из квадратных «кафельных плиток». Снова обычная «квадратная» мозаика, но только разрисованная причудливым узором.

Выходит, периодические мозаики можно составлять лишь из треугольников, ромбов, квадратов, прямоугольников и шестиугольников.

Путь к объемной мозаике

Коль скоро здесь идет речь об открытии квазикристаллов, нелишне будет напомнить, как был найден способ изучать строение классических кристаллов. История эта своеобразна. В конце XVII в. шотландский математик и астроном, предшественник Ньютона Джеймс Грегори (1638—1675) обратил внимание на то, что белый свет, прошедший через птичье перо, приобретает радужную окраску. С той поры исследователи стали специально изготавливать решетчатые конструкции, чтобы разлагать проходящий свет на спектральные составляющие. Такие

решетки называли дифракционными (от лат. *diffractus* — разломанный, переломанный). В процессе дифракции волна огибает лишь то препятствие, которое по размерам соизмеримо с длиной волны, а с более крупными предметами такого эффекта нет. Например, ствол дерева, торчащий из воды, не меняет картину волнения; позади широкого щита поверхность уже спокойная, без волн. Световые волны, проходя через узкую щель, отклоняются, причем угол отклонения зависит от длины волны. Свет расщепляется на составляющие лучи, потому и возникает радужная картина.

Свет также превращается в раду, если он проходит через стеклянную призму, но стекло сильно ослабляет инфракрасную и ультрафиолетовую части спектра. Этого не бывает, если на пути светового луча — дифракционная решетка, так как он постоянно находится в одной, воздушной, среде. Потому дифракционные решетки используются в спектральных приборах.

Естественно, что размер штрихов на дифракционной решетке должен быть близок к длине волны света (в среднем 0.5 мкм). Бытовой пример — компакт-диск, у него расстояние между спиральными бороздками приблизительно 0.2 мкм (рис.6). Как и любая дифракционная решетка, он отражает падающий свет, окрашивая его в радужные

цвета. Надо сказать, что изготовление таких решеток находится на пределе технических возможностей.

Длина волны рентгеновских лучей по крайней мере в сотню раз меньше, чем видимого света. Изготовить подходящую для них дифракционную решетку со столь «мелкой насечкой» технически невозможно. Однако проблему удалось решить. В 1912 г. немецкий физик-теоретик Макс Лауэ сделал смелое предположение: в качестве дифракционной решетки для рентгеновских лучей можно использовать кристалл. Он пояснил — сама кристаллическая структура и сыграет роль «мелких насечек», размер которых соизмерим с длиной волны рентгеновского излучения.

В том же 1912 г. предположение Лауэ экспериментально проверили два его студента — В.Фридрих и П.Книппинг. Они пропустили рентгеновские лучи через кристалл медного купороса и получили на фотопластинке набор равномерно расположенных светлых точек — дифракционную картину, подобную лауэграмме монокристалла (рис.7).

Если дифракционные решетки для видимого света играли роль полезного инструмента в спектроскопии, то в случае рентгеновских лучей сами решетки, т.е. кристаллы, стали объектом изучения. Возникла новая научная дисциплина —



Рис.6. Радужная окраска компакт-диска.

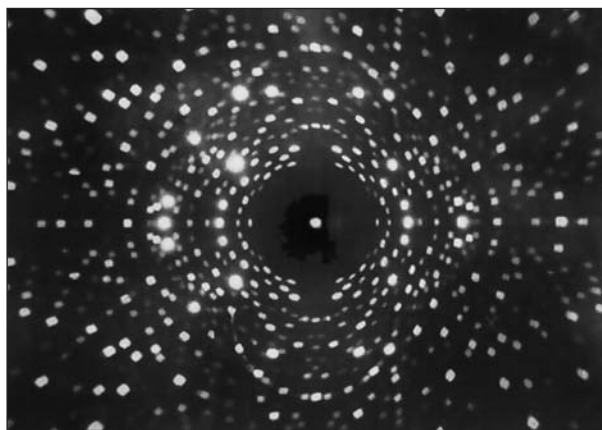


Рис.7. Лауэграмма монокристалла.

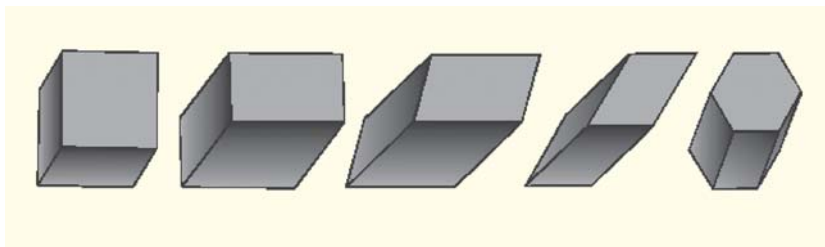


Рис.8. Элементарные ячейки кристаллических структур.

кристаллография. В 1914 г. Лауэ была присуждена Нобелевская премия по физике «за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах».

Началось интенсивное изучение разнообразных кристаллических структур. Накопленные результаты позволили создать общую картину, описывающую строение кристаллов. На основе дифракционных картин, снятых под различными углами и дополненных расчетом, удалось установить форму тех объемных «кафельных плиток», которые заполняют пространство. Оказалось, что это вертикальные или наклонные бруски, у которых размеры ребер и углы наклона различны (рис.8). В основаниях расположены все те же квадраты, прямоугольники, ромбы или шестиугольники, что и в плоских мозаиках. Эти объемные конструкции, называемые элементарными ячейками, обычно мысленно располагают в структуре кристалла так, чтобы в вершинах оказались центры атомов. Такие элементарные ячейки, вплотную приложенные друг к другу, заполняют пространство. **Кристалл оказался объемной мозаикой.** В ней именно элементарная ячейка составляет минимальный период.

Для нескольких сотен тысяч соединений были определены формы элементарных ячеек, и во всех основаниях их многогранников располагались только упомянутые многоугольники. Не было ни одного случая, чтобы оказались пяти-, семи- или десятиугольники. Причина та же, что и в плоских мозаиках, —

такие ячейки не могут плотно заполнить пространство. Читатель, вероятно, захочет возразить — пусть заполнение будет не плотным! Но ведь это уже окажется не кристалл, и дифракционная картина не появится. А Шехтман увидел именно узор из повторяющихся точек, но совершенно необычный.

Через тернии к Нобелевской премии

В апреле 1982 г. Шехтман работал в США, в Национальном институте стандартов и технологий (Гейтсберг вблизи Вашингтона). К этому времени изучать строение кристаллов стали с использованием не только рентгеновских лучей, но и пучков электронов. Этим методом удастся получать информацию даже тогда, когда выделить вещество в кристаллическом виде чрезвычайно трудно, например в сплавах.

Благодаря тому, что Шехтман вел лабораторный журнал, сохранилась точная дата открытия — 8 апреля 1982 г. С помощью электронной дифракции он изучал строение нового вещества, полученного им ранее в своей лаборатории. Это был быстро охлажденный сплав алюминия и марганца состава Al_6Mn .

В процессе работы электронный пучок, проходя через образец, дает дифракционную картину, т.е. рассеивание электронов, внешне напоминающее рентгеновскую дифрактограмму, которая фиксируется на экране в виде точек. Картина, которую увидел Шехтман, поразила его: десять ярких точек, рас-

положенных вокруг центральной точки (рис.9). По его воспоминаниям, он даже произнес вслух (в лаборатории он был тогда в одиночестве): «Этого просто не может быть!».

Прежде он никогда не видел подобную картину и сразу понял, что она противоречит законам кристаллографии. Озадаченный, он вышел в коридор, чтобы поделиться с кем-нибудь этим странным наблюдением. Коридор был пуст, и, вернувшись в лабораторию, он снова стал рассматривать своеобразный узор из светящихся точек.

С самого зарождения кристаллографии в 1912 г. и до этого момента (т.е. за 70 лет) было исследовано больше четверти миллиона кристаллов. Эта область науки опиралась на основной принцип: атомы в кристаллических телах — металлах, солях, минералах — расположены в строго периодическом порядке, который повторяется во всем объеме кристалла. Но из объемного тела, содержащего пяти- или десятиугольник, невозможно создать периодический фрагмент, заполняющий неограниченное пространство, — так же, как невозможно плотно (без промежутков или нахлеста) покрыть поверхность пятиугольной плиткой. Десятиугольник, который увидел Шехтман, — это только часть объемной картины. Проведя через некоторое время съемки образца под различными уг-

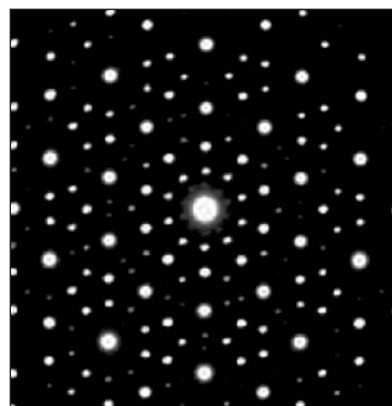


Рис.9. Дифракционная картина, полученная Шехтманом.

лами и дополнив это стандартной математической обработкой, он сумел определить, как расположены атомы в кристалле. Оказалось, что они разместились в вершинах икосаэдра — многогранника, собранного из 20 правильных треугольников (рис.10). Шехтман знал, что невозможно заполнить пространство икосаэдрами так, чтобы они плотно примыкали друг к другу, обязательно возникнут пустоты, чего в кристаллических телах не бывает. Удивление Шехтмана только усилилось.

Итак, Шехтман получил отчетливую дифракционную картину из ярких точек. Если бы материал был не кристаллическим, а аморфным (например, как стекло), то вместо четких точек на экране было бы размытое беловатое пятно. Набор фиксированных точек означает, что имеется кристалл, следовательно, присутствует внутренний порядок. Но из икосаэдров невозможно построить периодически повторяющийся фрагмент, заполняющий пространство. Следовательно, **возможен неперриодический кристалл** — именно такой вывод сделал Шехтман. Некоторое время он никому не рассказывал об этом открытии, опасаясь иронических замечаний, поскольку это полностью противоречило основам кристаллографии. В дальнейшем избежать насмешек и резкой критики все же не удалось.

Вернувшись на основное место работы — в Израильский технологический институт (Хайфа), Шехтман стал рассказывать о своем открытии буквально всем, кто готов был его выслушать. Многие говорили, что это просто эффект «двойниковых» кристаллов, которые создают столь необычную картину. Однако Шехтман, проведя серию экспериментов, полностью отверг такое объяснение. Непрерывная критика со стороны коллег вынуждала его вновь и вновь повторять опыты, и его понимание собственной правоты все более укреплялось.

Однажды руководитель того отдела, где работал Шехтман, принес ему учебник по кристаллографии и сказал: «Прочтите, что здесь написано!». Шехтман ответил, что учит по этому учебнику студентов и отлично понимает, что результаты его экспериментов противоречат тому, что там сказано. В итоге руководитель попросил Шехтмана покинуть отдел, потому что он не хочет позора. В результате Шехтман перешел в другой отдел и продолжил исследования; никто из его окружения не работал с электронным микроскопом, и его результаты не вызывали у коллег никакого интереса.

Лишь в конце 1983 г. появился человек, заинтересовавшийся этой работой, — профессор Илан Блеч с факультета материаловедения. Он подключился к исследованию и создал пространственную модель, описывающую строение подобных кристаллов. Результаты они направили для публикации в «Journal of Applied Physics», но статья была отвергнута редактором (о чем он позже глубоко сожалел).

В 1984 г. Шехтман по приглашению своего прежнего коллеги Джона Кана вернулся в лабораторию Национального института стандартов и технологий, т.е. именно туда, где он впервые «увидел» неперриодический кристалл. Авторитетный физик Кан поддержал исследования, кроме того, к работе был привлечен высококвалифицированный французский кристаллограф Денис Гратиас. Результат совместного творчества они изложили в статье, которую направили в один из самых престижных физических журналов «Physical Review Letters». В ноябре 1984 г. она была опубликована.

Статья вызвала сенсацию и одновременно недоверие. Чтобы каждый исследователь мог сам наблюдать кристалл, «которого не может быть», Шехтман многократно описывал всем желающим методику приготовления образца и условия съемки. Очень скоро начали поступать

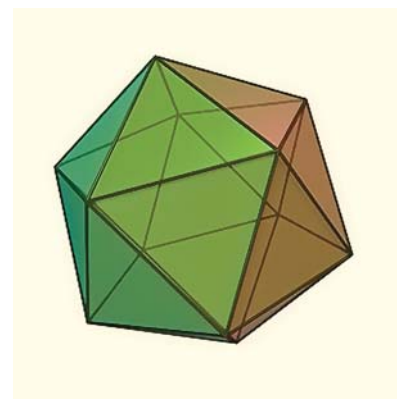


Рис.10. Икосаэдр.

сообщения от ученых всего мира, подтверждающие результаты эксперимента.

Были ученые, которые почти мгновенно почувствовали сенсационность открытия. Буквально через месяц после выхода в свет статьи Шехтмана в том же самом журнале появилась статья Дова Левина и Пола Стейнхардта, в которой они объяснили возможность образования необычного вещества. Такой краткий временной разрыв между выходом двух статей объясняется тем, что авторы имели возможность прочесть статью Шехтмана до ее публикации — редакция журнала отправила ее Стейнхардту на рецензию. Левин и Стейнхардт стали первыми физиками, кто связал результаты Шехтмана с уже существовавшими к тому времени математическими разработками, которые, естественно, не были знакомы большинству химиков. Именно Левин и Стейнхардт впервые употребили термин «квазикристалл», т.е. мнимый кристалл.

Российские физики П.А.Калугин, А.Ю.Китаев и Л.С.Левитов не имели возможности (как Левин и Стейнхардт) ознакомиться со статьей Шехтмана до того, как она вышла в свет. Но, как только это произошло, они опубликовали (1985) в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» результаты своего исследования на ту же тему. Итак, лишь очень неболь-

шая группа физиков смогла понять и оценить необычный кристалл. До полного признания открытия было еще далеко.

Многие ведущие ученые не приняли выводы Шехтмана, но что было самым драматическим — это враждебное отношение выдающегося химика XX в. Лайнуса Полинга, дважды лауреата Нобелевской премии, считавшегося непререкаемым авторитетом в химии. На одной из конференций Американского химического общества (Полинг был его президентом), собравшей больше тысячи химиков, он сообщил: «Дэн Шехтман говорит ерунду. Не существует такого понятия, как квазикристаллы, есть только квазиученые».

В первые годы после опубликования открытия его автора поддерживали только немногочисленные физики и математики, а у кристаллографов были серьезные возражения. Дело в том, что Шехтман использовал электронную дифракцию, но основным инструментом кристаллографов — рентгеновская дифракция. По их мнению, все это напоминало ситуацию, когда инженер-механик объясняет кардиохирургу, как следует делать операцию. На этом основании они полагали, что выводы Шехтмана неверны, а его самого кристаллографом не считали. Сложность состояла в том, что для рентгеновских исследований необходим специально выращен-

ный одиночный кристалл, получить его из сплава достаточно сложно. В 1987 г. в ряде лабораторий удалось вырастить из различных сплавов квазикристаллы, пригодные для рентгеновских исследований (рис.11).

В результате было получено окончательное доказательство правоты Шехтмана. Итак, спустя пять лет после открытия все научное сообщество признало существование квазикристаллов, и только Полинг продолжал оставаться в оппозиции. Но постепенно его отношение менялось, а в начале 1990-х годов он предложил Шехтману написать совместную статью о квазикристаллах. Шехтман, несмотря ни на что, относился к Полингу с глубоким уважением и потому ответил: «Почту за честь иметь такого соавтора, а Вы должны признать, что квазикристаллы все-таки существуют». Величественный Полинг все же еще колебался и добавил, что, пожалуй, это утверждать рано. Совместной статье так и не суждено было появиться — в 1994 г. Полинга не стало.

В своей Нобелевской лекции Шехтман показал на экране портрет Лайнуса Полинга и кратко рассказал обо всей этой истории. Можно понять ученого, пережившего полное отрицание его работ и получившего в результате самую высокую из всех возможных научных наград.

Окончательная победа пришла в 1992 г., когда в результате

открытия Шехтмана Международный союз кристаллографии изменил определение кристалла. Теперь так называют материалы с дискретной дифракционной картиной (т.е. в виде отдельных точек; см. рис.7, 9). Упоминание о периодичности было удалено, квазикристаллы официально вошли в семейство кристаллов. Тот самый сплав Al_6Mn , с которого все началось, был назван в честь первооткрывателя шехтманитом.

Порядок без периодичности

Разобраться в новой структуре помогли предшествовавшие математические работы, а потому вновь вернемся к мозаикам. По результатам интенсивного математического поиска оказалось, что плоские непериодические мозаики возможны. История показывает, что математики часто разрабатывают новые совершенно абстрактные теории и представления, которые, по их мнению, не имеют никакого практического значения. Однако физики и химики со временем начинают использовать эти разработки в качестве инструмента для описания наблюдаемых явлений.

В 1961 г. математик Хао Ванг высказал следующую гипотезу: любая мозаика из повторяющихся элементов всегда перио-

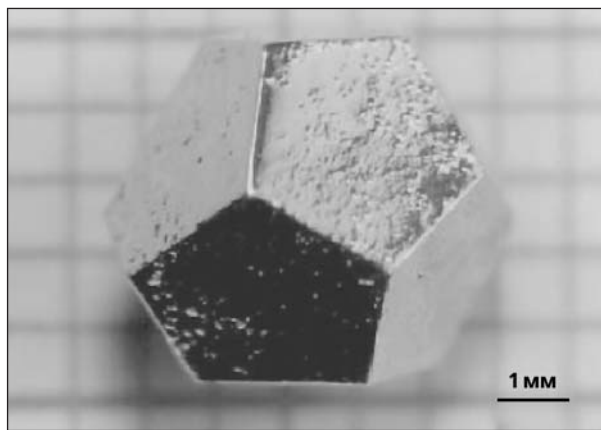
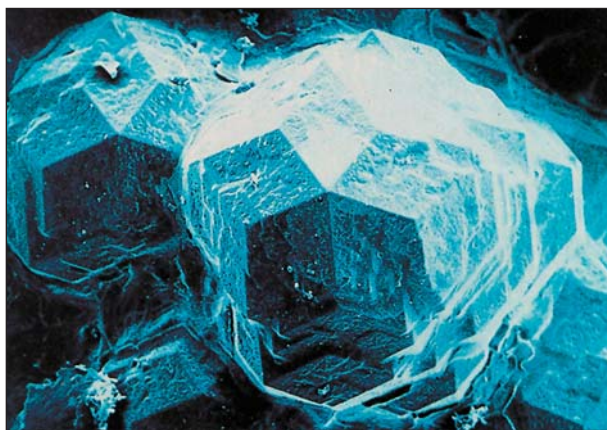


Рис.11. Отдельные квазикристаллы, выращенные из различных сплавов.

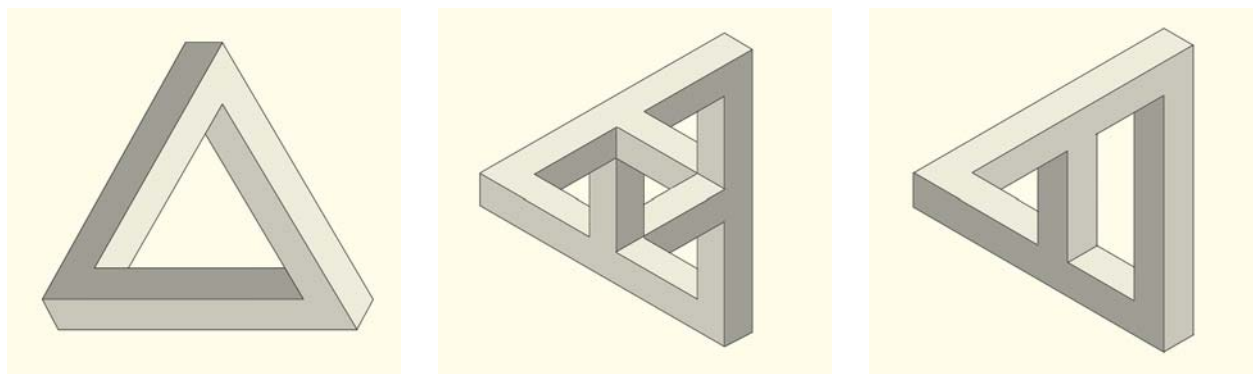


Рис.12. Треугольник Пенроузов (слева) и его последующие варианты.

дична. Но в 1966 г. его ученик, Роберт Бергер, доказал, что гипотеза Ванга неверна: Бергер создал непериодическую мозаику из 20 426 плиток, полностью замостив плоскость. Через некоторое время он, впрочем, сумел сократить их число до 104. Математики стали искать варианты мозаик, которые можно построить из меньшего количества плиток. В 1971 г. Рафаэль Робинсон предложил всего шесть плиток для непериодического замощения плоскости.

К поиску в этом направлении подключился известный английский математик Роджер Пенроуз. Поскольку он со временем стал изучать проблему квазикристаллов, следует сказать немного о нем самом. Пенроуз возглавляет кафедру математики Оксфордского университета, активно и успешно работает в различных областях математики, общей теории относительности и квантовой теории. Вероятно, его имя знакомо многим благодаря созданному им (совместно с отцом Лайонелом Пенроузом) «невозможному треугольнику», который в литературе называют треугольником Пенроузов (рис.12). Этот треугольник, изображенный на плоскости, вызывает странное чувство «правильности» и одновременно «невозможности». Сразу же появилась масса вариантов такого треугольника (см. рис.12).

Наиболее сильное впечатление производит объемный мо-

нумент — 13-метровая скульптура из алюминия, сооруженная в 1999 г. в австралийском городе Перте. При рассмотрении с конкретной точки возникает полная иллюзия треугольника (рис.13). Однако стоит лишь изменить угол зрения, как становится понятно, что это всего лишь три прямые балки, расположенные под определенным углом и не имею-

щее к треугольникам никакого отношения (см. рис.13).

Вернемся к непериодическим мозаикам. В 1976 г. (очень вовремя, за шесть лет до открытия Шехтмана) Пенроуз достиг рекордного результата, он сумел создать непериодическую мозаику всего из двух плиток — утолщенного и утонченного ромбов строго определенных пропорций. Эта мозаика, собранная из

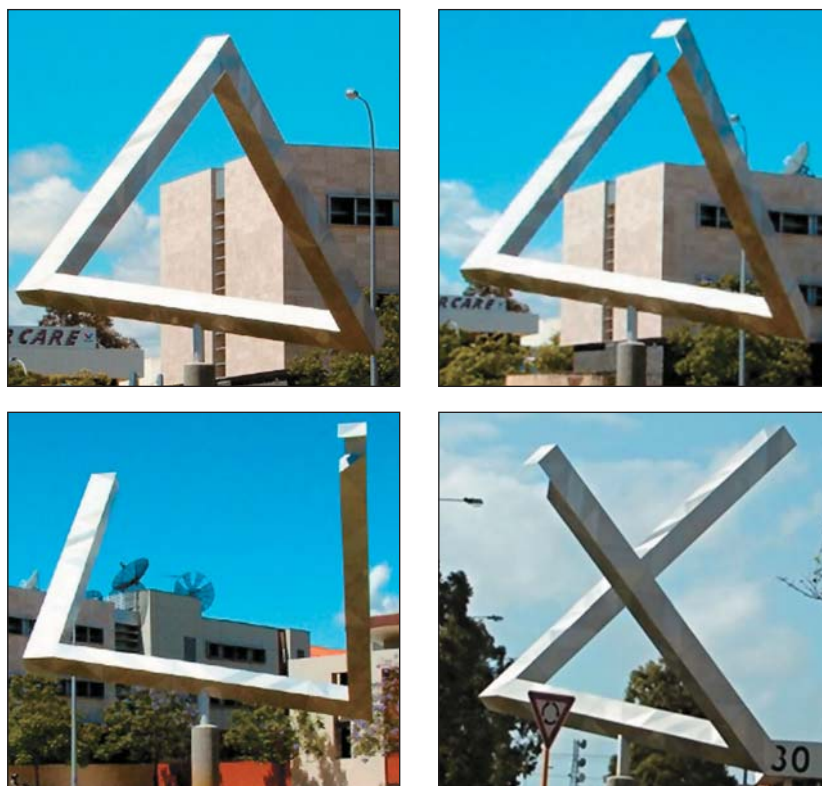


Рис.13. Объемный треугольник Пенроузов. При рассмотрении с разных ракурсов он теряет всякое сходство с треугольником.

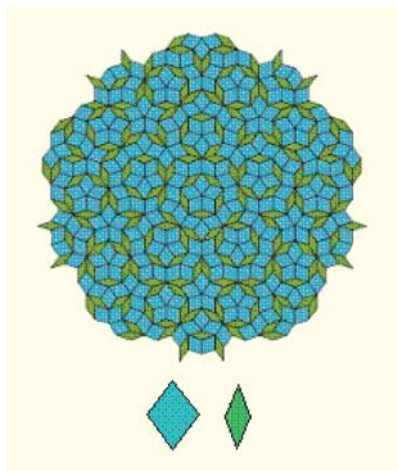


Рис.14. Непериодическая мозаика Пенроуза.

зеленых и голубых ромбов, сразу стала широко известной (рис.14). Мозаика эта упорядочена — узор распространяется в пяти направлениях от одного центра и в каждом из направлений строго воспроизводится. Этой мозаикой можно замостить бесконечную плоскость без зазоров. А что значит отсутствие периодичности? Дело в том, что невозможно выделить некий фрагмент узора и «охватить» его какой-либо фигурой (даже очень сложной, как, например, изображение ящерицы на рис.4), которая будет играть роль «кафельной плитки», т.е. периода.

Мы упоминали о «Полтавской баталии», созданной Ломоносовым (см. рис.1). Это непериодическая и неупорядочен-

ная мозаика, а мозаика Пенроуза **непериодична, но упорядочена**. Упорядоченность подобных мозаик не просто установить при обычном рассмотрении, еще труднее собрать такую мозаику из плиток. Это требует внимания и соблюдения некоторых, далеко не простых правил. Если они будут нарушены, рост мозаики в какой-то момент прекратится. Таким образом, ее строят по определенному алгоритму, вследствие чего она оказывается не случайной, а упорядоченной структурой: любая ее конечная часть встречается множество раз в мозаике, занимающей достаточно большую площадь. Кроме того, количественное соотношение утолщенного и утонченного ромбов по мере роста мозаики строго сохраняется — 1.618. На самом деле это бесконечная дробь (иррациональное число), именно поэтому и невозможно вырезать из такой мозаики плитку, образующую период. Чтобы установить непериодичность и в то же время упорядоченность конкретной мозаики, требуется специальный математический анализ. Потому доверимся математикам при решении таких вопросов.

Пенроузу удалось найти еще тип узоров, собираемых всего из двух плиток со строго определенными пропорциями, — он их условно назвал «воздушным змеем» и «дротиком». Английский математик также сумел до-

казать, что при использовании более двух типов ромбовидных «кафельных плиток» можно создавать непериодические мозаики с участием семи- или 11-лучевых звезд (рис.15). Пенроуз детально описал принципы создания таких мозаик и отметил, что эта область содержит много трудных и нерешенных пока задач.

Далее произошло знаменательное событие, на которое поначалу никто не обратил внимания. В 1982 г. (в тот же год, когда Шехтман сделал свое открытие) физики Алан Маккей и Роберт Амман взяли одну из мозаик Пенроуза, мысленно расставили в ее вершинах условные атомы, преобразовали ее в пространственную конструкцию и рассчитали, какую дифракционную картину должна давать такая структура. Оказалось, что должны получиться светлые точки, расположенные по вершинам десятиугольника. Следовательно, непериодические кристаллы возможны, оставалось дожидаться, когда их обнаружат экспериментально, что и удалось сделать Шехтману буквально в тот же год. А связали воедино теоретические расчеты Маккея и Аммана с экспериментами Шехтмана те самые энергичные Левин и Стейнхардт, которые ознакомились с его статьей до ее публикации. Итак, можно сказать, что математическая дисциплина, изучающая мозаики, помогла предсказать квазикристаллы и объяснить их строение. Вполне естественно, что в нобелевском докладе Шехтмана были показаны эти удивительные мозаики.

Отметим, что Пенроуз не остался в стороне от проблем квазикристаллов. Вероятно, он был немного удивлен, что его абстрактные математические упражнения с мозаиками вскоре оказались интересными для физиков и химиков. Он разработал модели объемных непериодических мозаик и, кроме того, предложил свою схему роста квазикристаллов.

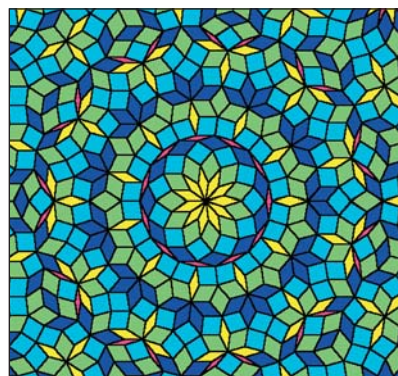
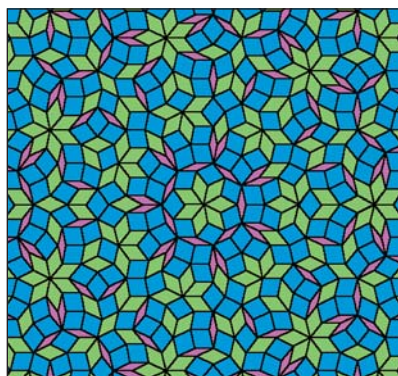


Рис.15. Мозаики Пенроуза, собранные из плиток трех типов (слева) и из пяти. Каждый тип плитки имеет свою окраску.



Рис.16. Древний орнамент, украшающий свод у входа в султанскую ложу в турецкой мечети. 1424 г.



Рис.17. Непериодическая мозаика над входом в мечеть Дарб-и-Имам в Исфахане. 1453 г.

Мы уже говорили, что плоскую периодическую мозаику достраивать очень просто: надо прикладывать к имеющемуся собранному участку новые «кафельные плитки» с разных сторон. Собрать непериодическую мозаику много сложнее, необходимо руководствоваться строгой стратегией. С обычными кристаллами все обстоит приблизительно так же: они растут снаружи за счет последовательного добавления все новых и новых частиц к внешним граням. Однако для квазикристаллов такая схема не годится. Пенроуз считает, что в процессе их роста наращиваются сразу целые группы частиц, которые, образно говоря, заранее договариваются подойти к поверхности в нужный момент. Звучит несколько необычно, но в квантовых представлениях, которые дополнительно привлекает для этого Пенроуз, многое не укладывается в обычную логику. Впрочем, вопрос о механизме роста квазикристаллов пока не решен.

Орнаменты Средневековья

Примечательно, что возникший интерес к квазикристаллам вызвал новую волну в исследованиях историков и искусствоведов,

изучающих древние орнаменты. Оказалось, что непериодические мозаики были известны по крайней мере за сотни лет до Пенроуза, а помогли в этом разобратся, естественно, математики. Они посмотрели свежим взглядом на узоры, покрывающие мечети в странах Азии (Афганистане, Иране, Ираке и Турции), построенные еще в Средневековье. В исламе строго запрещено изображать людей и животных, и поэтому в оформлении зданий использовали чаще всего геометрический орнамент из многоугольных фигур. Среди них, как оказалось, присутствовали пятиугольники и десятиугольники. Это первый признак того, что мозаика непериодическая, тщательный анализ подтвердил такие предположения (рис.16, 17).

Появление подобных узоров относят к XIII в., а в XV в. они широко распространились. Большинство специалистов полагает, что столь сложные орнаменты не могли возникнуть случайно в процессе работы мастера при отделке зданий. Из результатов анализа, проведенного современными исследователями, стало ясно, что в орнаментах были соблюдены те же принципы, которые столетия спустя сформулировал Пенроуз. По-видимому, уровень развития средневековой

математики на востоке был значительно выше, чем считалось до сих пор, ведь придумать такой орнамент без специальных математических знаний практически невозможно.

Известно, что в 15-м столетии из исламского мира в Европу пришли математические понятия и дисциплины, такие как тригонометрия и алгебра. Но оказалось совершенно неожиданным и удивительным, что средневековые мастера смогли придумать орнаменты, которые были через 500 лет заново созданы и разработаны современными математиками.

Интересно, что изменилась и терминология: под влиянием открытия Шехтмана все древние непериодические мозаики стали называть квазикристаллическими.

Природные квазикристаллы

Долгое время считалось, что квазикристаллы можно создать только искусственным путем. Но в 2009 г. ученые из Принстонского университета обнаружили их во фрагментах минерала хатрыкита (еще в 1979 г. он был найден российским геологом Валерием Крячко на Корякском нагорье). Это открытие вызвало небольшую сенсацию. Найден-

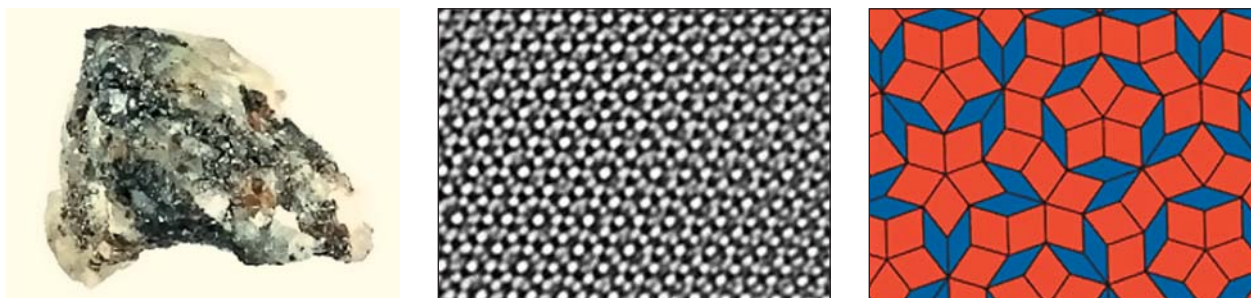


Рис.18. Образец минерала хатыркинта (слева), электронномикроскопический снимок природного квазикристалла (в середине), содержащегося в этом минерале, и фрагмент мозаики Пенроуза, которая удивительно напоминает полученный снимок.

ные зерна были очень мелкие (приблизительно до 200 мкм в диаметре) и содержали железо, медь и алюминий, а строение оказалось практически таким же, как и синтетических квазикристаллов (рис.18).

Пока не ясно, как попали квазикристаллические частицы в горную породу, вероятно, к их образованию привел некий геологический процесс. Если ученым удастся выяснить, какой именно, это, возможно, укажет новые, более простые пути, ведущие к получению синтетических квазикристаллов. В настоящее время, синтезируя их в лаборатории, химики не придерживаются каких-либо точно установленных рекомендаций, а чаще полагаются на интуицию. Тем не менее сейчас квазикристаллы уже не редкость, получены сотни различных сплавов такого типа.

Квазикристаллы заставили ученых задуматься о некоторых проблемах более общего характера. Симметрия пятого порядка, так удивившая кристаллографов, довольно часто встречается в живом мире. Она свойственна, например, планктонным организмам радиоляриям, разным иглокожим (морским звездам, морским ежам, офиурам), цветкам многих плодовых деревьев и кустарников (яблони, груши, вишни, малины, рябины, калины), а также некоторых по-

левых растений (колокольчика, незабудки). Все это приводит к мысли, что, возможно, квазикристаллы представляют собой переходную форму от застывшего неорганического мира к живым структурам.

* * *

Открытие квазикристаллов показало ученым, насколько неожиданные результаты можно получить там, где, казалось бы, все изучено. Благодаря этим необычным структурам химики, физики, кристаллографы и материаловеды начали новые направления исследований. Установлено, что квазикристаллы тверже классических кристаллов, у них необычные оптические свойства, низкая теплопроводность, их электрическое сопротивление с ростом температуры падает, в то время как у обычных металлов растет. Квазикристаллы уже используют в авиационной и автомобильной промышленности в виде легирующих добавок. Благодаря низкому поверхностному трению некоторых квазикристаллических сплавов им найдено применение в быту. Появились фирмы, рекламирующие кухонную посуду с квазикристаллическим покрытием, которое обладает почти такими же антипригарными свойствами, как тефлон.

Открытие Шехтмана давно ведет «собственную независи-

мую от него жизнь», а он сам уже более 10 лет не работает с квазикристаллами. Область его нынешних интересов — разработка новых магниевых сплавов для различных отраслей промышленности. Он занимается также созданием материалов для имплантатов, которые после введения в организм постепенно растворялись бы и замещались костной тканью.

До получения Нобелевской премии, в 1986—2008 гг., Шехтман стал обладателем 11 национальных и международных премий, среди которых Международная премия за новые материалы Американского физического общества (1988), премия Ротшильда за инженерные достижения (1990) и премия Королевской шведской академии наук (2000).

Шехтман, переживший недоверие и неприятие своих результатов, в речи на нобелевском банкете сказал: «Хороший ученый тот, кто скромно и готов принять новые неожиданные открытия». Вероятно, это было косвенное упоминание все о том же Лайнусе Полинге, авторитетное мнение которого в свое время считалось непреодолимым. Как бы то ни было, открытие Шехтмана — не только одно из самых необычных в химии, оно доказало, что существует то, чего, казалось, не может быть. ■

От местного климата к глобальному

А.В.Бялко

Всем известно, что такое погода. Днем солнце прогревает поверхность земли и атмосферу, ночью на несколько градусов холоднее. Если над нами циклон и облачно, то контраст температур невелик, если небо ясное, то ночное охлаждение увеличивается. Переход от антициклона к циклону происходит довольно резко, сопровождаясь усилением ветра и осадками.

Понятие «климат» более сложное, оно имеет два разных значения: одно относится к климату данного места, другое — к климату Земли в целом. Эти два понятия тесно связаны, что иногда приводит к подмене одного другим, однако между ними существует и несколько принципиальных различий. Поэтому прежде всего постараемся дать их четкие определения.

Локальные штрихи

Климатом местности называется набор погодных данных, усредненный по достаточно долгому временному промежутку. Он включает в себя сезонные вариации температуры и осадков, их характерные отклонения от сезонного хода, распределение ветров по силе и направлению, атмосферное давление и его вариации. Эти погодные параметры регулярно измеряются на метеостанциях и обрабатываются в метеоцентрах — в основном с целью предсказания погоды.



Алексей Владимирович Бялко, доктор физико-математических наук, ассоциированный сотрудник Института теоретической физики им.Л.Д.Ландау РАН, первый заместитель главного редактора журнала «Природа». Область научных интересов — теоретическая физика, науки о Земле.

Говорить о местном климате позволяет ежегодная повторяемость погоды. Вот пример, как меняется ежедневная среднесуточная температура в Москве (рис.1). Очевидно, что погодные вариации — это лишь отклонения от регулярного сезонного изменения температуры. Их усреднение в течение нескольких лет позволяет установить климатический ход температуры данной местности. Стандартный период, который метеорологи считают достаточным для такого усреднения погодных данных, составляет 30 лет.

От чего зависит местный климат? Прежде всего — от широты данного места, которая задает распределение инсоляции (освещенности солнцем) как в течение суток, так и в течение года. Вторая существенная зависимость — от высоты места над уровнем океана: с подъемом в горы температура достаточно быстро падает. Наконец, особенности климата зависят от географического положения места: удаленность его от океана влияет на количество осадков, а вблизи морского побережья и над самим океаном на климате сказывается характер близлежащих течений. Зависимость местного климата от широты и высоты места над уровнем моря демонстрируется на рис.2. На нем показаны вариации средней температуры в течение года в некоторых городах планеты, усредненные по многолетним метеорологическим данным.

Сравним климат Москвы и Лондона: они расположены примерно на одной широте, но размах годовых колебаний московской температуры примерно вдвое больше лондонской. Затем сопоставим Лондон и Каир: в течение всего года на севере Египта примерно на 10°C теплее, чем в Англии (их широты различаются на 12°). В Москве и Пекине разница температур тоже почти постоянна, но больше, потому что Пекин расположен на 16° южнее. Наконец, сравним Каир и Сидней: их температурные кривые подобны друг

© Бялко А.В., 2012

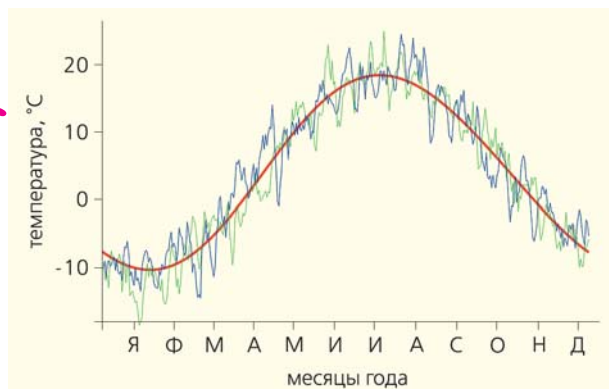


Рис.1. Погода и климат Москвы. Изменения среднесуточной температуры в течение двух лет (синие и зеленые тонкие линии) и климатическая зависимость температуры, полученная усреднением погодной по многолетним данным (красная кривая). Метки на горизонтальной оси соответствуют середине месяцев (указаны начальной буквой).

другу, но отличаются сдвигом на полгода. Каир находится в Северном полушарии, а Сидней — примерно на той же широте в Южном. Эти сопоставления показывают заметную разницу между континентальным климатом (Москва и Пекин) и морским климатом (Лондон, Каир, Сидней, Мурманск). На значительных высотах суши вдали от океана амплитуда перепадов температуры оказывается гораздо большей, чем у побережья, а запаздывание температурных максимумов и минимумов после солнцестояний — заметно меньшим. На рисунке следовало бы показать и примеры тропического климата, выбрав пару мест на экваторе, но их температурные зависимости выглядят малосодержательно. Так, в г.Горонтало (Индонезия) температура практически постоянна, весь год она равна $27 \pm 0.5^\circ$. А в Кито, столице Эквадора, она тоже всегда одинакова, но лежит в диапазоне $13.5 \pm 0.5^\circ$. Такая разница объясняется высотой мест: если Горонтало находится у берега океана на высоте 100 м, то Кито расположен у подножья Анд выше 2800 м.

Из рисунка также видно, что средняя температура меняется в течение года примерно как тригонометрическая функция — синус или косинус — с ее характерными параметрами: средним значением, амплитудой и фазой. При построении зависимостей рис.2 из среднемесячных температур, приведенных на сайте [1], были учтены и полугодовые возмущения, но их амплитуды существенно меньше годичных.

Очевидно, что сезонные колебания вызваны регулярно изменениями инсоляции. Расчеты солнечного освещения в зависимости от широты и времени года будут рассмотрены далее, после чего мы вернемся к обсуждению особенностей местного климата. А сейчас дадим общее определение глобального климата.

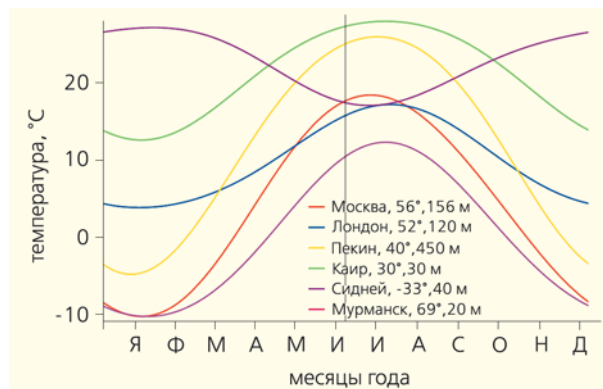


Рис.2. Местный климат некоторых городов: изменение средней температуры в течение года. Обратите внимание, что в Северном полушарии максимумы температуры наступают примерно через месяц после летнего солнцестояния (вертикальная прямая в центре), а минимумы — через месяц после зимнего солнцестояния.

Общая картина

В отличие от местного климата, содержащего много разной информации, климат планеты в целом можно охарактеризовать всего одной величиной — средней температурой земной поверхности. Остальные переменные или оказываются равными нулю при усреднении по всей планете, или же однозначно связаны с температурой. Так, например, глобальная роза ветров, очевидно, изотропна по направлениям, а средняя сила ветра зависит от средней температуры планеты. И количество осадков, естественно, равно количеству испаренной воды, тоже монотонно возрастает со средней температурой поверхности океана. Таким образом, понятие глобального климата кажется более простым. Процедура усреднения, впрочем, происходит не так просто: следует не только учитывать сравнительную площадь для разных широт, целесообразно приводить данные местности на суше к уровню моря, повышая их температуру (зависимость от высоты принимается линейной, но различной для континентального и морского климата).

Более того, вычисления глобальной температуры на первый взгляд могут показаться вообще бессмысленными. Ведь если климат каждого места, как каждый знает интуитивно (а метеорологи — научно обоснованно), почти не меняется, то уж тем более и результат усреднения по всей планете должен оказаться постоянным. Это утверждение, однако, неверно. Неверно не только потому, что в истории планеты были ледниковые периоды, когда температура по всей Земле опускалась ниже современной на $10-12^\circ$. Климат Земли может и фактически изменяться довольно быстро.

Отметим важнейшее отличие глобального климата от местного. Оно состоит в том, что для вы-

числения температур не надо усреднять многочисленные данные по местному климату, которые сами требуют не менее 30 лет для своего установления. Напротив, усреднение текущих (фактически ежемесячных) метеорологических данных по большой поверхности дает возможность заметить изменения глобального климата за существенно более короткие промежутки времени.

В основном глобальный климат претерпевает небольшие по амплитуде колебания с частотами от 5—6 лет, а также потепления и похолодания (незначительные по сравнению с ледниковыми периодами) продолжительностью от нескольких десятков лет до двух-трех столетий. Так, документально описан малый ледниковый период, продолжавшийся с XIV по XVI в., когда средняя температура Земли упала примерно на градус. В среднем всего градус, но в Европе было заметно холоднее, отчего и название «ледниковый» не кажется преувеличением. Совсем незначительное похолодание, менее 0.2°, прошло с 1940 по 1970 г. И только в последние десятилетия средняя температура Земли начала отчетливо расти, что сильно беспокоит научное сообщество и политиков. Но в этой статье мы не станем обсуждать современное потепление, будем говорить только о том почти стационарном климате, который наблюдался за период с 1880 по 1980 г.

Свет наш, Солнышко, скажи

Вычислим, как изменяется освещенность Земли в течение суток для каждого времени года, на каждой широте. Для этого надо рассчитать освещенность поверхности вращающегося шарика удаленным источником света. По сути, это задача не физическая, а геометрическая. Мы не будем придерживаться астрономической точности (излишней для климатических задач), в первом приближении будем считать орбиту Земли круговой, а Солнце — точечным источником.

Освещенность E , т.е. световая мощность, попадающая на единичную площадку, обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника. Кроме того, она пропорциональна косинусу угла α между направлением на источник света и нормалью (перпендикуляром) к площадке:

$$E(t) = s_0 \frac{\cos\alpha(t)}{r^2} > 0.$$

Освещенность, конечно, положительна, отрицательные значения косинуса соответствуют ночи, когда E равно нулю. Величина $s_0 = 1.36 \cdot 10^3$ Вт/м² — это солнечная постоянная, освещенность прямыми лучами площадки, находящейся на расстоянии одной астрономической единицы ($1.496 \cdot 10^8$ км) от Солнца. Фактическое расстояние до нашего светила $r(t)$, выраженное в астрономических единицах, в течение года меняется не очень значительно,

при современном эксцентриситете $e = 0.0167$ перепад расстояний составляет 3.3%. Значит, различие в освещенности Земли в целом между ее положениями в перигелии и афелии — почти 7%. А это уже величина заметная. Мы учтем ее, когда будем вычислять суммарные энергии, получаемые различными широтами за день.

Главный вклад в изменение освещенности в течение года, однако, вносит изменение угла наклона солнечных лучей. Угол между направлением на Солнце и вертикалью данного места сильно меняется и в течение дня, и день ото дня в течение года. Найдем в первую очередь годовую зависимость $\alpha(t)$.

Нам будет удобно считать, что все углы задачи изменяются в широком диапазоне. При этом формула для освещенности, конечно, оказывается неверной при отрицательных значениях косинуса, т.е. когда $\pi/2 < \alpha < 3\pi/2$. Легко понять: это означает, что в данном месте в данное время просто ночь. При этом освещенность равна нулю.

Широту места будем отсчитывать как обычно, от экватора, но для южных широт примем отрицательные значения ϕ . Географическая широта, таким образом, изменяется в пределах $-\pi/2 < \phi < \pi/2$. Долгота λ , как известно, отсчитывается от Гринвичского меридиана. Ее мы тоже не станем разделять на долготы «к западу от Гринвича» и «к востоку от Гринвича». Поступим проще. Будем считать, что долгота λ меняется в пределах от 0 до 2π , от 0° до 360°, а положительное направление выберем на восток. Тогда, например, $\lambda = 2\pi/3$ будет означать 120° восточной долготы, а $\lambda = 3\pi/2 - 90^\circ$ западной долготы.

Задачу о зависимости $\alpha(t)$ решим в два этапа. На первой стадии найдем, как в течение года меняется угол γ между осью вращения Земли и направлением к Солнцу. При этом земную орбиту приближенно будем считать окружностью, а поправки внесем по мере необходимости. Время t для простоты будем отсчитывать не от Нового года, а от момента зимнего солнцестояния, 22 декабря. Тогда угол, который прошла Земля по орбите от этого момента, равен $2\pi t/T$. Период T здесь равен тропическому году. Единичный вектор \mathbf{s} направления от Земли к Солнцу, как видно из рис.3, имеет компоненты $\mathbf{s} = (-\cos 2\pi t/T, -\sin 2\pi t/T, 0)$. Единичный вектор \mathbf{m} направления земной оси наклонен под углом $\epsilon = 23.5^\circ$ к оси z . Его проекции на оси координат равны $\mathbf{m} = (\sin \epsilon, 0, \cos \epsilon)$. Косинус угла между двумя единичными векторами равен их скалярному произведению, сумме произведений отдельных проекций:

$$\cos \gamma = (\mathbf{s} \cdot \mathbf{m}) = -\sin \epsilon \cos 2\pi t/T.$$

Эта простая формула дает зависимость $\gamma(t)$ с достаточной для нас пока точностью. Проверим результат в нескольких частных случаях.

1. $t = 0$; $\cos \gamma = -\sin \epsilon$; $\gamma = \epsilon + \pi/2 = 113.5^\circ$. Зимой земная ось действительно составляет тупой угол с направлением на Солнце.

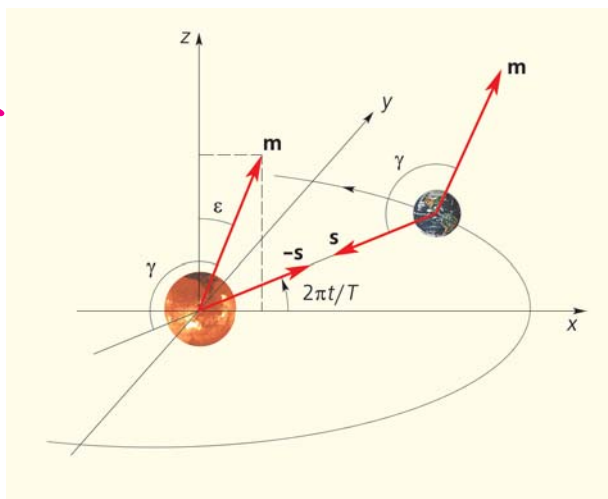


Рис.3. Геометрия вывода формулы для угла между земной осью и направлением на Солнце.

2. $t = T/4$ — весеннее равноденствие или $t = 3T/4$ — осеннее равноденствие. При этом $\cos \gamma = 0$, земная ось перпендикулярна солнечным лучам.

3. $t = T/2$ — летнее солнцестояние; $\cos \gamma = \sin \epsilon$, угол γ достигает минимального значения 66.5° .

Переходим ко второй стадии: посмотрим теперь, как изменяется наклон солнечных лучей в зависимости от времени суток и географических координат, считая, что зависимость от времени года дается углом $\gamma(t)$. Относительно Солнца Земля вращается с периодом, в среднем равным 24 часам. На самом деле из-за неравномерности скорости Земли на ее эллиптической орбите солнечные сутки только в среднем равны $P_0 = 86\,400$ с. Например, в январе, когда Земля проходит перигелий своей орбиты, солнечные сутки на 30 с больше, чем P_0 . Максимальные отклонения солнечного времени достигают 14 мин в феврале и 16 мин в другую сторону в октябре. Мы пренебрежем этими отклонениями: будем считать, что относительно Солнца Земля вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi/P_0$. Это приведет к небольшим ошибкам при вычислении моментов восхода и захода солнца, но практически не изменит длительности светового дня — ее отклонения от истинной не превысят полминуты. Именно эта величина и важна при вычислении суммарной инсоляции за сутки.

Местное время

Для полноты картины расскажем о часовых поясах планеты. Допустим, нас интересует угол падения солнечных лучей на широте ϕ , на Гринвичском меридиане ($\lambda = 0$) в момент суток t по Гринвичу. Это означает, что Земля повернулась на угол ωt относительно положения, которое она занимала в полночь по Гринвичскому времени. Местное

время суток и принято отсчитывать от полуночи. Полночь есть момент, отстоящий на 12 часов от момента наивысшего положения солнца над горизонтом, от полудня. Восход и заход солнца отстоят от полуночи практически на одинаковые промежутки времени.

Единичный вектор направления на Солнце \mathbf{s} составляет с осью z угол γ , его значение в любое время года нам уже известно. Поэтому проекции этого вектора на оси координат, выбранные так, как показано на рис.4, равны $(\sin \gamma, 0, \cos \gamma)$.

Единичный вектор нормали к точке земной поверхности с географическими координатами ϕ и $\lambda = 0$ в момент суток t имеет компоненты

$$\mathbf{n} = (-\cos \phi \cos \omega t, -\cos \phi \sin \omega t, \sin \phi).$$

Составляем скалярное произведение векторов \mathbf{s} и \mathbf{n} . Его значение равно косинусу интересующего нас угла падения солнечных лучей:

$$\cos \alpha = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{s}) = \cos \gamma \sin \phi - \sin \gamma \cos \phi \cos \omega t.$$

Проверим эту формулу в частных случаях.

1. В полночь $t = 0$, поэтому $\cos \alpha = -\sin(\gamma - \phi)$. Почти для всех широт косинус оказывается отрицательным. Это означает, что в полночь земная поверхность, как правило, не освещена. Однако для некоторых широт и в полночь возможно $\cos \alpha > 0$. Там полярный день. Граница полярного дня задается условием касательного падения солнечных лучей в полночь, т.е. $\alpha = 90^\circ$. Широта ϕ_1 , на которой наступает полярный день, определяется уравнением $\sin(\phi_1 - \gamma) = 0$. У этого уравнения есть два решения в доступной области изменения углов:

$$\phi_1 = \gamma \text{ и } \phi_1 = -\pi + \gamma.$$

Легко убедиться, что оба условия действительно дают верные граничные широты полярного

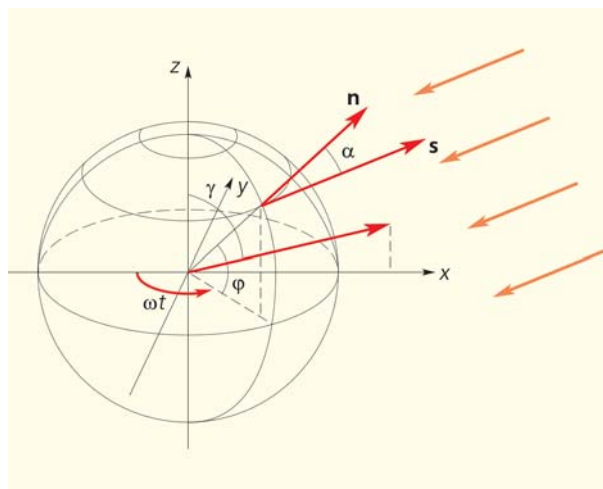


Рис.4. Геометрия вывода формулы для угла освещения Солнцем участка земной поверхности на широте ϕ во время суток t .

дня: первое — для Северного полушария летом, второе — для Южного полушария между осенним и весенним равноденствиями.

2. Посмотрим теперь, каков наклон солнечных лучей в полдень, когда $\omega t = \pi$. При этом $\cos \alpha = \sin(\gamma + \varphi)$. Решение уравнения $\alpha = \gamma + \varphi - \pi/2$ имеет достаточно общий вид — нас не смущают отрицательные значения α . Но если отрицательным становится $\cos \alpha$, то мы попадаем в ночь. Ночь в полдень есть полярная ночь. Ее граничная широта φ_2 тоже легко находится решением уравнения $\sin(\gamma + \varphi_2) = 0$:

$$\varphi_2 = -\gamma \text{ и } \varphi_2 = \pi - \gamma.$$

Первое выражение справедливо летом Южного полушария, второе — зимой Северного.

3. А как найти продолжительность дня и ночи на любой широте, в любое время года? Моменты восхода и захода солнца даются условием $\cos \alpha = 0$. Продолжительность ночи есть удвоенное время восхода, следовательно,

$$\Delta t_{\text{ночи}} = \frac{P_0}{\pi} \arccos(\operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} \gamma).$$

Если результат не превосходит длительности суток P_0 , то остаток $P_0 - \Delta t_{\text{ночи}}$ и есть долгота дня. В противном случае ночь — полярная. Если же под аргументом арккосинуса оказывается число, большее единицы, это означает, что мы попали в полярный день.

4. Посмотрим, что происходит в дни равноденствий, когда $\gamma = \pi/2$. Тогда

$$\cos \alpha = -\cos \varphi \cos \omega t.$$

Отсюда видно, что восход наступает в 6 часов утра, продолжительность дня составляет 12 часов на всех широтах. День равен ночи. Заход солнца — в 18 часов. Сравнивая вычисления по этой формуле с данными календарей, надо помнить не только об оговоренных неточностях, но и то, что в календарях восход и заход указывают не по центру солнечного диска, а по верхнему его краю. Это увеличивает продолжительность светового дня более чем на 2 минуты.

5. А теперь переместимся на экватор, положим $\varphi = 0$. Тогда

$$\cos \alpha = -\sin \gamma \cos \omega t.$$

Смотрите: продолжительность дня на экваторе ровно 12 часов независимо от времени года. В полдень в равноденствие на экваторе солнечные лучи падают вертикально.

Полезно проанализировать соотношение и в остальных интересных случаях: в моменты солнцестояний, на широтах тропиков, на широтах полярных кругов. Мы несколько отвлеклись от климатических задач, но, чтобы уж закончить с этой формулой, надо отметить, что она справедлива не только для нулевой долготы. Выбор начала отсчета на Земле конкретно на Гринвичском

меридиане с физической точки зрения ничем не обусловлен. Исторически именно в Великобритании измерение долготы по солнечному времени было поставлено на научную основу, а в Гринвиче помещалась главная обсерватория Англии.

Та же самая формула справедлива, конечно, и для любой другой долготы, если подставить в нее местное время. Оно, напомним, отсчитывается от момента, когда в данном месте астрономическая полночь. Ясно, что местное время $t_{\text{мест}}$ есть время по Гринвичу плюс время, нужное Земле для поворота на угол, равный долготе места:

$$t_{\text{мест}} = t + \frac{\lambda}{\omega} = t + \lambda \frac{1 \text{ час}}{15^\circ}.$$

Для удобства общения людей, живущих недалеко друг от друга, было введено поясное время. Это местное время, но округленное так, чтобы его отличие от Гринвичского составляло целое число часов. Вся поверхность Земли разделена на 24 часовых пояса. В основном, границы в океанах проходят по меридианам с долготами

$$\lambda_n = 7.5^\circ + n \cdot 15^\circ,$$

где n — целые числа. На суше границы часовых поясов проведены по границам государств, рекам, горным хребтам или малонаселенным местам.

Среднесуточная инсоляция

Вернемся к освещенности земли солнцем. Теперь мы знаем, как зависит угол падения солнечных лучей от времени года, времени суток и широты места. Поэтому можно подсчитать, как распределяется поток солнечной энергии по поверхности Земли в среднем за сутки. Изменение ее со временем года и диктует климатический ход смены сезонов.

Нам нужно усреднить формулу для косинуса угла падения по местному времени. Провести усреднение легко в случае полярного дня, тогда переменный второй член формулы в среднем дает нуль. Тогда поток, попадающий за сутки в область полярного дня, равен

$$Q = \frac{P_0 S_0}{r^2} \cos \gamma \sin \varphi.$$

Для произвольной широты вычисления становятся сложнее — следует помнить, что ночная освещенность равна нулю. Приведем результаты интегрирования в виде графиков: рис.5,а,б. При их построении учтено и небольшое изменение расстояния до Солнца в течение года. С достаточной для нас точностью

$$r(t) = 1 - e \cos \frac{(t - 12.2)}{365.25}.$$

Здесь время выражено в днях, отсчитанных от зимнего солнцестояния, так что аргумент косину-

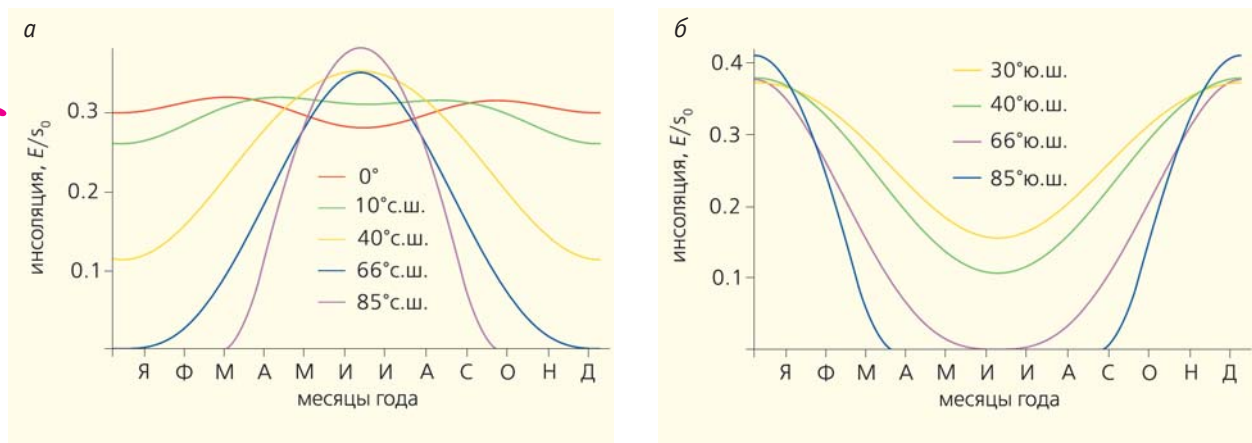


Рис.5. Изменение солнечной освещенности в течение года на разных широтах Северного (а) и Южного полушарий (б).

са минимален в момент прохождения афелия 4 января, отстоящего от него на 12 суток.

Обратите внимание, что максимумы и минимумы всех кривых освещенности приходятся на моменты солнцестояния (22 июня и 22 декабря), но на экваторе максимумы наступают в дни равноденствия (21 марта и 23 сентября). Если сравнить графики освещенности с температурными зависимостями рис.2, нетрудно заметить, что они качественно совпадают. Это естественное следствие того, что местный климат главным образом зависит как раз от сезонной зависимости освещенности на данной широте. Но все температурные зависимости примерно на месяц запаздывают по отношению к освещенности. Причина очевидна: требуется некоторое время, чтобы нагреть весной и охладить осенью грунт на суше или поверхность океана. Хотя измеряем мы температуру атмосферы, ее теплоемкость существенно меньше, чем у прогреваемого слоя поверхности.

Результат расчетов отчасти удивительный: посмотрите, как много энергии приходит летом к полярным областям: больше, чем к экватору, больше, чем к летнему тропику. Это не ошибка. Так происходит потому, что во время полярного дня продолжительность освещения — круглые сутки, а косинус угла падения не так уж и мал.

Заметьте еще, что июньская кривая на рис.б не симметрична декабрьской, а кривые равноденствий близки, но не совпадают. Происходит это вследствие эллиптичности земной орбиты: зимой (Северного полушария) мы ближе к Солнцу, чем летом. Напомним, что Земля сейчас проходит свой перигелий в начале января. Конечно, в среднем за год на участки, расположенные в северных широтах, приходится столько же тепла, сколько на такие же участки в южных, но по сезонам эта энергия распределена немного по-разному. Эта несимметричность вместе с неравномерным распределением суши и океана по полушариям приводит к существенным особенностям климата Земли.

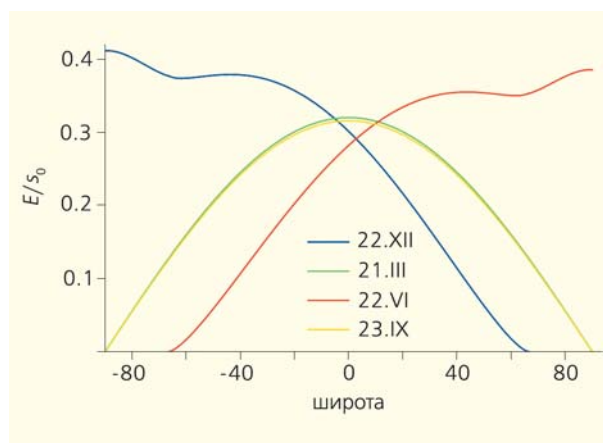


Рис.6. Изменение солнечной освещенности в зависимости от широты в моменты солнцестояний и равноденствий.

Еще один шаг к глобальному климату

Вычислим среднегодовую инсоляцию на заданной широте. Для климата существенно, однако, не то, сколько энергии приходит от солнца, так как заметная ее часть отражается от облаков, поверхности вод океана и льдов на суше. Гораздо важнее вычислить, сколько энергии достается поверхности планеты (рис.7). Доля отраженного света, называемая альбедо (A), различна на разных широтах.

Эта функция широты $A(\varphi)$ известна с не очень высокой точностью. Измерять ее непросто, поскольку облачность переменна в течение дня, а снежный покров — в течение года. Освещенность и альбедо вместе определяют зависимость средней за год температуры от широты (рис.8). Но не только они. В областях полярной ночи, которая длится почти полгода, стало бы очень холодно, если бы ветры и течения не переносили тепло от низких широт к полюсам.

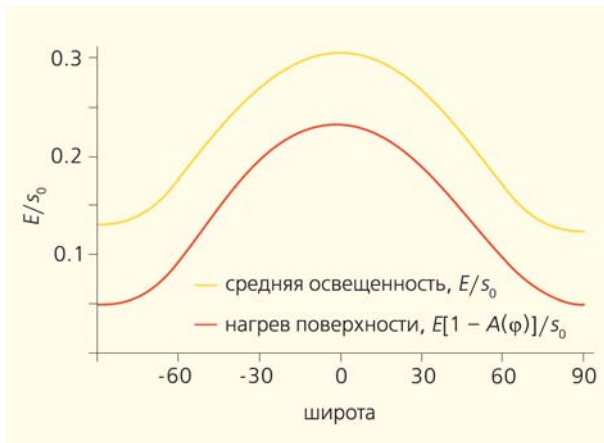


Рис.7. Средняя за год освещенность земли и потоки энергии, согревающие земную поверхность. Эта энергия равна падающей освещенности минус потери на прямое отражение, которые учитываются с помощью альbedo.

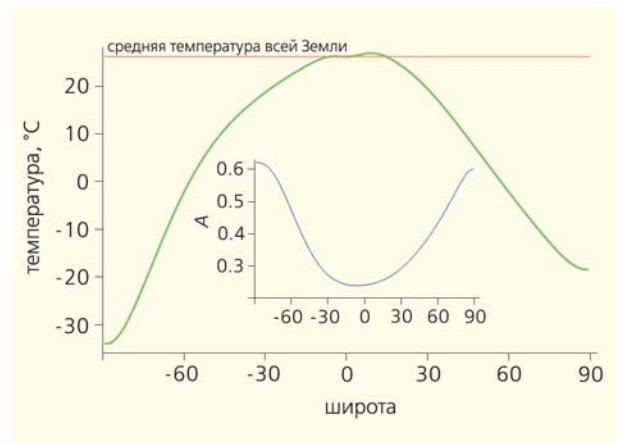


Рис.8. Зависимости от широты среднегодовой температуры (зеленая кривая) и альbedo (врезка, синяя кривая). Тонкой красной прямой показана температура, усредненная по всей планете с учетом вклада теплоотдачи поверхности.

Обратите внимание на то, что вблизи экватора Земли температура имеет неглубокий минимум — это кажется странным. Причина его появления тоже связана с массопереносом. Пассаты, ветры приэкваториальных широт, в обоих полушариях переносят тепло к более высоким широтам и порождают течения, поэтому для компенсации оттока глубинные океанские воды вблизи экватора поднимаются к поверхности, понижая температуру.

Еще более удивительным может показаться то, что средняя по всей планете температура

$$T_{av} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T(\phi) \cos\phi d\phi = 26.2^\circ\text{C}$$

оказалась близкой к температуре экватора. В научной литературе можно встретить утверждение, что средняя температура нашей планеты 14° или 15° . Это сильное заблуждение, примерно такая только средняя температура суши. Если же наивно суммировать температуры по всем широтам от -90 до 90° , не учитывая изменения площади поверхности, а затем разделить на 180, то получится совсем нелепая величина — около 7°C .

Этот факт, между прочим, полностью уничтожает гипотезу о том, что наша планета проходила стадию «снежного шара», когда весь океан был покрыт льдом. Чтобы такое произошло, среднюю температуру Земли пришлось бы понизить как минимум на 25° . Это, как все понимают, недостижимо. А вот на 14° кажется реальным. Так одно заблуждение породило следующее (вспоминаются слепцы Брейгеля).

А теперь посмотрим, как зависит среднегодовая температура на заданной широте от среднегодовой освещенности (рис.9). Получилась довольно сложная самопересекающаяся кривая. Впрочем, для тех широт, где не бывает полярной ночи, эта

кривая с точностью до 2° близка к прямой линии $T(s) = 204s - 20^\circ\text{C}$, где величиной $s = E(1 - A)/s_0$ обозначено безразмерное отношение потока энергии, достигающего земной поверхности, к солнечной постоянной.

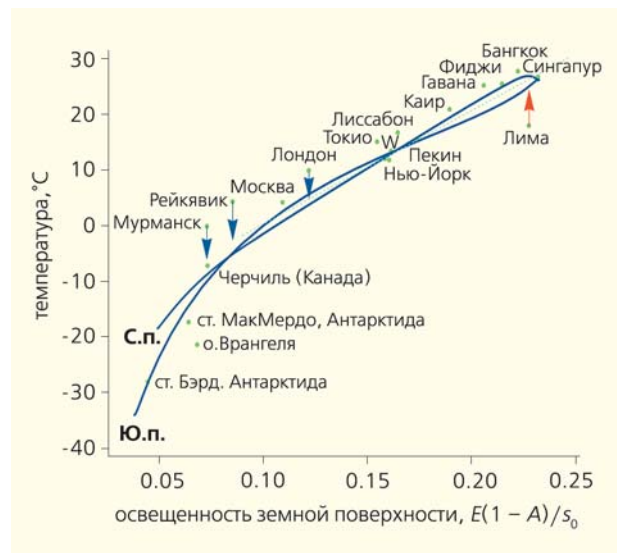


Рис.9. Среднегодовая температура в зависимости от среднегодовой освещенности земной поверхности. Зелеными точками показаны климатические параметры разных городов и научных станций (W — Веллингтон), они демонстрируют характерные отклонения от полученной зависимости. Красная стрелка приводит к уровню моря Лиму, расположенную на высоте 2800 м. Синие стрелки Мурманска, Рейкьявика, Лондона компенсируют согревающее влияние Гольфстрима. Голубая пунктирная прямая показывает, что зависимость температуры от освещенности почти линейна для тех широт, где нет полярной ночи и теплопереноса мощными течениями.

Отклонения же от этой прямой очень информативны, их анализ позволяет вычислить потоки энергии, которые ветры и течения переносят от тропических широт к полярным. Впервые такую возможность в конце 1960-х годов оценил советский климатолог М.И.Будыко (1920–2001). Американские ученые С.Уоррен и С.Шнайдер в 1979 г. подтвердили его теорию, используя более подробные климатические данные [2]. В этой выдающейся работе (изложение моей статьи во многом на ней и основано) предполагалось, что основную роль в теплопереносе в высокие широты играет атмосфера; сегодня же известно, что влияние океанских течений более существенно. Но сам подход к обобщению местных климатических данных на глобальном уровне оказался исключительно продуктивным. Можно сказать, что упомянутая статья стала предтечей современных климатических программ. К сожалению, прозрачность физического подхода при исследованиях климата на суперкомпьютерах заметно утрачивается.

Теплоперенос весьма существен для областей полярной ночи, без него температура опускалась бы там гораздо ниже. Не мал также отток тепла из тропиков. В области широт 30–40° тепловой баланс почти нулевой. Как уже отмечалось, сезонные изменения температуры запаздывают по сравнению с вариациями инсоляции. Сравнение этих зависимостей в областях нейтрального баланса можно использовать для оценки теплоемкости квадратного метра земной поверхности ($C_{\text{зд}}$). Для морского климата (Веллингтон, Новая Зеландия, -42°) она равна $C_{\text{зд}} = 3.3 \cdot 10^7$ Дж/(К·м²), что примерно эквивалентно теплоемкости столба воды высотой 8 м. Для континентального климата (Пекин, 40°) теплоемкость поверхности оказыва-

ется существенно меньшей: $C_{\text{зд}} = 1.59 \cdot 10^7$ Дж/(К·м²). Эта величина лишь в полтора раза больше теплоемкости квадратного метра земной атмосферы $1.04 \cdot 10^7$ Дж/(К·м²).

* * *

В 1984 г. вскоре после выхода моей книги «Наша планета — Земля» [3] я встречался со Стефеном Шнайдером, мы обсуждали с ним возможность удвоения концентрации CO₂ по отношению к доиндустриальному уровню. В то время я сомневался в реальности такого удвоения и оказался, наверное, неправ — с большой вероятностью концентрация, равная 560 ppm, будет достигнута уже к середине текущего столетия. Это событие может привести к тяжелым последствиям для всей жизни на планете, поскольку за этим последует повышение температуры на 4–5°C к концу столетия. Приемлемым (и уже неизбежным) повышением температуры к 2100 г. можно считать лишь 2°C.

Достичь этой цели очень непросто. В качестве первого шага надо запретить добычу угля. При равной полезной энергии, его сжигание выбрасывает в атмосферу в 2 раза больше диоксида углерода по сравнению с нефтью и в 3 раза больше по сравнению с газом [4]. Так можно достичь максимума содержания CO₂ в атмосфере в районе 450 ppm и выйти на уровень 350 ppm к концу столетия. Недавно в США образовалось общественное движение именно с таким лозунгом: посмотрите сайт 350.org. Это верное начинание. Климат Земли сегодня находится в кризисе, выход из кризиса требует напряжения и затрат не только экономических, но и моральных. Цель не будет достигнута без осознания необходимости срочных действий всем цивилизованным сообществом. ■

Литература

1. www.climate-charts.com/world-index
2. Warren S.G., Schneider S.H. Seasonal simulation as a test for uncertainties in the parameterizations of a Budyko-Sellers zonal climate model // J. Atmospheric Science. 1979. V.36. P.1377–1391.
3. Бялко А.В. Наша планета — Земля. М., 1983, 1989.
4. Бялко А.В. Релаксационная теория климата // УФН. 2012. Т.182(1). С.111–116.

Необычный юбилей в Музее–квартире академика И.П.Павлова

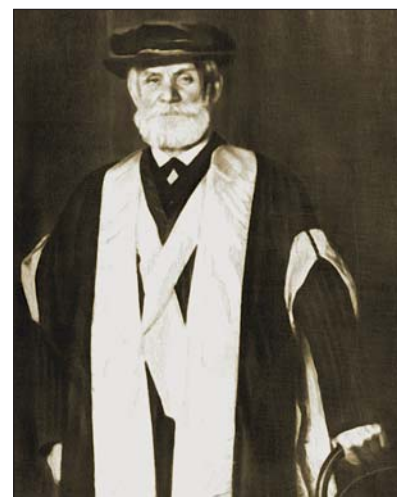
Э.А.Космачевская,
кандидат медицинских наук
Л.И.Громова

Мемориальный музей–квартира академика И.П.Павлова
Санкт–Петербург

В июле 2012 г. в Мемориальном музее–квартире академика И.П.Павлова в Санкт–Петербурге прошли торжественные мероприятия, в рамках которых отмечался и необычный юбилей — 100–летие одного из любопытных экспонатов, представленных в интерьере домашнего кабинета ученого, — игрушечной собачки. В экспозиции музея она с 1949 г., с момента его открытия в последней квартире Ивана Петровича, в академическом доме на 7–й линии Васильевского острова, а до того долгие годы хранилась в семье как шуточный, но дорогой сувенир — подарок английских студентов. Они преподнесли ученому игрушечную собачку 19 июля 1912 г. во время вручения ему диплома почетного доктора Кембриджского университета, «оснастив» ее фистульными трубками, чтобы показать, что хорошо знают работы Павлова по физиологии пищеварения. Таким образом, простая игрушка приобрела для Ивана Петровича статус своеобразного символа этого события, напоминая о церемонии награждения, которая проходила на завершающем этапе состоявшегося в Лондоне празднования 250–летия основания Лондонского королевского общества.

Павлов представлял на этом торжестве Императорскую Санкт–Петербургскую академию наук, Императорскую военно–медицинскую академию и Импе–

раторский институт экспериментальной медицины, принимая в нем участие как иностранный член Лондонского королевского общества. Надо сказать, что он состоял почетным, действительным или иностранным членом многих королевских научных обществ (так названы в Австралии, Великобритании, Дании, Канаде, Новой Зеландии, ЮАР и ряде других стран ведущие научные центры) и академий. В 1902 г. он стал членом Упсальского королевского научного общества, в том же году — Копенгагенского королевского общества, в 1904 г. — Королевского общества врачей в Вене, в 1905 г. — Лондонского коро–

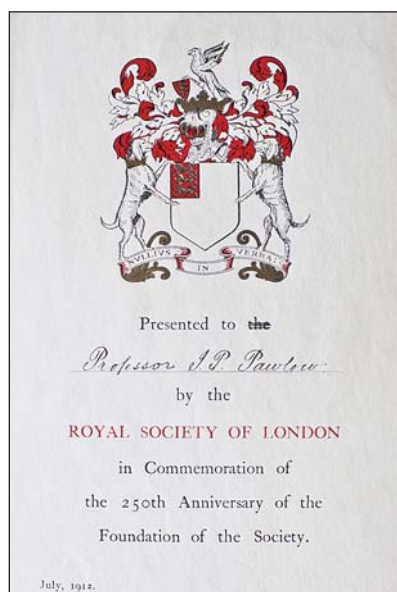


И.П.Павлов в мантии почетного доктора Кембриджского университета.



Домашний кабинет И.П. Павлова. На книжном шкафу — игрушечная собачка, подаренная ему студентами Кембриджского университета в 1912 г.

Фото Е.П.Вовенко



Именная открытка, вложенная в книгу «The signatures in the first Journal-book and the Charter-book of the Royal Society», подаренную И.П.Павлову в 1912 г. по случаю 250-летия Лондонского королевского общества. Из фондов Мемориального музея-квартиры И.П.Павлова.

Фото А.Н.Громова

левского медицинского и хирургического общества и Римской королевской медицинской академии. Особенно «урожайным» оказался 1907 г., когда Павлов был избран членом Линчевской королевской академии в Риме, Эдинбургского королевского общества, Нидерландской королевской академии наук, Лондонского королевского общества естественных наук. В 1911 г. он стал членом Бельгийской королевской академии наук, литературы и художеств; в 1917 г. — почетным членом Ирландской королевской академии; в 1922 г. — почетным членом Брюссельского королевского общества медицинских и естественных наук; в 1924 г. — почетным членом Философского королевского общества в Глазго; в 1927 г. — почетным членом Королевского медицинского колледжа в Лондоне; в 1929 г. — почетным членом Королевской медико-психологической ассоциации (Лондон); в 1930 г. —

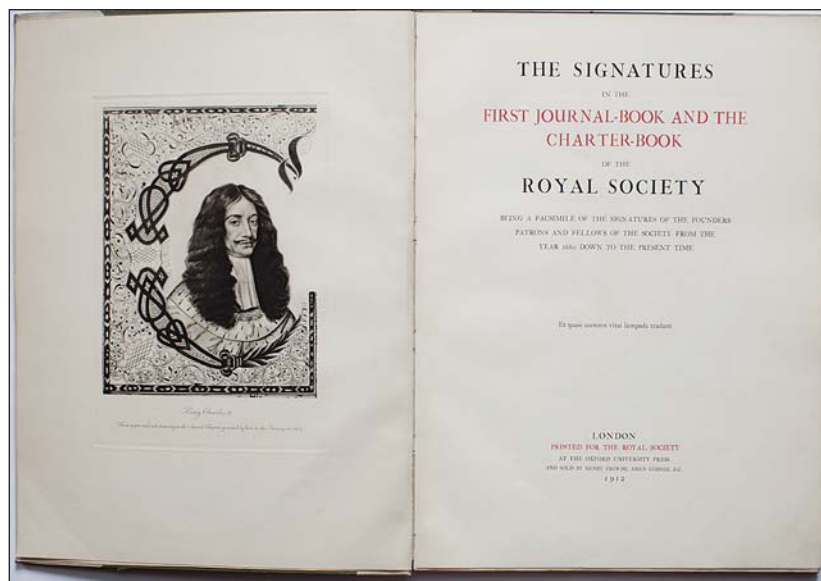
почетным членом Испанского королевского общества естествоиспытателей в Мадриде; в 1935 г. — членом-корреспондентом Лондонского королевского медицинского общества [1. С.301—304].

Уникальная книга учета

Старейшее из всех существующих в мире королевских научных обществ — Лондонское — ведет свое летоисчисление с середины XVII в. И в связи с его историей особый интерес представляет еще один экспонат, также отмечивший в 2012 г. свое столетие в Мемориальной квартире И.П.Павлова. Это хранящийся в его фондах экземпляр уникальной книги «The signatures in the first Journal-book and Charter-book of the Royal Society» [2], опубликованной по решению Совета и Президента Лондонского королевского общества весной 1912 г. издательством Оксфордского университета специально к предстоящему 250-летию юбилею общества. Книга была подарена Ивану Петровичу в память об участии в этом торжестве, и с тех

пор фолиант впечатляющих размеров (35×45 см) в твердом переплете с позолоченным отриском герба Лондонского королевского общества на лицевой стороне обложки хранился в доме Павлова.

Это юбилейное издание по существу — упрощенная по оформлению копия парадной «книги учета» членов Лондонского королевского общества, которая представляет собой большой том листов тонкого пергамента, переплетенных темно-красным бархатом с золотыми пряжками и углами. Лицевая сторона его переплета украшена золотой пластиной с выгравированным на ней гербом общества, обратная — золотой пластиной с изображением орла. Возникшее еще в дни первых собраний общества правило проставления подписей новых его членов под так называемым «Обязательством» было «узаконено» 9 января 1665 г. автографом короля Карла II, поставленным тогда в описанной выше книге с его собственноручной припиской — «*Founded*». В юбилейном издании, как и в оригинале, фронтиспис книги украшен репродукцией порт-



Титульный лист юбилейной книги «The signatures in the first Journal-book and the Charter-book of the Royal Society» и портрет короля Карла II на развороте.

Фото А.Н.Громова

рета («pen-a-ink drawing» — рисунок пером) короля Карла II, подаренного обществу им самим в 1663 г., и на титульном листе приведен текст латинской пословицы «*Et quasi cursores vitae lampada tradunt*», что можно перевести как «Передающие факел жизни следующим поколениям».

Как и подаренная студентами собачка, этот юбилейный фолиант — своеобразное связующее звено между научной судьбой великого физиолога и историей Лондонского королевского общества. Однако, если игрушка всего лишь трогательный сувенир, то книга — еще и ценный источник интереснейшей информации об одном из первых в мире организованном научном сообществе.

В предисловии, написанном к этому уникальному изданию известным английским геологом сэром Арчибалдом Гейки, президентом Лондонского королевского общества, в период подготовки и проведения его 250-летия (1908—1913), удалось найти некоторые интересные и малоизвестные подробности из истории общества, в особенности периодов его организации и ранних этапов существования.

Из истории Лондонского королевского общества

Базой будущего общества стала сформировавшаяся к середине XVII в. в Оксфорде научная коллегия, в которую входили многие видные английские ученые того времени (Р.Бойль, Р.Гук и др.). Их девизом стал лозунг «*Nullius in verba*» (что означает «Ничего со слов», следовательно — все из опыта), конкретно отражавший разрастающийся тогда в общественном сознании прогрессивный настрой на развитие эмпирического, опытного естествознания. Немалую роль в зарождении такого настроения сыграл Френсис Бэкон, знаменитый английский философ,

исполнявший в те годы обязанности лорда-канцлера. Считая поддержку наук и ремесел одним из важнейших средств упрочения и развития государства, он активно призывал к экспериментальному изучению природы. По его инициативе группа объединившихся под этим прогрессивным призывом ученых стала периодически собираться в Лондоне для обсуждения возможных путей пропаганды и реализации экспериментальных подходов к решению научных проблем. Современники назвали эту группу «*Invisible College*» («Невидимый колледж», или, как иногда переводят, «Невидимая коллегия») — скорее всего потому, что входившие в ее состав ученые не имели постоянного места для заседаний и собирались то в Оксфорде, то в Лондоне.

Одним из наиболее активных участников группы был Роберт Бойль. Занимаясь в начале своей научной деятельности философскими и религиозными вопросами, он под влиянием прогрессивных веяний эпохи перешел с 1654 г. к экспериментальным исследованиям в области химии и физики. Именно как «английский химик и физик, теоретик и экспериментатор» он и вошел во многие справочники по истории науки [3. С.261]. Придя к убеждению, что только изучение «опытных наук» приносит реальную пользу обществу, он и своих друзей-ученых настойчиво убеждал перейти на этот путь и принять участие в работе «Невидимого колледжа».

28 ноября 1660 г. в Лондоне состоялось общее собрание участников «Невидимого колледжа», на котором входившие в него ученые решили сформировать на его основе независимую и самостоятельную, самоуправляющуюся частную научную организацию со своими правилами и режимом работы. По существу это и было первое заседание будущего Королевского общества. Уже через несколько

дней его участники составили и утвердили текст «Обязательства» («*The Obligation of the Fellows of the Royal Society*») — своеобразной клятвы для каждого, кто хотел бы вступить в ряды созданного ими научного союза. В «Обязательстве» говорилось, что вступивший должен всеми возможными путями способствовать развитию «*experimental learning*», т.е. использованию экспериментальных подходов в научных исследованиях, обязан присутствовать на еженедельных собраниях общества (за исключением крайне уважительных причин) и платить еженедельный взнос, составлявший тогда один шиллинг. Каждый был волен покинуть общество по собственному желанию, обратившись предварительно в собрание с соответствующей запиской. Организаторы и первые члены созданного тогда в Лондоне научного союза поставили свои подписи под «Обязательством» 5 декабря 1660 г. И эту дату вполне обоснованно можно считать фактической датой снования Лондонского королевского общества.

Однако формально летоисчисление ведется с 15 июля 1662 г., когда король Карл II подписал хартию об учреждении этого научного сообщества под своим патронатом и таким образом узаконил его существование под официальным названием — Лондонское королевское общество по развитию знаний о природе. Уже в 1665 г. общество стало издавать свой журнал — «*The Philosophical Transactions of the Royal Society*» («Философские труды королевского общества», или «Философские записки»). Сегодня это один из старейших научных журналов мира, хотя первый его номер представлял собой всего лишь тетрадку в 16 листов. С момента основания был принят и герб общества — два дога держат щит с эмблемой Стюартов, и под ним девиз: «*Nullius in Verba*». С тех пор вот уже 350 лет его изображение,

тисненное на титульных листах, украшает научные издания Лондонского королевского общества. Его можно увидеть на опубликованных обществом трудах М.Фарадея, Дж.К.Максвелла, Э.Резерфорда и других выдающихся ученых мира.

Президентами Лондонского королевского общества были в разные годы многие выдающиеся английские ученые — Кристофер Рен, Исаак Ньютон, Томас Генри Гексли, Эрнест Резерфорд, Джозеф Листер и др. В отношении Роберта Бойля в некоторых изданиях, в особенности отечественных, встречаются неверные сведения. В частности, в «Биографическом словаре деятелей естествознания и техники» [4. С.88] указано, что с 1680 по 1691 г. очередным президентом общества был Р.Бойль. На самом же деле он отклонил это предложение, потому что, по его мнению, требуемая при этом присяга нарушила бы его религиозные принципы. Возможно, по религиозным же убеждениям Бойль всю жизнь прожил холостым. В свое время ему даже предлагали принять

духовный сан, но в таком случае, считал он, ему было бы еще тяжелее найти компромисс между религией и наукой. Вероятно, по той же причине не стал он и первым президентом общества, хотя это было бы заслуженным логическим завершением его активного участия в организации Лондонского королевского общества. Первым президентом был с 1662 по 1677 г. один из его организаторов — Уильям Висконт Броункер — выдающийся английский математик, государственный деятель и «деловой человек». Именно так охарактеризован он в предисловии к юбилейной книге.

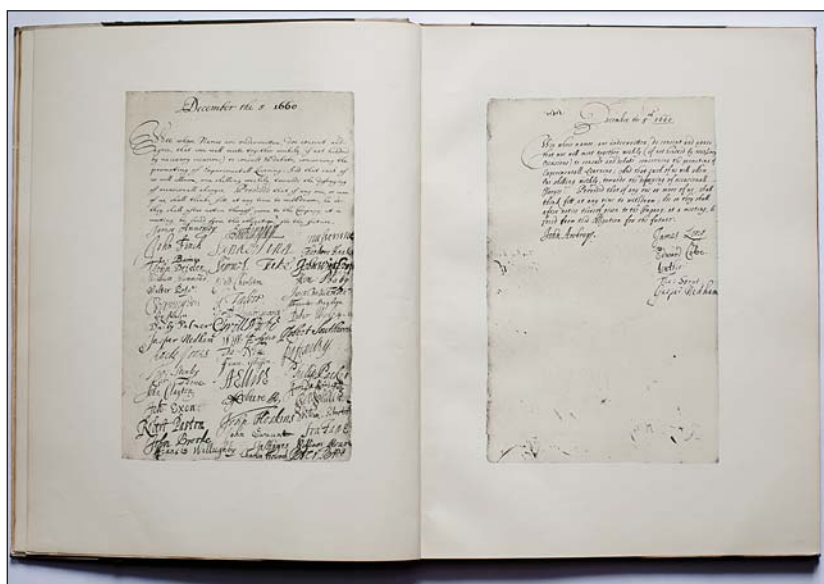
Структура книги учета

Опубликованное к торжествам 1912 г. издание [2] состоит из трех частей. Первые два его раздела точно соответствуют оригиналу по содержанию — в них представлено полное собрание факсимильных репродукций подписей основателей, патронов и членов Лондонского королевского общества начиная

с 1660 до 1912 г. включительно, причем первая часть, составляющая всего три листа, особенно интересна. Здесь приведены подписи, поставленные 5 декабря 1660 г., т.е. еще за полтора года до официального утверждения общества. Это сохранившиеся для истории науки автографы как раз тех горячих, ревностных сторонников прогрессивной идеи пропаганды и поддержки экспериментального направления в исследованиях, которым Лондонское королевское научное общество обязано своим существованием.

Во второй части книги даны автографы патронов — первых членов королевского научного общества, начиная с подписи короля Карла II, и всех вступавших в его ряды в дальнейшем. Все страницы и первой, и второй части книги, как и в первоисточнике, начинаются с текста «Обязательства», под которым и должен был подписываться каждый новый член общества.

В третьей части книги представлен материал, исключительно важный по своей значимости для истории науки. В этом наиболее объемном разделе в алфавитном порядке дана идентификация, расшифровка всех многочисленных автографов, приведенных в двух первых частях, с указанием точной даты вступления в ряды членов общества каждой из перечисленных персон. Безусловно, поиск и систематизирование такой информации стали самой трудоемкой и ответственной частью работы при подготовке материала к изданию. Подписи Павлова, к сожалению, в книге не оказалось. Такая участь постигла и некоторых других членов Лондонского королевского общества, в особенности иностранных — видимо, из-за того что их приезд в Лондон не всегда совпадал с проведением общего собрания общества, на котором и проходила торжественная процедура увековечивания факсимиле вновь избранного его члена под текстом клятвы.



Страницы книги «The signatures in the first Journal-book and the Charter-book of the Royal Society» с подписями членов Лондонского королевского общества, проставленными 5 декабря 1660 г. Из фондов Мемориального музея-квартиры И.П.Павлова.

Фото А.Н.Громова (публикуется впервые)

Награды Лондонского королевского общества Павлову

Интересно, что в представленных в книге списках, в особенности тех, которые соответствуют ранним этапам существования общества, имена ученых не занимают главенствующего места. Их намного превосходят по количеству имена персон, имевших влияние при королевском дворе, людей, активно участвовавших тогда в социальной жизни, епископов, других служителей церкви, поэтов, литераторов, просто состоятельных образованных людей. Так, из 115 первых подписей только 21 принадлежит настоящим профессиональным исследователям. Это и понятно, так как существование общества как независимого, негосударственного, научного учреждения обеспечивалось лишь частными пожертвованиями и взносами. Любые денежные вложения в его пользу — дотации, завещания и т.п. — приветствовались в течение всего периода существования этой организации.

Например, на деньги сэра Годфри Копли, богатого землевладельца, ценителя науки, члена общества с 1691 г., завещавшего ему солидную часть своего капитала для присуждения награды за выдающиеся открытия в науке, в 1731 г. была учреждена первая премия Лондонского королевского общества, составлявшая изначально 100 фунтов. В 1736 г. по поручению Совета Королевского общества на эти средства была отчеканена золотая медаль, заменившая собой премию. Медаль выполнена в традиционном для искусства XVIII в. стиле — и аверс с изображением сидящей богини Афины, и реверс с изображением герба Королевского общества насыщены аллегориями и многочисленными атрибутами науки и искусства. Отличающаяся торжественной пышностью, медаль сама по себе представляет памятник своего времени. В 1737 г. была уч-



Медаль Лондонского королевского общества «В честь Годфри Копли», полученная И.П.Павловым в 1915 г.

реждена награда с официальным названием «Медаль Лондонского королевского общества «В честь Годфри Копли»» (Медаль Копли, Коплеевская медаль), с тех пор она вручается ежегодно и по сей день представляет собой одну из высших научных наград Великобритании.

Павлов был награжден ею в 1915 г. за особые научные успехи в области физиологии. 11 ноября он получил извещение Лондонского королевского общества о присуждении ему Коплеевской медали и приглашение присутствовать 30 ноября на ежегодном заседании общества для ее вручения. К сожалению, Иван Петрович на вручении награды не был, но сэр Уильям Крукс, президент Королевского общества в 1913—1915 гг., дал на этом заседании развернутую характеристику и самому лауреату, и его творчеству (речь была опубликована в «Science» в 1916 г.). Поскольку награда именная, то на лицевой стороне Павловской медали внизу, в обресе, подпись: IVAN P. PAVLOV For. Mem. R. S. 30 Nov. 1915 [ИВАН П. ПАВЛОВ — Иностраннный член Королевского общества. 30 ноября 1915 г.]. С 1969 г. медаль хранится в отделе нумизматики Государственного музея изобразительных искусств им.А.С.Пушкина в Москве [5. С.429].

Павлов получил также чек от фонда Медали Копли, выписан-

ный 15 декабря 1915 г. на сумму в 35 фунтов стерлингов 15 шиллингов и 5 пенсов, причитающийся коплеевскому медалисту. Хорошо знакомый с Иваном Петровичем известный английский физиолог профессор Уильям Бейлисс писал ему 27 января 1916 г.: «Поздравляю Вас с присуждением Вам медали Коплея и посылаю Вам официальное сообщение. Мне доставило огромнейшую радость вписать в эту бумагу Ваше имя. Быть может, Вы знаете, что эта медаль является высочайшей честью, которую оказало Вам наше Королевское общество» [6. С.264].

Еще одна престижная награда Лондонского королевского общества — почетное приглашение видных ученых из разных стран мира для прочтения специальной лекции по своему направлению науки — также была учреждена на завещанный обществу капитал. Завещал эти деньги Уильям Крун, врач по профессии, современник Галилео Галилея, бывший наряду с Бойлем, Гуком и др. одним из активных инициаторов создания научного общества в Лондоне. Чтение лекции, названной в его честь Крунианской, в Лондонском королевском обществе проводится ежегодно с момента ее учреждения в начале XVIII в. Приглашение для ее прочтения считается очень почетным

и в наше время. За годы существования этой престижной процедуры для чтения Крунианской лекции приглашались известные ученые из разных стран мира — М.Фарадей, Т.Гексли, Р.фон Вирхов, Г.Гельмгольц, К.А.Тимирязев и др.

Павлов читал Крунианскую лекцию на тему «Certain problems in physiology of cerebral hemispheres» («Некоторые проблемы в физиологии больших полушарий мозга») 10 мая 1928 г. Об этом событии рассказывал позже в своих воспоминаниях английский физиолог профессор Джозеф Баркрофт, отмечая и сосредоточенность Ивана Петровича, и его чувство юмора. *«Чтение лекции проходило в Кембриджском университете в переполненной студентами аудитории... — писал он, — Было установлено, что Павлов будет говорить по-русски полминуты, а затем д-р Г.В.Анреп [один из ближайших учеников Павлова] переведет сказанное. После примерно трех таких циклов Павлов так увлекся своей темой, что совершенно позабыл о том, что аудитория его не понимает. Он продолжал говорить, вероятно, минут пять, затем опомнился. Он свел руки вместе и расхохотался, вся аудитория вслед за ним покатывалась со смеху. Павлов полностью завладел студенческими сердцами»* [7. С.269]. В том же году Крунианская лекция Павлова была опубликована на английском языке [8], на русском языке ее текст помещен в полное собрание сочинений Павлова [9].

Приглашения на торжества

Приглашения для участия в торжествах, посвященных празднованию 250-летия основания Лондонского королевского общества, проведение которых было намечено с 16 по 18 июля 1912 г., рассылались с самого начала года ученым разных стран мира. Павлов получил

письмо с таким приглашением 8 января 1912 г., и уже 30 января неперенный секретарь Императорской Санкт-Петербургской академии наук С.Ф.Ольденбург известил президента Лондонского королевского общества, что академики И.П.Павлов и О.А.Баклунд избраны делегатами на предстоящие торжества от Академии наук. Баклунд — директор Пулковской астрономической обсерватории, состоял иностранным членом Лондонского королевского астрономического общества и, кроме того, был президентом организованного в 1911 г. Санкт-Петербургского бюро Международной ассоциации академий (Association Internationale des Academies). Такая ассоциация была основана в 1899 г., и в число ее учредителей входили и Лондонское королевское общество, и Императорская Санкт-Петербургская академия наук [10. С.445—447].

В начале апреля того же 1912 года в Императорский институт экспериментальной медицины поступило приглашение и от медицинского факультета Дублинского университета (Ирландия) на празднование 200-летия его основания, намеченного также на июль. На состоявшемся 19 апреля заседании Совета ИИЭМ руководство просило Павлова быть представителем института на юбилей и преподнести приветственный адрес. Иван Петрович дал согласие на это предложение. Через несколько дней (21 апреля) он обратился с ходатайством в Конференцию Императорской военно-медицинской академии о командировании его в каникулярное время на юбилей Лондонского королевского общества и Дублинского университета. Его ходатайство было поддержано и одобрено Конференцией.

10 июня 1912 г. Кембриджский университет прислал на его имя запрос, согласен ли он принять степень доктора наук университета, на что Иван Петрович ответил утвердительно. Награждение дипломом *honoris*

causa Кембриджского университета некоторых иностранных ученых входило в программу намеченных в Лондоне торжеств. В конце июня Павлов с женой Серафимой Васильевной отправился в Англию и 3 июля уже принимал участие в праздничных мероприятиях.

Вернемся к нашей собачке

В отчете о командировке, представленном Павловым по возвращении из Великобритании, он писал: *«Весной 1912 г. я испрашивал командировку, чтобы присутствовать в конце июня на 200-летию Дублинского университета, а в начале июля на 250-летнем юбилее Лондонского королевского общества. Туда и сюда я получил личное приглашение. На лондонский юбилей я был приглашен как иностранный член этого общества. К сожалению, вследствие болезни (катаральной пневмонии) на первый юбилей я не поехал и мог поехать только на второй, представляющий особый интерес, так как история Лондонского королевского общества есть почти целая история английского естествознания и медицины. Все великие естествоиспытатели и медики Великобритании были членами, а также председателями этого общества. Юбилей был очень поучителен во многих отношениях и отпразднован торжественно, до приема гостей и делегатов общества королем и королевой включительно. По заключении празднеств в Лондоне гости и делегаты были разделены на две группы для поездки в Кембридж и Оксфорд, университетские колледжи, которые и есть истинная колыбель английской науки. После церемонии присуждения некоторым из нас почетных дипломов мы посетили особенно знаменитые по их питомцам (Ньютон, Гарвей, Дарвин и многие другие) колледжи»* [11. С.206—207].



Зал Сената Кембриджского университета, где И.П.Павлову был вручен диплом доктора *honoris causa*.

Сопровождавшая Павлова в этой командировке жена описывает в своих мемуарах [12] проведенные тогда в Великобритании дни, участие в празднествах, различных банкетах и приемах. Вспоминает она и церемонию награждения Павлова дипломом на звание почетного доктора Кембриджского университета. Церемония проходила в парадном сенатском зале, где на хорах стояли студенты-физиологи. Когда Иван Петрович возвращался к своему месту после получения диплома, пишет Серафима Васильевна, «...на хорах поднялся шум, и мы услышали: "Павлов, Павлов!". На веревочке с хор спустилась игрушечная собачка с привязанными к животу фистульными трубками, размещенными совершенно так, как делал это Иван Петрович при своих операциях» [12. С.250]. На вечернем приеме в тот же день Павлов, беседа со своим английским коллегой физиологом А.Хиллом, удивлялся, что студенты так хорошо знакомы с его исследованиями. Однако ничего удивительного в этом не было — к тому времени вся мировая научная общественность знала о работах великого физиолога в области физиологии пищеварения,

благодаря которым он стал в 1904 г. первым русским лауреатом Нобелевской премии.

Монография Павлова «Лекции о работе главных пищеварительных желез», обобщившая результаты 15-летнего периода исследований, проведенных в его лабораториях, в 1897 г. была опубликована в России. Уже в начале 1898 г. книга была издана на немецком языке, в 1901 г. — на французском, в 1902 г. — в Лондоне на английском, там же переиздана в 1910 г. Благодаря этому труду Павлова пищеварение в течение десятилетий оставалось самой востребованной темой физиологических исследований в Европе и Америке.

Профессор Дж.Баркрофт писал в своих воспоминаниях, что «Лекции о пищеварении» Павлова произвели глубокое впечатление на представителей медицинских и биологических наук и в Англии, сделав его имя в стране чрезвычайно популярным [7. С.267]. К этому времени Иван Петрович со многими английскими учеными, в том числе членами Королевского общества, был знаком либо по переписке, либо лично и рад был повидаться с ними, обменяться мнениями в дни лондонских торжеств.



Серафима Васильевна и Иван Петрович Павловы. В руках у Павлова игрушечная собачка, подаренная студентами Кембриджского университета. Кембридж, 1912 г.



Игрушечная собачка, подаренная И.П.Павлову студентами Кембриджского университета. Мемориальный музей-квартира И.П.Павлова.

Фото Е.П.Вовенко

Встречи и общение

С участвовавшим в юбилее известным английским физиком и химиком У.Рамзаем, членом Лондонского королевского общества с 1888 г., Иван Петрович был знаком с ноября 1904 г. Тогда в Стокгольме, одновременно с Павловым, Рамзай (совместно с Дж.Рэлеем) получил Нобелевскую премию по химии «В знак признания открытия в атмосфере различных инертных газов и определения их места в Периодической системе». В 1912 г. он писал Ивану Петровичу, что, не-



И.П.Павлов (в центре) и А.Ф.Самойлов (второй слева) после приема у английского короля Георга V. Лондон, 1912 г.

смотря на прошедшие со времени знакомства годы, сохраняет воспоминания «об этих прекрасных днях». Правда, одна из их встреч в дни юбилейных мероприятий, произошедшая во время торжественной службы в Вестминстерском аббатстве, сопровождалась для Павлова некоторым конфузом. *«По случаю юбилея Общества, — вспоминала в своих мемуарах его жена, — была специальная церковная служба. <...> Во время службы Иван Петрович сидел рядом с известным химиком Рамзаем. Не понимая языка службы, он до тех пор обращался с разговором к Рамзаю, пока не услышал от него строгого замечания: “В церкви молятся, а не разговаривают!”»* [12. С.249—250]. Рамзай был глубоко религиозным человеком, и впоследствии Павлов неоднократно приводил его в пример, отвечая на вопрос, совместимы ли наука и вера, могут ли крупные ученые верить в Бога. В 1923 г. он писал священнику Е.М.Кондратьеву: *«В каком неловком положении я оказался, когда... стоя рядом со знаменитым химиком Рамзаем во время службы в Вестминстерском аббатстве по случаю*

250-летнего юбилея Лондонского королевского общества, вздумал развлекать его какими-то посторонними замечаниями, а он так молитвенно был настроен» [13].

Встречи же с Ч.Шеррингтоном привели к тому, что английский физиолог всего месяц спустя, в августе 1912 г., приехал в Россию, в Петербург, с женой, сыном и братом. Скорее всего, сам занимавшийся исследованиями по физиологии центральной нервной системы (им, в частности, введен термин «синапс», определена его роль во взаимоотношениях нервных клеток и т.д.), он был крайне заинтересован рассказами Ивана Петровича о его новых работах по физиологии высшей нервной деятельности с использованием созданной им условно-рефлекторной методики, которые под его руководством разворачивались тогда полным ходом. Шеррингтон посетил лаборатории Ивана Петровича и в Институте экспериментальной медицины, и в Императорской военно-медицинской академии, присутствовал на опытах его ученицы М.Н.Ерофеевой, выполнявших ее к докторской диссертации

«Электрическое раздражение кожи собаки как условный возбудитель работы слюнных желез».

Позже, 27 мая 1918 г., в своей публичной лекции «Основа культуры животных и человека» в Концертном зале Тенишевского училища Иван Петрович вспоминал, что Шеррингтон по поводу показанных ему опытов сказал: *«Теперь я понял, почему христианские мученики могли переносить мучения. Очевидно, известным сосредоточением мысли можно достигнуть того, что боль не будет существовать».* *«Это его слова, и это правда... — говорил Павлов, — христиане выдерживали страшные мучения, улыбаясь. Следовательно, необходимо допустить, что огромное нравственное возбуждение затормозило, уничтожило чувство боли»* [14]. Во время этого своего визита в Петербург Шеррингтон со своими родными побывал и у Павловых дома, в их квартире на Введенской улице. Спустя год, 9 октября 1913 г., он писал Ивану Петровичу: *«Помним, как мы ребячились и веселились, обедая у Вас дома с Вами, госпожой Павловой и Вашей семьей; это был вечер, о котором мы будем всегда вспоминать с удовольствием»* [6. С.127—128].

Торжественное празднование 250-летия Лондонского королевского общества проходило с особенным размахом. Научные выступления чередовались с разного рода светскими мероприятиями — приемами, банкетами и т.п. По словам одной из светских дам, приведенным в воспоминаниях С.В.Павловой [12], Иван Петрович «был главной приманкой» на многих из этих мероприятий. Его публичные выступления всегда заканчивались бурными овациями. В заключение состоялся королевский прием с обедом в Виндзорском дворце, в котором Павловы принимали участие.

Сохранилось несколько фотографий, запечатлевших Павлова среди группы других уче-

ных после торжественного приема у короля. На многих кадрах рядом с ним известный физиолог А.Ф.Самойлов, с которым Иван Петрович был давно и хорошо знаком. Самойлов начинал свою научную карьеру под руководством Павлова, работая практикантом в физиологическом отделе ИИЭМ в 1892—1894 гг. В 1931 г. в статье, посвященной памяти рано ушедшего из жизни Александра Филипповича, Иван Петрович писал, что уже тогда ему «понравились спокойствие, обдуманность и точность» в работе молодого практиканта и что он «очень рассчитывал долго пользоваться сотрудничеством Александра Филипповича». «Но он скоро, — вспоминал Павлов, — к моему большому сожалению, перебрался в Москву, в лабораторию Ивана Михайловича Сеченова... Думаю, что главной

причиной этого был склад его головы... У меня преобладали физиолого-хирургические операции... Александра Филипповича, очевидно, влекло к инструментальной, физической физиологии» [15. С.127—128]. К 1912 г. Самойлов уже был профессором Казанского университета, в котором с 1903 г. и до своей кончины заведовал кафедрой физиологии, зоологии и сравнительной анатомии физико-математического факультета.

* * *

Награждение Павлова дипломом почетного доктора Кембриджского университета, состоявшееся в завершение торжеств по случаю 250-летия Лондонского королевского научного общества, явилось повторным после Нобелевской награды (1904) всемирным признанием его на-

учных заслуг в области физиологии. При рассмотрении имен приглашенных на юбилей ученых из разных стран мира — представителей различных направлений науки — с целью выбора из них кандидатов для награждения их дипломом *honoris causa* Кембриджского университета И.П.Павлов был избран самым достойным представителем по разряду физиологических наук. Вековой юбилей присвоения Ивану Петровичу Павлову этого почетного звания и стал главным событием, отмечавшимся 19 июля 2012 г. в его мемориальной квартире, украшенной своеобразными малоизвестными, но неотъемлемыми его составляющими — 100-летием игрушечной собачки и 100-летием уникальной книги «The signatures in the first Journal-book and Charter-book of the Royal Society». ■

Литература

1. Григорьян Н.А. Иван Петрович Павлов. М., 1999.
2. The signatures in the first Journal-book and the Charter-book of the Royal Society. Oxford, 1912.
3. Соколовская З.К. 300 биографий ученых. М., 1982.
4. Биографический словарь деятелей естествознания и техники. Т.1 М., 1958.
5. Ноздрачев А.Д., Поляков Е.Л., Космачевская Э.А. и др. Павловская энциклопедия. Люди. События. Факты. Т.1. СПб., 2011.
6. Переписка И.П.Павлова. Л., 1970.
7. И.П.Павлов в воспоминаниях современников. Л., 1967.
8. Pavlov I.P. Certain problems in physiology of cerebral hemispheres // Proc. Roy. Soc. L. 1928. Ser.B. V.103. P.97—110.
9. Павлов И.П. Полное собрание сочинений. Т.III. Кн.2. М.; Л., 1951. С.89—105.
10. Басаргина Е.Ю. Императорская академия наук на рубеже XIX—XX веков. Очерки истории. М., 2008.
11. Летопись жизни и деятельности академика И.П.Павлова. Л., 1969.
12. Павлова С.В. Из воспоминаний // И.П.Павлов — первый нобелевский лауреат России. Т.2. СПб., 2004.
13. Грекова Т.И. И.П.Павлов и религия // И.П.Павлов: достоверность и полнота биографии. СПб., 2005. С.76—98.
14. Павлов И.П. Основа культуры животных и человека // И.П.Павлов: PRO ET CONTRA. СПб., 1999. С.148—165.
15. Неопубликованные и малоизвестные материалы И.П.Павлова. Л., 1975.

Рецензии Почему Вселенная темная?

В.Г.Сурдин,

кандидат физико-математических наук

Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга МГУ

Начать рассказ о науке с детского вопроса — известный прием популяризаторов: «Почему дует ветер?», «Почему вода мокрая?», «Почему облака белые?», «Почему трава зеленая?», «Почему небо голубое?»... Стоп! Традиционный детский вопрос звучит именно так: «Почему небо голубое?» Но автор книги, которую я хочу вам представить, спрашивает иначе: «Почему небо темное?». А вы когда-нибудь слышали от ребенка такой вопрос? Я — ни разу. Значит, это отнюдь не детский вопрос. Допустим. Ну а взрослые задавали вам когда-нибудь такой вопрос? Быть может, вы сами интересовались у знакомых? Подозреваю, что нет. Кто же в таком случае первым задал этот вопрос и почему он до сих пор актуален?

Прежде всего давайте выясним, что такое «небо». Быть может, мы просто не понимаем, о чем идет речь? Вполне возможно. Ведь у каждой специальности свой словарь. «Ухожу в поле», — говорит геолог и отправляется... в тайгу или в горы. «Какое же это поле?» — недоумеваем мы. «А что же это по-вашему?» — удивляется геолог.

Вот и астрономы порой весьма своеобразно используют обычные слова. Представьте: сгущаются сумерки, скоро нужно начинать наблюдения; с улицы в лабораторию входит астроном. Первое, что он слышит от коллег, — стандартный вопрос: «Небо есть?». «Нет, — сокрушается астроном, — пока неба нет». Вы можете представить, чтобы неба не было?! А для астронома это обычная печальная

ситуация. Для него голубой купол над головой и тем более облака — это не небо, а всего лишь помеха, мешающая разглядеть истинное небо, т.е. Вселенную. Именно поэтому книге, о которой я рассказываю, пришлось дать подзаголовок. Он поясняет, что эта книга — о Вселенной. Написал ее доктор физико-математических наук, профессор математико-механического факультета Санкт-Петербургского университета Владимир Петрович Решетников. Он известный специалист по внегалактической астрономии и наблюдательной космологии: изучает галактики. Вот как автор представляет читателю эту книгу:

«Мало кто задумывается, что ночное небо — это гигантская, окружающая нас со всех сторон, машина времени. Взгляд на Луну отправляет нас назад на секунду с небольшим, свет от Юпитера и Сатурна идет уже десятки минут. Ярчайшие звезды мы видим такими, какими они были много лет назад, а слабое, еле различимое глазом пятнышко — туманность Андромеды — отправляет в прошлое на миллионы лет. Однако самое загадочное на небе — это та тьма, что видна между изображениями звезд и галактик. Она имеет возраст в миллиарды лет, она старше Земли и Солнца, и она отсылает нас ко времени, когда рождались первые звезды и галактики. Предлагаемая книга рассказывает о загадке темного ночного неба и о том, как эта темнота связана с самым общим строением Вселенной».

Вот насколько глубоким оказался этот далеко не детский вопрос о темноте ночного неба: в поисках ответа на него автор предлагает нам отправиться



В.П.Решетников.
ПОЧЕМУ НЕБО ТЕМНОЕ.
КАК УСТРОЕНА ВСЕЛЕННАЯ.

Фрязино: Век-2, 2012. 192 с. (Из сер. «Наука для всех».)

к границам Вселенной. Путь предстоит неблизкий, поэтому хотелось бы заранее узнать, найдем ли мы в конце концов ответ или автор намерен лишь познакомить нас с «процессом научного творчества», отодвинув решение проблемы в туманное будущее? А вы заметили, что в названии книги отсутствуют знаки вопроса? Надо полагать, автор действительно знает: почему ночное небо темное и как устроена Вселенная. Тогда — в путь!

На строгом языке науки вопрос «Почему ночное небо темное?» называется *фотометрическим парадоксом Ольберса* и входит в число классических космологических парадоксов. Наиболее четко он был сформулирован в 1823 г. немецким астрономом и врачом Генрихом Вильгельмом Ольберсом и состоит в том, что если в бесконечном пространстве Вселенной равномерно рассеяны излучающие звезды, то в любом направлении на луче нашего зрения обязательно должна оказаться поверхность какой-либо звезды, а значит, все небо, днем и ночью, должно ослепительно сиять подобно Солнцу. В действительности же ночное небо темное (жители больших городов пусть в это поверят). Вселенная заполнена звездами, а небо темное. Парадокс? Парадокс!

Часто проблему ночной темноты называют также парадоксом Шезо—Ольберса, поскольку швейцарский астроном Жан Шезо еще в 1744 г. высказал аналогичную идею. Однако можно вспомнить, что эту же проблему примерно в те же годы обсуждал Эдмонд Галлей, а еще раньше — Иоганн Кеплер, который в 1610 г. приводил факт темноты ночного неба в качестве аргумента против безграничной Вселенной, заполненной бесконечным количеством звезд. Впрочем, еще в 1576 г. вопросом «Почему ночное небо темное?» задавался английский математик Томас Диггес. Не исключено, что эта проблема волновала людей

науки и раньше, но письменных указаний на это пока нет...

Для объяснения фотометрического парадокса Ольберс предположил, что в межзвездном пространстве имеется рассеянное вещество, которое поглощает свет далеких звезд. Спустя столетие межзвездное поглощение света действительно было обнаружено, но оно не разрешило фотометрический парадокс, поскольку в безграничной и вечной Вселенной, однородно заполненной звездами, пылинки нагрелись бы до температуры звездной поверхности и сами светились бы, как звезды.

Пока ученые искали выход из этого тупика, немецкий астроном Хуго Зелигер (1849—1924) сформулировал еще один космологический парадокс — гравитационный. Заключается он в том, что в рамках ньютоновой теории тяготения в бесконечной Вселенной, однородно заполненной веществом, сила тяготения не имеет определенной конечной величины. И снова бесконечность привела к парадоксу, с которым не может справиться ни астрономия, ни физика. Пришлось обратиться к математике, которая умеет укрощать бесконечность, например, вычисляя сумму бесконечного числа членов сходящегося ряда.

Именно на этот путь встал профессор астрономии и директор обсерватории Лундского университета (Швеция) Карл Вильгельм Шарлье (1862—1934), попытавшись в рамках классической науки разрешить оба парадокса с помощью модели иерархического строения Вселенной. В 1908 г. он опубликовал наброски новой теории строения Вселенной, а в 1922 г. изложил ее в окончательном виде. Согласно этой теории, Вселенная представляет собой бесконечную совокупность входящих друг в друга систем все возрастающего порядка сложности: отдельные звезды образуют галактику первого порядка, совокупность галактик первого порядка образует галактику второго по-

рядка (метagalaxy), совокупность галактик второго порядка образует галактику третьего порядка и т.д., до бесконечности. На основании такого представления Шарлье пришел к выводу, что в бесконечной иерархической Вселенной фотометрический и гравитационный парадоксы устраняются, если расстояния между равноправными системами достаточно велики по сравнению с их размерами, что приводит к непрерывному уменьшению средней плотности космической материи по мере перехода к системам все более и более высокого порядка.

Однако идея Шарлье не подтвердилась: изучив распределение далеких галактик, Эдвин Хаббл (1889—1953) и другие астрономы доказали, что в больших масштабах Вселенная однородна и изотропна. С другой стороны, открытое Хабблом расширение Вселенной показало, что чем дальше галактики и их звезды, тем быстрее они удаляются от нас. Тогда некоторые исследователи решили, что один лишь эффект красного смещения может объяснить темноту ночного неба, поскольку свет, испущенный далекими звездами, достигая Земли, оказывается за пределом оптического диапазона спектра. Однако другие ученые сходились во мнении, что более важным будет ограничение возраста Вселенной: за время, прошедшее с начала расширения нашего мира (около 14 млрд лет), до нас дошел свет лишь от ограниченного числа галактик (порядка 10 млрд); этого слишком мало, чтобы сделать ночное небо светлым. Окончательно фотометрический и гравитационный парадоксы были разрешены лишь в релятивистской теории эволюционирующей Вселенной, разработанной на основе общей теории относительности А.Эйнштейна.

Вот видите, как далеко может завести, казалось бы, невинный вопрос о ночной темноте. Но признаемся честно: мы не дума-

ли об этом до тех пор, пока на него не обратил наше внимание автор этой небольшой книги. Дадим же ему слово:

«Существует представление, что современная космология очень сложна. Это, конечно, верно. Рассказать неподготовленному читателю, например, о реликтовом излучении и о его значении совсем непросто. Однако каждый из нас постоянно сталкивается с фактом, который кажется совершенно очевидным, — ночью темно. Меня когда-то поразило, что это известное всем детям простое знание на самом деле есть строго научный наблюдательный тест структуры окружающего нас Вселенной. Так и возникло желание написать об этом подробнее».

Уверен, читатель останется благодарен автору за то, что тот осуществил это желание и вложил в книгу свои знания и эрудицию. Не отходя далеко от основной темы — почему небо темное, — Решетников знакомит нас и с полузабытыми учеными (отцом и сыном Диггесами, Луи де Шезо, «агентом 007» Джоном Ди), и с малоизвестными эпизодами из жизни популярных персон (И.Кеплера, А.Фридмана, А.Эйнштейна, Э.Хаббла...). Неожиданно на сцене появляется писатель Эдгар По в роли теоретика космогонии, творца малоизвестной «Эврики». Этой поэмой в прозе По очень гордился, ее оценили многие литераторы, а Константин Бальмонт даже перевел на русский. Сам Эдгар По считал, что совершил революцию в науке... Впрочем, она этого не заметила. Наука — серьезная да-

ма, она придирчива к мелочам и требует точности и доказательств. Профессор Решетников вынужден исправлять перевод Бальмонта, но и это не помогает: в текстах великого американского романтика удается найти лишь намеки на современное видение эволюции Вселенной, даже на популярный ныне антропный принцип. Любопытно, а обнаружатся ли намеки на научные открытия XXII и XXIII вв. в стихах современных поэтов?

Познакомив читателя с зарей современной космологии, автор книги в следующих главах демонстрирует «эволюцию» Вселенной — от открытия ее нестационарности до самых последних идей о ее рождении. Немногословно и точно рассказано и о реликтовом излучении, и о методах измерения гигантских космологических расстояний, и даже о загадочном поле Хиггса, квант которого — бозон Хиггса — наконец-то найден (или нет?). Автор книги признается: «Я иногда наталкиваюсь в Сети на горячие дискуссии по поводу темной материи и темной энергии, расширения Вселенной и о других столь же загадочных для неспециалистов вещах. Это побудило меня написать об этих вопросах чуть подробнее, чем обычно пишут в популярных статьях и книгах». Хочется верить, что любознательные пользователи Интернета обнаружат книгу Решетникова и удовлетворят свое любопытство в области космологии. Книга издана при поддержке фонда «Династия», что уже само по себе хорошая реко-

мендация. Ее высокопрофессиональный текст содержит тот минимум формул, который не отталкивает читателя, а лишь укрепляет понимание предмета. Исторические экскурсы иллюстрированы нечасто встречающимися фотографиями, рассказы о результатах исследований сопровождаются понятными читателю графиками, а в заключение приводится полезная библиография. К сожалению, отсутствуют указатели; эта традиция еще не укрепилась в нашей научно-популярной литературе.

Не знаю, станет ли книга прототипом новой серии «Почему», и увидим ли мы вскоре столь же успешные произведения типа «Почему трава зеленая» и «Почему вода мокрая». Но я уверен, что, перевернув последнюю страницу книги, читатель поймет, почему небо темное, и узнает новые факты об устройстве нашего мира. Более того, он даже выяснит, почему ночное небо не черное, а всего лишь темное (дело вовсе не в том, о чем подумали городские жители!). Весьма отраднo, что хорошие традиции советского научпопа возвращаются к нам хотя бы в некоторых произведениях. Жаль, что не возвращаются пока их многочисленные тиражи. Но это уже зависит не от писателей, а от читателей.

В заключение можно окинуть взглядом астрономию последних десятилетий: темное небо, черные дыры, темная материя, темная энергия... Если так и дальше пойдет, скоро в астрономии не останется белых пятен. ■

История науки. Этнография

М.И., Ю.М. и В.Ю.Янковские. НЭНУНИ. ДАЛЬНЕВОСТОЧНАЯ ОДИССЕЯ. 2-е изд. Владивосток: Рубеж, 2012. 640 с.

Это захватывающая дальневосточная сага о жизни, приключениях и научных изысканиях трех поколений Янковских, которых судьба забросила в дебри Приморья, Кореи и Маньчжурии.

Книгу открывают очерк деда, Михаила Ивановича Янковского, «Остров Аскольд», и мемуары сына, Юрия Михайловича, «Полвека охоты на тигров». За ними следуют повесть «Нэнуи», которую посвятил своему деду Валерий Юрьевич Янковский, и цикл его корейских новелл. Это своего рода летопись жизни в приморской тайге, населенной воинственными хунхузами. Детство Михаила Ивановича прошло в имении Сидеме, а также в Новине и Лукоморье, недалеко от корейского городка Сейсина, куда Янковские вынуждены были эмигрировать в октябре 1922 г.

Завершают издание фрагменты из книги писательницы Мэри Тейлор «Коготь тигра» (в переводе известного корееведа Татьяны Симбирцевой), где рассказывается о знакомстве с семьей Янковских в Корее в 1930-х годах.

Краеведение

Ю.М.Смельницкий. ИЗ ОХОТНИЧЬИХ ВОСПОМИНАНИЙ. Репринт с изд.: Казань, 1905—1914 гг. 526 с.

Охотничьи воспоминания — это история медвежьих и глухариных охот в лесах Казанской губернии и на территории Марийского края. В книге рас-

смотрены вопросы охотничьего законодательства, организации и аренды угодий, ведения хозяйства.

Юлий (Юрий) Михайлович Смельницкий (1851—1931) — профессор-юрист, талантливый литератор. Смельницкий стал первым руководителем Казанского общества охотников, а в 1887 г. был избран гласным Казанской городской думы.

Эта книга подготовлена издательством «ИП В.Секачев» (совместно со скоропечатней «Мамонт») в рамках проекта по переизданию малотиражных репринтов старинных охотничьих книг.

Биология

Н.Н.Иорданский. ОРГАНИЗМЫ, ВИДЫ И ЭВОЛЮЦИЯ. Отв. ред. Э.И.Воробьева. М.: Книжный дом «Либроком», 2011. 176 с.

Современная эволюционная теория сложилась на основе учения Ч.Дарвина путем синтеза достижений разных биологических наук (сравнительной анатомии, палеонтологии, эмбриологии, генетики, систематики, экологии, биогеографии; в последнее время все большее значение получают молекулярная биология, физиология, биохимия) и трудов многих ученых. При этом были объединены в целостную теорию многие концепции, первоначально развивавшиеся независимо и даже противоречащие друг другу. Процесс эволюционного переосмысления новых данных, нередко требующий пересмотра тех или иных сложившихся прежде теоретических представлений, продолжается.

Автор книги, написанной в связи с юбилеем эволюционного учения, поставил перед собой задачу — изложить крат-

ко основы современной теории эволюции, при этом уделив особенное внимание обусловленности многообразия форм и механизмов эволюционных преобразований свойствами организации разных типов биологических систем. В книге рассмотрены важнейшие проблемы эволюционной биологии: сущность, причины и предпосылки эволюции организмов; соотношения, факторы и механизмы микро- и макроэволюции, биологический вид и видообразование; направления и темпы эволюционных преобразований; эволюционный прогресс и т.д.

Стремление сделать книгу доступной для широкого круга читателей определило некоторые особенности изложения. В частности, список литературы ограничен наиболее важными (и по возможности новыми) трудами и сводками.

Охрана природы

В.Горбатов. ПОД ПОЛОГОМ РУССКОГО ЛЕСА. 2-е изд. М.: Вече, 2012. 312 с.

Эта книга для тех, кто любит дикую природу, равнодушен к ее красоте и обеспокоен ее будущим, а также для тех, кто интересуется анималистикой: для художников, искусствоведов, ученых.

В основу издания легли собранные за долгие годы натурные зарисовки, наброски, акварели, выполненные автором во время научных экспедиций, охотничьих поездок, работы в заповедниках. Представлены также станковые живописные работы, дневниковые записи и короткие рассказы, посвященные жизни русского леса и его обитателей — зверей и птиц. Вадим Горбатов — признанный мастер этого редкого жанра.

Первооткрывательница отечественных коренных алмазов Лариса Попугаева

Е.Б.Трейвус,

кандидат геолого-минералогических наук
Санкт-Петербургский государственный университет

Председатель Совета министров СССР Н.А.Булганин в феврале 1956 г. на XX съезде КПСС в отчетном докладе сообщил: «Замечательным открытием последних лет является обнаружение месторождений алмазов в Якутии». Сенсация. До этого вся работа по поиску отечественных алмазов шла под большим секретом. В мае того же года в газете «Восточно-Сибирская правда» вышла статья «Сибирские алмазы», в которой было названо имя их первооткрывательницы: «Первую трубку в Якутии нашла геолог тов. Л.А.Попугаева». Так в печати впервые появилось ее имя.

Сейчас ее судьба детально прослежена [1, 2]. Ее дед по матери Сергей Цветков был петербургским рабочим высокой квалификации. Участвовал в штурме Зимнего дворца. В 1918 г. вступил в РКП(б). После революции побывал на разных советских должностях. В 1938 г. его арестовали как участника «зиновьевской оппозиции» и сослали в Среднюю Азию, где он умер в 1950 г. Отец, Анатолий Рафаилович Гринцевич, профессиональный партийный работник, называл дочь популярным тогда именем Нинель (Ленин наоборот). В 1938 г. его арестовали и тогда же (в 35 лет) расстреляли. Мать, Ольга Цветкова, тоже была членом партии. После войны стала профессиональным искусствоведом, авто-

ром книг по архитектуре Ленинграда. Из такой среды вышла Лариса Гринцевич. Она родилась 3 сентября 1923 г. в Калуге, где ее отец был на армейской партийной работе.

В 1941 г. Лариса окончила среднюю школу в Ленинграде. Тогда в десятом классе была геология. По этому предмету у нее из четверти в четверть: «пять, пять, пять, пять, пять». По другим предметам четверки, мелькают и тройки. Наверное, у нее был хороший преподаватель, сумевший увлечь своей наукой. Лариса поступила на геолого-почвенный факультет Ленинградского университета. Однако началась война, и приступить к учебе тогда ей не пришлось. В конце августа 1941 г. перед самым началом блокады она с мамой и четырехлетней сестренкой эвакуировалась в г.Молотов (Пермь), поступила на геолого-географический факультет Молотовского университета. В марте 1942 г. Лариса ушла добровольцем в армию и стала зенитчицей. При вступлении в армию девушек остригли накоротко. Ее дочь Наташа хранит ту прядь маминых каштановых волос.

Сначала Лариса Гринцевич была на обороне Москвы, а потом с зенитным пулеметом сопровождала воинские эшелоны, шедшие к фронту. Летом 1945 г. демобилизовалась и вернулась в Ленинградский университет.

Ее однокурсницы вспоминают, какая она была красавица. Большие голубые глаза, велико-



Выпускница ЛГУ. 1950 г.

лепные косы, которые она укладывала венцом на голове, нежный («персиковый») цвет лица. Прекрасно сложена. Училась на отлично. Заняла первое место по университету в стрельбе из винтовки. Играла в баскетбол. Была секретарем научного кружка на кафедре минералогии, тянулась к науке. Ее портрет находился на университетской доске почета.

Вместе с тем жилось ей трудно. На занятия в университет пришла в гимнастерке. Лишь на третьем курсе купила свое первое платье. С матерью и сестрой они занимали две небольшие комнаты в коммунальной квар-

тире. Ради заработка Лариса трудилась в Северо-Западном геологическом управлении, в полевой сезон из года в год помногу месяцев находилась на геологической съемке в Карелии.

Университет Лариса окончила по кафедре минералогии в 1950 г., защитив дипломную работу, посвященную железорудному месторождению в Карелии. Получила распределение во Всесоюзный геологический институт (ВСЕГЕИ). Летом того же года занималась геологическим изучением района одного из притоков Енисея во главе отряда из двух человек. В министерстве спохватились, что по недосмотру кадровиков она, дочь репрессированного, оказалась в столь секретном институте. Поэтому весной 1951 г. ее перевели в Центральную экспедицию Второго всесоюзного геологического треста, где был более низкий уровень секретности, хотя трест и занимался поиском алмазов. От этой экспедиции она в 1951 г. искала алмазы на Приполярном Урале во главе отряда из двух девушек-практиканток из Ленинградского университета. Так она впервые столкнулась с алмазной проблематикой.

Зачем приходится углубляться в эти детали? Дело в том, что впоследствии, когда она совершила свое открытие и прославилась, нашлось много завистников и недоброжелателей — и в Ленинграде, и в Сибири, которые изображали ее малоопытным геологом.

В 1952 г. Лариса Гринцевич вышла замуж за инженера-железнодорожника и стала Попугаевой. В поле не была, в сентябре родила дочь, а весной 1953 г. вернулась в Центральную экспедицию, в геологическую партию Натальи Николаевны Сарсадских.

Тогда на Средне-Сибирской возвышенности, которая в силу ее геологической однородности и особенностей строения называется в геологии Сибирской платформой, искала алмазы местная Амакинская экспедиция

с базой в пос.Нюрба на р.Вилюе. Геологи шли по рекам, перебивали сотни и тысячи кубометров песка и гравия в поисках россыпных алмазов, имея неверные представления о том, из каких коренных пород в результате их разрушения и размыва алмазы поступают в речные наслоения.

В 1950 г. в Ленинграде в Центральной экспедиции поставили шестилетнюю научную тему по выявлению минералов — генетических спутников алмазов на Сибирской платформе, т.е. тех минералов, которые вместе с алмазами попадают в речные наслоения. Стояла сверхзадача — по этим минералам выйти на коренные алмазы. Инициатором этой темы был начальник Центральной экспедиции и ее главный инженер Михаил Федорович Шестопапов — опытный геолог, который с середины 30-х годов занимался поиском алмазов.

Интересно упомянуть, что летом 1946 г. Шестопапов написал письмо И.В.Сталину, обращая его внимание на необходимость активизации наших работ по поиску алмазов. Его вызвали в Москву для доклада. Сталин разозлился на своих министров: «Вы говорите, что мы должны сворачивать поиск алмазов, а рядовой инженер знает, где их искать!» Осенью 1946 г. было создано Геологическое управление, нацеленное на поиск алмазов. Оно и стало через несколько лет упомянутым Вторым трестом.

Вести данную тему поручили Сарсадских. Как она действовала? В 1948—1949 гг. сибирские геологи находят алмазы в песках по рекам Нижняя Тунгуска и среднему течению Вилюя. Она в 1950 г. идет по Вилюю и моет шлихи, что делается точно так же, как при добыче золота. Легкие минералы уносятся водой, остается кучка зерен тяжелых минералов, в основном темноцветных, что и называется шлихом. В нем и следует выискивать желаемые минералы. В 1951 г. она моет шлихи в верховьях Ви-



Лариса Попугаева. Художник Б.Корнеев.

люя. Затем находят алмазы по левому притоку Вилюя — р.Мархе. В 1952 г. Сарсадских проводит полевой сезон на Мархе.

Весной 1953 г. встал вопрос: что делать дальше и где продолжать эту работу? Несмотря на трехлетний опыт, четких представлений относительно того, какие минералы надежно связаны с алмазами и могут быть их спутниками, из каких коренных пород алмазы поступают в речные наслоения, у Сарсадских еще не сложилось. Судя по ее книге [3] ее, как ни странно, никто не консультировал, никто не давал ей никаких наставлений и советов, хотя некоторые общие и вполне определенные рекомендации могли бы дать те, кто имел соответствующие знания и по долгу службы обязан был это сделать. Наталья Николаевна была предоставлена самой себе.

После обсуждения этого вопроса в Центральной экспедиции с Шестопаповым для дальнейших поисков остановились на бассейне р.Далдын, левом притоке Мархи, в северо-западной части Якутии. Личное участие в выборе названного района подчеркнет и Попугаева в дальнейшем в автореферате своей



На р.Щугор. Полярный Урал. 1951 г.

кандидатской диссертации, хотя только весной 1953 г. она оказалась рядом с Сарсадских. К тому моменту у нее уже имелся многолетний геологический опыт, позволявший высказывать собственные суждения.

Чрезвычайно интересно: почему же остановились именно на р.Далдын? Из их производственного отчета, относящегося к 1955 г., я выяснил, что таких причин было две. Во-первых, находки алмазов по р.Мархе. Следовательно, необходимо было теперь идти в ее притоки, крупнейший из которых — Далдын. Во-вторых, наличие там «богатых магниезий пород». К ним относятся так называемые траппы — покровы вулканического происхождения, занимавшие большие площади по правобережью Далдына. С траппами, по теории иркутских геологов, и должны были быть связаны территориально и своим происхождением какие-то неизвестные коренные алмазоносные породы. Эту теорию в дальнейшем своим открытием опровергла Попугаева.

В конце июля геологическая партия Сарсадских и Попугаевой, в которую входили трое рабочих, отправилась из пос.Оле-

нек (куда они добирались рейсовыми самолетами) на юг в сторону Далдына. С ними был караван оленей с каюрами, нанятыми в Оленьке. На путь более чем в 300 км до Далдына они затратили месяц. Шли по краю горячей тайги, по речным косам, ночевали на земле, лишь на полметра оттаявшей от вечной мерзлоты, чуть не погибли в бешеном потоке, возникшем после проливного дождя. Жара сменилась дождями, а потом и снегом. Рации не было. Они ушли в неизвестность на сотни километров от населенных пунктов минимум на два месяца. Сарсадских было тогда 37 лет, она ждала ребенка, в Ленинграде у нее остался десятилетний сын, у Попугаевой — годовалая дочь.

В 20-х числах августа вблизи Далдына они разделились на два отряда. Попугаева пошла вниз по этой реке, отмывая с двумя рабочими шлихи. Сарсадских отправилась дальше на юг обследовать поля траппов и двигалась по ним в 20 км южнее Далдына параллельно Попугаевой.

В пробах, взятых Попугаевой на Далдыне, нашлись первый алмаз и зерна двух новых минералов, красного и черного цвета, раньше не попадавшихся. Откуда, после разрушения каких скальных горных пород эти минералы попали в речные наносы, они не знали. Маршрут Сарсадских оказался фактически безуспешным. Однако, как известно, отрицательный результат — тоже результат.

В Ленинграде Лариса отправилась в университет к минералогу А.А.Кухаренко, своему бывшему преподавателю. Он знал про алмазы все, так как много лет занимался их уральскими россыпями. Кухаренко тут же сказал, что красные зерна — это пироп, минерал из группы гранатов, а другой минерал, черный — пикроильменит (титанат железа с большой примесью магния). Подчеркнул, что оба эти минерала характерны для кимберлитов — коренной алмазоносной породы Южной Афри-

ки, — и посоветовал по пиропу, как легко бросающемуся в глаза и более распространенному, чем пикроильменит, постараться выйти на сибирские кимберлитовые трубки. Заметим, что так называют тела кимберлитов благодаря их округлой форме.

Почему же Попугаева не знала о происхождении пироба? Она училась по книге «Земные силикаты, алюмосиликаты и их аналоги». Это были лекции В.И.Вернадского, приведенные С.М.Курбатовым (заведующим кафедрой минералогии в Ленинградском университете) к «современному» уровню, как утверждает в этом учебнике. В 1937 г. он был издан под двумя фамилиями. О пиропе там было сказано только то, что он «магматического происхождения» и что из гранатов «во многих интрузивных породах... чаще... встречаются альмандин и пироп» (с. 292). Здесь и искажение фактов (пироп — почти исключительно минерал кимберлитов), и умолчание о самих кимберлитах. Сейчас это выглядит как профанация науки. Между тем в 1936 г. был издан «Курс минералогии», созданный преподавателями Ленинградского горного института во главе с профессором А.К.Болдыревым, в котором четко сказано, что «алмаз сопровождается пиропом» в кимберлитах. В другом месте той же книги еще раз подчеркнуто, что пироп «известен в алмазных россыпях... Бразилии». Однако в 1937 г. Болдырева репрессировали. В результате учебник попал в спецхран и до студентов не дошел. Таковы обстоятельства того времени, несомненно затормозившие открытие коренных отечественных алмазов на много лет.

На 1954 г. полевые работы по их геологической партии не планировались. В феврале у Сарсадских родилась дочь, а Попугаева собиралась поступать в аспирантуру. Идея Кухаренко меняла ситуацию. Сарсадских и Попугаева приняли его предложение. Ларису уговорили поехать в поле.

Главный геолог Второго треста А.П.Буров уклонился от какой-либо помощи [3, 4]. Видимо, боялся брать на себя ответственность за такое рискованное предприятие. Деньги на ее отряд нашлись благодаря начальнику треста А.А. Куницыну.

Итак, в первых числах июля 1954 г. Попугаева отправилась в Якутию с одним рабочим — Федором Алексеевичем Беликовым. Потом она напишет маме из Сибири: «Федя оправдал себя на 1000%. Я так благодарна ему за работу». Полевой труд они начали около 10 июля. Однако пошли ливневые дожди, все речные косы затопило водой, мыть шлихи оказалось невозможным. Недельку просидели в палатках. В дальнейшем, после упорного труда в течение месяца, недоедая и недосыпая, идя по Далдыну и его притокам, выскивая в шлихах зерна пиропы как пугиводную ниточку, теряя ее и снова находя, 21 августа 1954 г. они вышли на первое коренное месторождение алмазов в нашей стране — кимберлитовую трубку, названную впоследствии «Зарницей». Она прорывала не траппы, к которым не имела отношения, а слои осадочных горных пород — мергелей и известняков. Ее размер — около 600 м в диаметре. Геологи были потрясены ее находкой и говорят, что пройти в тайге мимо «пяточка» породы такой величины ничего не стоит. Затем Попугаева выявила широкую зараженность речных наносов в том районе пиропом, и, пользуясь ее предсказанием, в 1955 г. местные геологи вышли в 14 км к западу от «Зарницы» на богатейшую по алмазам кимберлитовую трубку «Удачную». Тогда же, опять таки по пиропам, в 400 км южнее геологи вышли на трубку «Мир». Эти месторождения стали основой отечественной алмазной промышленности.

Завершив работу, Попугаева и Беликов в сентябре 1954 г. сплавились по Далдыну, а затем по Мархе до пос.Шелогонцы, откуда Лариса полетела на самолете

в Нюрбу, в Амакинскую экспедицию.

До сих пор находятся люди, которые заявляют, что Попугаевой надо было из Шелогонцев улететь в Оленек и далее в Ленинград со всеми своими материалами и расценивают ее поездку в Нюрбу как проявление тщеславия, желание прославиться и выпячивать себя. Однако в конце сентября в Нюрбе должно было состояться большое совещание с участием руководителей треста, чтобы подвести итоги и наметить планы на будущее. Как она могла уклониться от участия? Кроме того, в своей работе ленинградцы опирались на Амакинскую экспедицию, игнорировать ее было не порядочным. Причем по заведенному порядку экспедиции одного треста обменивались информацией о полученных результатах. Упомянутое совещание, его детали и события вокруг него описывались неоднократно [1, 2, 5]. Лариса выступила на нем с докладом, стала героиней дня. Между тем находившиеся там А.П.Буров и главный инженер их треста

Н.Д.Меркурьев запретили ей что-либо сообщать в Ленинград, сказав, что сами сделают это. Однако они ее обманули. Затем путем угроз и шантажа руководители Амакинской экспедиции вынудили Попугаеву перейти к ним. И сделанное открытие закрепилось за этой экспедицией, а не за ленинградской.

Домой Лариса вернулась в ноябре. В Ленинграде были уязвлены ее молчанием, не стали разбираться в том, что произошло в Нюрбе. В вульгарных выражениях обвинили в не порядочности. Она рыдала: «Меня заставили!», но ее не хотели слушать.

Эта история изменила ее. С симпатичными ей людьми Лариса оставалась милой, доверчивой, безыскусной, с малопривычными — резкой, неуживчивой, казалась вздорной.

Внешне все выглядело хорошо. В различных изданиях — от газеты «Пионерская правда» до журнала «Советский Союз» — появляется множество благостных и умильных очерков с упоминанием ее имени. Художники рисуют ее портреты,



Полевой быт на р.Далдын. Л.А.Попугаева и Ф.А.Беликов. Август 1954 г.



Мемориальная доска. Установлена в школе №267 Адмиралтейского р-на г. Санкт-Петербурга.

скульпторы создают бюсты. Но за этим льются ее «невидимые миру слезы». Как-то в разговоре с близкой приятельницей у нее вырвались такие слова о «Зарнице»: «Если бы я знала, чем это кончится, никогда не открыла бы ее!»

Числясь в Амакинской экспедиции, зиму 1954—1955 г. Лариса провела в Ленинграде, составляя вместе с Сарсадских отчет об открытии «Зарницы», ставший эпохальным, а летом 1955 г. работала в Якутии на минералогическом и геологическом описании этого месторождения. Зимой 1955—1956 г. опять находилась в Ленинграде, дорабатывая собранный на «Зарнице» материал. Болела. Весной 1956 г. вернулась в Якутию. Летом упорно добивалась увольнения из Амакинской экспедиции. Мысли ее были о доме, семье, маленькой дочери. В октябре 1956 г. ей наконец удалось вырваться оттуда.

В 1957 г. вышла прекрасная монография «Алмазы Сибири», одним из авторов которой была Попугаева. В этой книге изложены установленные Ларисой сведения о минералогическом составе «Зарницы». И после этого

некоторые авторы решаются на такую эскапду: «К сожалению, она не сумела использовать предоставленные ей возможности [для] исследования, так и оставшись на уровне баловня удачи. Ничего серьезного сделать в Амакинской экспедиции [ей] в Нюрбе не удалось. Инициативу перехватили специалисты с гораздо более глубокими знаниями и умением доводить дело до конца» [4. С.151].

Весной 1957 г. Ленинскую премию за «открытие промышленного месторождения алмазов» присудили Бурову как «руководителю работы» и группе из пяти геологов Амакинской экспедиции. (Роль некоторых из них в находке коренных алмазов — нулевая.) Попугаева среди них не фигурирует — на том основании, что «Зарницу» тогда не признали имеющей промышленное значение. Между тем в письме Н.С.Хрущеву, написанном в октябре того же года, она с возмущением пишет о том, что на «Зарнице» уже добыто несколько тысяч каратов (т.е. около килограмма) алмазов, а сама разведка этого месторождения проведена безобразно. Осенью того же года Попугаева получила орден Ленина среди более чем 300 награжденных «за достигнутые успехи в культурном и хозяйственном строительстве» в связи с 325-летием вхождения Якутии в состав России. Когда ее спрашивали, за что она получила орден, отвечала: «За высокие надои молока».

В 1957 г. Лариса поступила в аспирантуру, формально — во ВСЕГЕИ, фактически — в Ленинградский горный институт. Однако диссертацию она тогда не подготовила. Тому было несколько причин: сложность темы о минералах кимберлитов, которую трудно было выполнить за три года, необходимость поездок в Сибирь для дополнительного сбора образцов и уточнения представлений о геологии кимберлитовых трубок. К тому же начались болезни. Попугаева пишет своей зна-

комой в Москву: «А сейчас у меня страшная невралгия. Вечная мерзлота выходит боком». В последний год аспирантуры ее на два месяца выбили из колеи, сделав секретарем районной избирательной комиссии.

После окончания аспирантуры Лариса в 1959 г. поступила в Центральную научно-исследовательскую лабораторию камней самоцветов (ЦНИЛКС) при Ленсовнархозе, где ей поручили составление кадастра отечественных месторождений ювелирного и поделочного камня. Благодаря ее усилиям были созданы кадастровые листы более чем на 100 месторождений с описанием свыше 30 минералов, пригодных для ювелирных изделий. Попугаева объехала весь Советский Союз — от Карпат до Забайкалья и от Тимана до Армении. На каких-то месторождениях побывала лично, сведения о других извлекала из фондовых материалов местных геологических организаций.

В 1964 г. она сумела обратить внимание председателя Совета министров СССР А.Н.Косыгина на состояние ювелирного дела в нашей стране. В результате их встречи было принято правительственное решение о возрождении этой отрасли. ЦНИЛКС была преобразована во Всесоюзный институт ювелирной промышленности (ВНИИювелирпром), в котором Лариса стала руководителем камнесамоцветной лаборатории. В 1960-х годах много времени тратила на составление экспертных заключений о пригодности тех или иных минералов и горных пород для ювелирных и облицовочных целей. Сохранилось свыше 80 копий таких бумаг. Ее усилия в те годы были направлены на поиск и открытие новых месторождений, возвращение в эксплуатацию забытых и заброшенных месторождений — например, бирюзы в Таджикистане, лазурита на Памире, агатов в Тимане, рубина на Полярном Урале. 1970-е годы в основном были посвящены курированию добычи при-

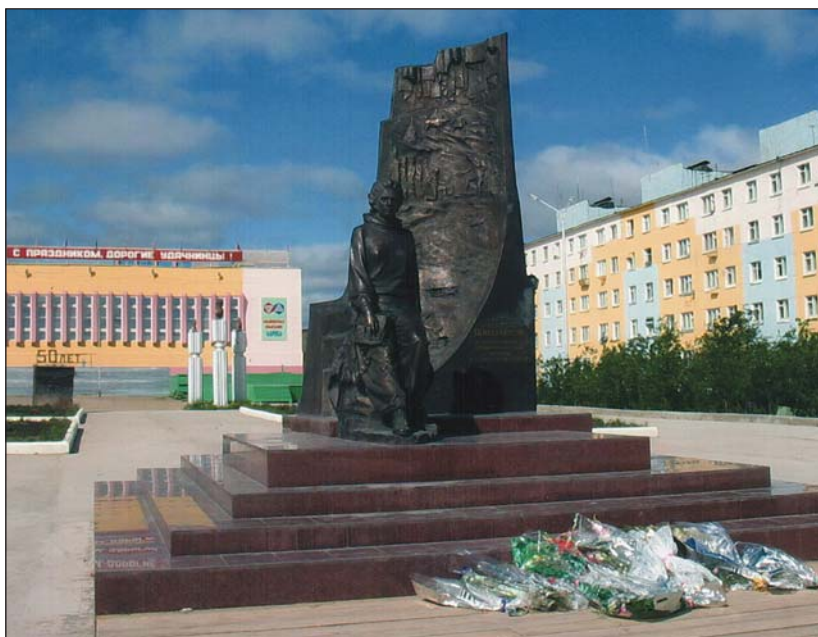
балтийского янтаря. Тогда же ее молодые помощники оценили ресурсы жемчуга по рекам северо-запада России, указали на условия возобновления его промысла без ущерба для популяции раковин-жемчужниц.

Итак, у Попугаевой есть еще одна громадная заслуга: воссоздание отечественной ювелирной промышленности.

В Музее Санкт-Петербургского университета создан фонд личных документов Ларисы Попугаевой (там хранится и упомянутое письмо к Хрущеву). По указанному фонду можно проследить многие детали ее жизни. Она стала признанным экспертом в ювелирной отрасли, консультировала Эрмитаж и таможню. Например, ее послали обследовать Калининградский янтарный комбинат. По составленному ею в связи с этим документу видно, как она цепко вникала во все тонкости янтарного производства, как умно выглядит ее заключение о работе этого комбината.

Кандидатом наук Попугаева стала в 1970 г., представив сводный доклад по результатам своей почти 20-летней деятельности в геологии и выступив перед ученым советом в Ленинградском горном институте. Один из членов этого совета, знаменитый кристаллограф профессор И.И.Шафрановский сказал на защите, что она достойна докторской степени. Весь Совет проголосовал «за».

В начале 1970-х годов Попугаева явилась инициатором воссоздания знаменитой Янтарной комнаты в Екатерининском дворце в Пушкине. Она стала ее «крестной матерью», с ее легкой руки началось возрождение этой комнаты — так выразился



Бронзовый монумент Л.А.Попугаевой в г.Удачном. Скульптор В.Барков.

авторитетный художник по камню В.П.Ерцев, один из активных участников этой работы.

В последние годы жизни Лариса Анатольевна много болела. Умерла 17 сентября 1977 г. на улице, пройдя после окончания рабочего дня два квартала от своего института. Аневризма (закупорка и разрыв) аорты. К 12 часам ночи дома поняли, что что-то произошло. В этой смерти сошлось все: гибель отца, сырые землянки и другие испытания военного времени, многолетний нелегкий полевой быт геолога, драматическая нюрбинская история, отразившаяся на ее психике. Отравляли ей жизнь неприязнь и даже враждебность части ленинградских геологов, настроить которых против нее постарались ее бывшие сослуживицы по Центральной экспедиции. Наконец, Лариса много курила, еще с вой-

ны. Не способствовала здоровью и работа. Она трудилась, не считаясь с самочувствием, иначе просто не умела. Это звучит патетически, но ее сердце действительно билось горящей любовью к Родине, желанием выложиться ради нее до конца.

В 2005 г. в г.Удачном, что вблизи трубки «Удачной», был воздвигнут полнофигурный бронзовый монумент. Попугаева — единственный геолог нашей страны, который удостоился такой чести. В 2007 г. установили мемориальную доску на здании школы, где училась Лариса. Несколько лет назад по телевизору прошла серия из четырех фильмов под общим названием «Победительницы». Лариса Попугаева оказалась в одном ряду с артисткой Марией Савиной, революционеркой Александрой Коллонтай, певицей Лидией Руслановой. ■

Литература

1. *Трейвус Е.Б.* Сверкнувшая как зарница. Повесть о геологе Ларисе Попугаевой. СПб., 2009.
2. *Юзмухаметов Р.Н.* Звездный час и трагедия Ларисы Попугаевой. Якутск, 2004.
3. *Сарсадских Н.Н.* Открытие «Зарницы». История длиной в 40 лет. СПб., 2004.
4. *Трейвус Е.Б.* Знаменитый геолог А.П.Буров и открытие сибирских алмазов // Уральский геологический журнал. 2011. № 4 (82). С. 78—87.
5. *Масайтис В.Л.* Где там алмазы? Сибирская Диамантиада. СПб., 2004.