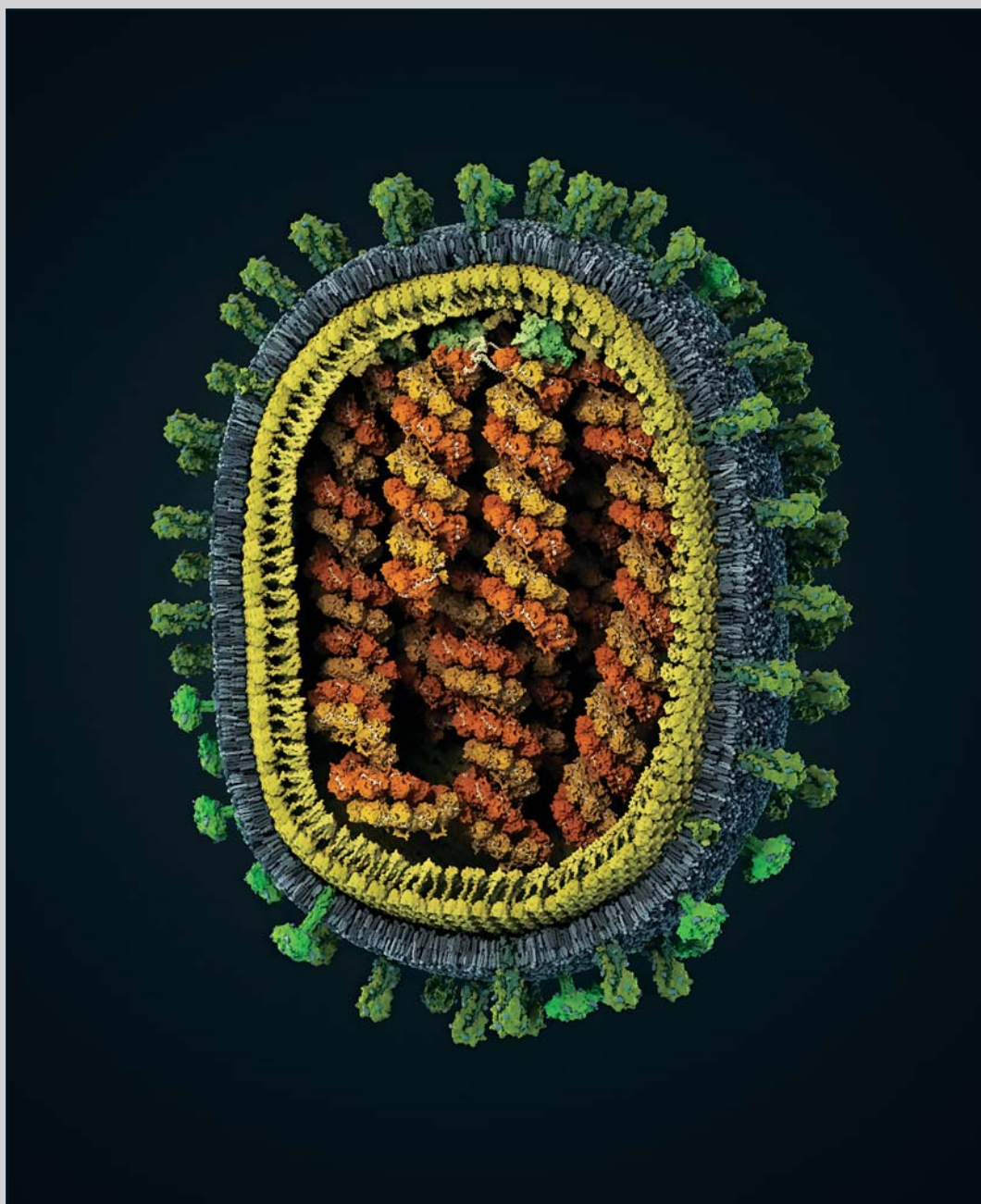


ПРИРОДА

11-14



В НОМЕРЕ:**3 Крапошин В.С., Талис А.Л.****Кристаллография и вещество**

Обобщенная кристаллография, понимаемая как структурное приложение алгебраической геометрии, позволяет на основе базовой строительной единицы — тетраэдрического семивершинника — описать структуру не только кристаллов, но и жидкостей, и биополимеров.

16 Базыкин Г.А., Стефанов Ю.Э.**Стремительная эволюция гриппа: как одни изменения влекут за собой другие**

Вирус гриппа быстро меняется, что осложняет профилактику и лечение заболевания. Компьютерный анализ последовательностей аминокислот в белках вируса и нуклеотидов в его геноме выявил закономерности, которые, вероятно, помогут прогнозировать появление новых эпидемических или даже пандемических штаммов.

23 Бородин П.М., Лисачев А.П.**Портрет Y-хромосомы в юности**

С тех пор как у млекопитающих появилась мужская хромосома, с ней стали происходить неприятные события, которые неуклонно вели к ее уменьшению. Какой же была эта одинокая Y-хромосома в самом начале своего эволюционного пути? В поисках ответа на этот вопрос генетики обратились к аквариумным рыбкам.

32 Гельфанд М.С.**От науки к интернет-играм: коллективное решение биоинформатических задач**

В биоинформатике часто встречаются задачи, в которых ручная обработка — основной технический прием, причем производится она не группой специалистов, а большим коллективом пользователей Интернета. Уже образовалось три таких сообщества, насчитывающих десятки тысяч участников, решающих сложные научные задачи и активно обменивающихся идеями.

37 Сергеев А.В., Смолянинов В.В.**Новые технологии в золотодобывающей отрасли**

Замена цианирования — все еще самой распространенной технологии, применяющейся в золотодобыче, — более «дружелюбным» к окружающей среде тиосульфатным выщелачиванием с предварительным бактериальным вскрытием породы экономически целесообразно и экологически безопасно.

42 Корякин В.С.**Что происходит с ледниками Северной Земли?**

Начиная с 30-х годов XX в. на Северной Земле работают гляциологи. В изучении динамики оледенения им на помощь приходит аэрофотосъемка — сначала с борта дирижабля, затем — с самолета. В 1970-х годах появляются первые космические снимки. Сегодня, используя все накопленные почти за 100 лет материалы, мы постараемся понять, как же все-таки изменяется площадь ледников этого полярного архипелага.

50 Алексеева Е.М.**Античные древности Анапы
Склепы в Горгииппии****Биография современника****64 Богданова С.Л.****Две жизни В.Ю.Гаврилова****Вести из экспедиций****70 Матишов Г.Г., Степаньян О.В.****Морские исследования у берегов Абхазии****Заметки и наблюдения****79 Анжелетт Дж.****Заповедные уголки Западной Австралии****84 Бонч-Осмоловская Е.А.****X Международный конгресс по экстремофилам****92 Новые книги****В конце номера****94 Портнов А.М.****Опасные дыры Земли**

CONTENTS:

3 Kraposhin V.S., Talis A.L.

Crystallography and Matter

A generalized crystallography, considered to be a structural application of the algebraic geometry based on the tetrahedral 7-vertex cluster as the unique building unit, allows to describe structures not only of crystals but also of liquids and biopolymers.

16 Bazykin G.A., Stefanov Yu.E.

Rapid Evolution of Flu: How Some Changes Entail the Others

Rapid evolution of the influenza virus complicates prevention and treatment of the disease. Computer analysis of amino acid sequences in viral proteins and of nucleotide sequences in viral genome revealed some regularities which may help to predict emergence of new epidemic and even pandemic flu strains.

23 Borodin P.M., Lisachev A.P.

Portrait of Young Y-chromosome

Since emerging of the male chromosome in mammals the unpleasant events began to happen to it leading to a steady decrease in its size. What this lonely Y-chromosome looked like at the very beginning of its evolutionary path? In search of answer to this question geneticists turned to aquarium fishes.

32 Gelfand M.S.

From Science to Online Games: a Collective Solution of Bioinformatics Tasks

In the field of bioinformatics there are many problems in which manual processing is the basic technique and it involves not a team of specialists but a large group of Internet users. There already present three communities that have tens of thousand of participants, solving complex scientific problems and actively exchanging ideas.

37 Sergeev A.V., Smolyaninov V.V.

New Technologies in Gold Mining

Replacement of cyanidation, still the most common technology of gold mining, by more environment-friendly thiosulfate leaching with preliminary bacterial opening of the rock, is economically reasonable and ecologically harmless.

42 Koryakin V.S.

What Happens to the Glaciers of Severnaya Zemlya?

Since 1930-es, glaciologists has been working at Severnaya Zemlya. To help them in the study of dynamics of glaciation, aerial photography was used, earlier from Zeppelins and later from airplanes. The first satellite photos appear in 1970-es. Now using all materials accumulated for almost 100 years we attempt to understand how indeed the area of glaciers of this polar archipelago changes.

50 Alekseeva E.M.

Ancient Antiquities of Anapa Crypts of Horhippia

Biography of Our Contemporary

64 Bogdanova S.L.

Two Lives of V.Yu.Gavrilov

Notes from Expeditions

70 Matishov G.G., Stepanyan O.V.

Oceanographic Studies at Abkhazia Shores

Notes and Observations

79 Angelett J.

Protected corners of Western Australia

84 Bonch-Osmolovskaya E.A.

The Tenth International Congress on Extremophiles

92

New Books

In the End of the Issue

94 Portnov A.M.

Dangerous Holes in Earth

Кристаллография и вещество



В.С.Крапошин, А.Л.Талис

*Он занимался кристаллографией.
Ни до него, ни после него я не видел
ни одного живого человека, который
бы занимался кристаллографией.*

Аркадий Аверченко. Белая ворона

Герой рассказа Аркадия Аверченко занимался кристаллографией и при этом не знал, зачем целоваться с девушками и откуда берутся дети. Рассказ написан и опубликован, когда уже были открыты не только федоровские группы, но и дифракция рентгеновских лучей кристаллами, а также определены первые кристаллические структуры. Описанная в «Природе» [1] драматическая борьба А.В.Шубникова внутри Академии наук против растворения кристаллографии в минералогии, химии и других областях знания, несомненно, отражает устойчивость выраженного известным писателем отношения (на уровне впечатления) к этой науке. Довольно забавно, что с настроениями «Белой вороны» можно столкнуться и сейчас, при наличии Международного союза кристаллографов и многочисленных кристаллографических журналов. Отчасти это связано с появлением веществ, структура которых вроде бы не вписывается в рамки традиционной кристаллографии. Справедливо ли последнее суждение?

Структура в традиционной кристаллографии

Квазикристаллы и фуллерены — яркие примеры «пропущенных» решений, эти новые физические объекты с группой симмет-



Валентин Сидорович Крапошин, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение» Московского государственного технического университета им.Н.Э.Баумана. Основные научные интересы — фазовые и структурные превращения в сталях, сплавах и магнитных материалах и их влияние на физические и механические свойства.



Александр Леонидович Талис, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института элементоорганических соединений им.А.Н.Несмеянова РАН. Занимается обобщенной кристаллографией, определением симметричных закономерностей строения биополимеров, а также структурных превращений в металлических и полупроводниковых кристаллах.

рии икосаэдра* не вытекают ни из каких физических теорий. Но это не значит, что для них нет теоретических обоснований — обоснования есть, просто они проигнорированы исследователями. Решения отбрасывают очень легко: «Группы симметрии икосаэдра не имеют физического интереса, так как не осуществляются в природе в качестве групп симметрии молекул» — написано в главе 12 (с.407) в издании 1963 г. третьего тома «Теоретической физики» [2]. В издании 1989 г., т.е. после открытия квазикристаллов и фуллеренов, сказано, что икосаэдрическая симметрия «реализуется в исключительных случаях» (исключения не определены). Еще одно пропущенное (а точнее, забытое на несколько тысяч лет) решение показано на рис.1.

* Икосаэдр — правильный многогранник с 20 треугольными гранями, имеет шесть «некристаллографических» осей симметрии пятого порядка.



Рис.1. Пример пропущенного решения. Вытесанные из камня платоновы тела (Эшмолловский музей искусства и археологии, Оксфорд) датируются поздним неолитом, на границе с бронзовым веком, т.е. примерно за 2500 лет до Платона, в честь которого они сейчас называются. Пять правильных (равнореберных) полиэдров изображены не в виде полиэдров с плоскими гранями, а собраны из сфер, центры которых и образуют привычные для нас правильные куб, тетраэдр, икосаэдр, додекаэдр, октаэдр. На канавки, соответствующие ребрам платоновых тел, наклеены бумажные полоски. Представление полиэдров в виде сфер моделирует либо структуру конденсированных фаз, либо будущие представления Кеплера о строении Солнечной системы.

Новые открытия заставили ученых вернуться к самым основам кристаллографии: что, собственно, она описывает, а что нет? Для многих современных физиков и материаловедов оказался неожиданным очевидный тезис: пространственные (федоровские) группы отображают симметрию разбиения трехмерного евклидова пространства на полиэдры (т.е. кристаллическую структуру вещества) лишь частично. Для описания структуры необходимо знать координаты вершин полиэдров, к которым «привязаны» атомы, федоровские же группы — набор матриц поворотов и сопряженных с поворотами переносов — координаты дать не могут. Поэтому разные разбиения (разные структуры) могут иметь одну и ту же федоровскую группу. В подавляющем числе металлов атомы (положительные ионы) находятся в вершинах некоторых из 14 возможных решеток Бравэ, и этот частный случай в течение многих десятилетий создавал иллюзию полного описания структур. Неслучайно важнейшее в кристаллохимии понятие структурного типа до сих пор не имеет строгого определения, а характеризуется набором атрибутов (пространственная группа, правильная система точек, размеры и форма элементарной ячейки, химическая формула). По умолчанию первичной в структуре считается бесконечная решетка, некое подобие многоквартирного дома, где в одинаковых однокомнатных квартирах располагается один и тот же набор мебели. Вот этот набор в традиционной кристаллографии ничем не определяется, ниоткуда не следует. Сама же квартира — элементарная ячейка — выбирается бесконечным числом способов, что ограничивает возможности этого понятия для построения физических теорий явлений в кристаллах. Но раз нет описания структуры, нет и описания ее превращения в другую структуру (полиморфного превращения). Значит, нельзя строго рассмотреть такое практически важное явление, как закалка стали: упрочнение стали (сплава желе-

за с углеродом) основано на переходе высокотемпературной модификации железа (с гранецентрированной кубической решеткой) в низкотемпературную модификацию (с объемноцентрированной кубической решеткой), где растворимость углерода намного ниже. Известны попытки создать симметричную теорию полиморфных превращений на основе соотношений группа-подгруппа [3]: группы симметрий фаз-партнеров по фазовому превращению являются подгруппами симметрии некоторой общей для них «высшей» прафазы (праматери). Проще говоря, превращение можно осуществить некоторой деформацией элементарной ячейки, например, куб слегка сжать или растянуть вдоль одного из ребер или диагонали и т.д. Так квадратные грани куба (четыре или все шесть) становятся прямоугольниками, ромбами или параллелограммами, и все это хорошо согласуется с экспериментом. Однако в кобальте и титане происходят превращения между кубической и гексагональными модификациями, а в классической кристаллографии квадрат можно деформировать в ромб или прямоугольник, но не в треугольник. Как быть в этом случае?

Новый подход

Из-за указанного фундаментального ограничения опирающейся на федоровские группы традиционной кристаллографии (неполного описания симметрии структуры) стали пытаться расширить ее симметричный базис. Пространственные группы — лишь одно из структурных приложений алгебраической геометрии, раздела математики, который решает геометрические задачи алгебраическими методами, естественно обратиться и к другим. Упрощая (и не искажая), можно сказать, что, поскольку геометрический объект представим аналитической функцией, симметричные преоб-

разования пространства можно описывать на языке решения алгебраических уравнений разных степеней. Решения этих уравнений (корни) дадут компоненты векторов, а концы векторов (координаты) будут соответствовать позициям атомов в структуре. Например, плоскости зеркального отражения, как и всякой плоскости, соответствует уравнение первой степени. Последовательное действие двух зеркальных плоскостей, образующих между собой некоторый угол α , называют произведением* этих плоскостей, для такой операции мы получаем уже квадратное уравнение, а сама она тождественна повороту на угол 2α . Понятно, что при описании результата действия нескольких плоскостей мы столкнемся с уравнениями более высоких степеней; нахождение их решений основано на перестановках коэффициентов уравнения. Это приводит нас к группам перестановок, которые могут быть и некристаллографическими. В традиционной кристаллографии допустимы повороты лишь на углы, совместимые с бесконечной решеткой, т.е. на 180, 120, 90 и 60 градусов. Некристаллографические перестановки могут осуществлять повороты на другие углы.

Аппарат алгебраической геометрии позволяет отобразить симметрию и конечных, и бесконечных систем точек и, следовательно, разработать симметричный аппарат для описания не только кристаллической структуры (структурных типов), но и для теории дефектов кристаллического строения и структурных фазовых переходов.

Конечно, кристаллографические группы — частный случай общей теории групп, и их можно рассматривать как группы перестановок. Например, если пронумеровать вершины равностороннего треугольника в порядке 1, 2, 3, его вращения вокруг центра на 120° будут соответствовать циклическим перестановкам вершин $123 \rightarrow 231 \rightarrow 312 \rightarrow 123$. Но расстояния между вершинами треугольника останутся неизменными — кристаллографические группы рассматривают только движения, сохраняющие расстояния между точками («жесткие движения»). Это важнейшее ограничение можно проиллюстрировать на примере куба, у которого, как известно, восемь вершин. Точечная кристаллографическая группа — набор поворотов и отражений, оставляющих неподвижной хотя бы одну точку, «видит» у этого полиэдра 48 элементов симметрии (48 матриц 3×3), а с учетом всех перестановок число элементов симметрии равно $8! = 40\,320$. Это, конечно, непрактично большое число для отображения симметрии структуры и поиска возможных превращений, но теория указывает путь выхода из этого безбрежного моря — надо рассматривать некристаллографические группы с гораздо меньшим коли-

чеством перестановок. Эти группы для описания реальных структур и их превращений как раз очень практичны (содержат вполне обозримое число элементов).

Французский математик Эварист Галуа в 1832 г. в письме перед смертельной для него дуэлью выделил четыре особые группы, состоящие из 12, 60, 336 и 660 матриц. Только одна из этих групп кристаллографическая, это группа поворотов тетраэдра из 12 матриц. Их можно использовать для описания как структур, так и превращения одной структуры в другую. Галуа искал общее решение уравнений любой степени n , которое определяется комбинацией численных коэффициентов уравнения. Чисел бесконечно много, соответственно бесконечно много их комбинаций, среди которых нужно было выделить те, что допускают решение уравнения. Галуа решил проблему необозримости бесконечного числового ряда очень простым способом: он предложил рассматривать не сами члены ряда, а остатки от их деления на некоторые простые числа, в частности, на 2, 3, 5, 7 и 11. Теперь алгебраическая конструкция, представляющая собой множество всех остатков $0, 1, \dots, p-1$ от деления натуральных чисел на простое число p , и законы сложения и умножения по модулю p , введенные для этого множества, называется полем Галуа $GF(p)$ порядка p [4]. При этом два числа, отличающиеся на величину p , считаются равными по модулю p ; например, 1 и 12 по модулю 11 равны. Минимальное поле Галуа порядка $p = 2$ состоит из 0 и 1.

Сначала мы покажем, как некоторые из этих конструкций можно использовать для описания структур, зайдя с «обратной стороны»: не будем записывать мебель в заранее заданные квартиры, а рассмотрим, какие кластеры из атомов (ионов) находятся в нашем распоряжении (это «мебель») и что из них будет складываться при объединении, как в детском конструкторе или в пазлах. Получится при сборке такого пазла кристаллографический дальний порядок (т.е. трехмерное периодическое чередование кластеров или их объединений, которое можно разрезать на повторяющиеся «квартиры») или не получится, нас будет интересовать во вторую очередь.

Складываем «пазлы» из тетраэдров

В качестве стартовой строительной единицы естественно рассмотреть тетраэдр, которому соответствует разбиение сферы на четыре треугольника (рис.2,а). Здесь каждую из четырех вершин связывают со всеми остальными одинаковые по длине непересекающиеся отрезки, поэтому, если каждая вершина — центр атома (иона), плотность упаковки вещества в таком изолированном тетраэдрическом атомном кластере составит 89%, что больше плотнейшей кристаллической (74%). Прикрепив к любой из граней первого тетраэдра второй, по-

* Последовательное действие элементов симметрии называют произведением условно, в другой формулировке теории групп его называют сложением.

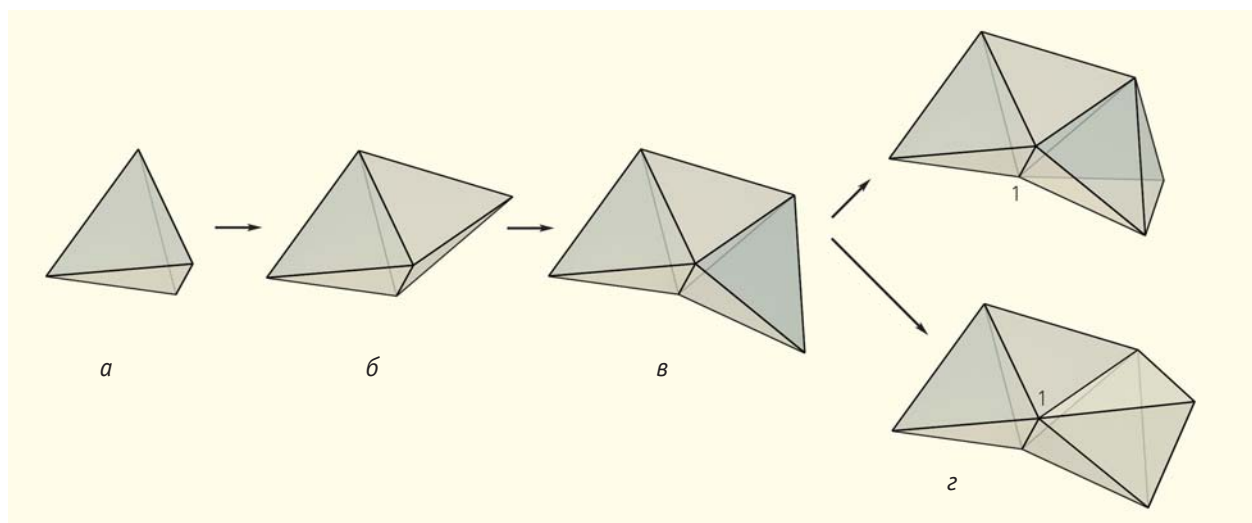


Рис.2. Объединение тетраэдра (а) с ему подобными по граням порождает фигуры с пятью (б), шестью (в) и семью (г) вершинами. Варианты объединения начинаются лишь с семи вершин: возможны левая (вверху) и правая (внизу) фигуры. Соответственно меняется положение точки 1, общей для четырех тетраэдров. В обоих случаях четвертый тетраэдр присоединяется к граням, которые не содержат ребра, общего для трех тетраэдров.

лучим конструкцию (бипирамиду), содержащую пять вершин (рис.2,б). Но для числа вершин 5 нет симметричной конструкции, отображающей два правильных тетраэдра с общей гранью как единый объект, здесь есть зеркальная плоскость симметрии (общая грань) и перпендикулярная этому зеркалу поворотная ось симметрии третьего порядка. Если нарушать условия равнорребности, раздвигая две вершины, находящиеся на общей оси симметрии фигуры, набор элементов симметрии фигуры (группа симметрии) не изменится (зеркало и поперечная ему тройная ось), хотя структура станет другой. Эти элементы отображает симметрию лишь частично, они не различают всех тригональных бипирамид, среди которых есть особый случай равнорребных тетраэдров с общей гранью. Прикрепление еще одного тетраэдра порождает шестивершинную фигуру из трех тетраэдров (рис.2,в), но имевшуюся симметрию разрушает: зеркальная плоскость изменила положение (содержит общее ребро трех тетраэдров), поворотной оси теперь нет. Когда же мы добавим седьмую вершину (четвертый тетраэдр, рис.2,г), скачком возникает некристаллографическая симметрия, т.е. симметрия, не сохраняющая решетку. Совместимость с решеткой характеризуется определенным разбиением сферы.

Сфера — самая симметричная фигура. Через ее центр проходит бесконечное число поворотных осей симметрии: сфера совмещается с собой при повороте относительно центра на любой угол. Симметрия показанных на рис.1 правильных полиэдров определяется разбиением сферы вершинами полиэдров (центрами каменных шариков на рис.1) на равные части, в котором каждая часть одинаково окружена такими же соседними (пра-

вильное разбиение). Это получается только для треугольников, квадратов и пятиугольников. Фуллерены и нанотрубки — графитовые (шестиугольные) сетки — заставили думать о симметрии разбиения поверхности на шестиугольники. Поскольку правильно разбить сферу на шестиугольники нельзя, сферическая молекула фуллерена C_{60} включает 12 пятиугольников и 20 шестиугольников. Однако на шестиугольники правильно разбивается помимо плоскости (структура графита) еще и поверхность тора (бублика). Для тора такое разбиение состоит минимально из семи шестиугольников, имея 14 вершин, 21 одно ребро и обладая группой симметрии из некристаллографического числа 42 элементов (подгруппа одной из упомянутых выше групп, выделенных Галуа). Это число гораздо меньше, чем число 14!. Шестиугольники графита обусловлены направленностью химических связей отдельного атома углерода. Нас в первую очередь интересуют металлургические структуры, когда валентные усилия единичного иона равномерно распределены по сфере, что ближе к разбиению тора на треугольники. Поставим в центре каждого шестиугольника точку, соединим эти точки кратчайшими линиями на поверхности (геодезическими линиями) и отбросим вершины исходных шестиугольников. Полученное правильное разбиение тора на треугольники называется дуальным по отношению к исходному и имеет ту же группу симметрии. У дуальных фигур число ребер одинаково, а число вершин одной фигуры равно числу граней другой. Взаимно дуальны также пары куб-октаэдр и икосаэдр-додекаэдр. Соответственно, в полученном нами правильном разбиении тора на треугольники имеется 7 вершин и 14 треугольников, и каждая вершина,

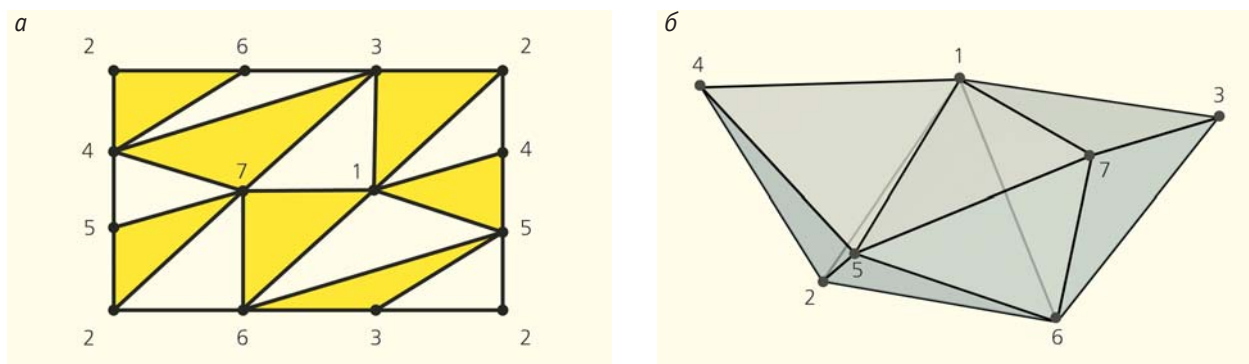


Рис.3. Симметрия поля Галуа минимального порядка $p=2$ порождает новую симметрию: на поверхности тора семь вершин располагаются так, что каждая точка связана со всеми остальными шестью равными непересекающимися отрезками кривых (а). Окрашенные треугольники определяют все точки разбиения тора. Разрез тора по малой окружности (точки 2, 4, 5) и выпрямление дают цилиндр, разрез которого по образующей (точки 2, 3, 6) порождает показанный прямоугольник. Точки с одинаковыми номерами на разных сторонах разреза на торе тождественны, соответственно, легко убедиться, что каждая из семи точек связана с остальными шестью. Наложение условия равноразности на расстояния между точками позволяет собрать семивершинник из четырех тетраэдров с общей вершиной 1 (б).

как и в тетраэдре, связана с шестью остальными равными непересекающимися отрезками.

На рис.3,а показана развертка триангулированной (разделенной на треугольники) поверхности тора семью равноотстоящими друг от друга точками (стороны прямоугольника — края двух разрезов тора). Каждой вершине разбиения присвоен номер. Номера вершин от 1 до 7 разбиты на тройки в соответствии с нумерацией вершин 14 треугольников, поэтому разбиение 7 чисел на тройки перестает быть произвольным, оно определяется симметрией разбиения тора на треугольники. Чтобы задать данный вариант нумерации вершин 14 треугольников, достаточно выделить только семь троек. Это похоже на разбиение обычной шахматной доски: нам достаточно определить вершины квадратов только одного цвета, тем самым устанавливаются и вершины квадратов другого цвета. Показанное на рис.3 разбиение на 14 фигур можно считать треугольной шахматной доской, и, определив треугольники через один (т.е. взяв только 7 троек), мы определим все 14. Любая пара треугольников из выделенной семерки (на рис.3,а они окрашены) имеет лишь одну общую вершину, и каждая вершина принадлежит трем соседям. Тогда симметрии полученного разбиения однозначно соответствует симметрия перестановок из семи чисел по три, когда каждое число принадлежит трем тройкам, каждые две тройки имеют только одно общее число, каж-

дая пара чисел принадлежит только одной тройке — все это хорошо видно на рис.3,а. Описанная здесь симметрия определяется законами сложения и умножения чисел минимального поля Галуа, когда $p=2$. Показать это можно следующим образом.

Нумерация вершин треугольного разбиения тора с рис.3,а произвольна, ее можно менять, но не любым образом, а только в соответствии с перестановками выше симметричными соотношениями. Мы можем обозначить каждый треугольник семизначными номерами: 1230000, 1004500, 1000067, 0204060, 0200507, 0034007, 0030560, где отличные от нуля цифры означают номера вершин, принадлежащих данному треугольнику. Если представить нумерацию вершин разбиения в виде таблицы кодировки номеров вершин (рис.4), сра-

а							б						
•	•	•					•	•	•				
•			•	•					•	•	•		
•					•	•			•			•	•
	•		•			•		•			•		
		•		•		•		•		•		•	
			•	•		•	•			•		•	
			•		•	•			•	•			
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7

Рис.4. Таблица кодировки вершин треугольников правильного разбиения тора с рис.3,а (а). Номер столбца показывает номер вершины, значки в каждой строке указывают номера вершин, принадлежащих данному треугольнику. Взаимная перестановка номеров 1 и 3 меняет всю таблицу, т.е. меняет номера вершин в треугольниках разбиения (б).

зу станут видны перечисленные симметричные соотношения и возможные перестановки номеров. В этой таблице каждый столбец соответствует номеру вершины на рис.3, а в каждой строке значки указывают номера вершин одного из семи треугольников.

Теперь просто «глазами» видно, что любая вершина принадлежит трем треугольникам (в каждом столбце только три знака) и любые две строки пересекаются по одному столбцу (любые два треугольника имеют общую вершину). Смене нумерации вершин соответствует перестановка столбцов. Например, если сменить номер 1 на номер 3 и наоборот, мы должны будем переставить столбцы 1 и 3, и в соответствии с этой перестановкой поменяются номера вершин, входящих в треугольники (рис.4,б).

Таблицу на рис.4,а мы построили, глядя на чертеж разбиения тора на рис.3, но ее можно составить и без чертежа, поскольку такое разбиение семи символов на семь троек однозначно определяется минимальным полем Галуа порядка 2. Поле Галуа, как было сказано, включает два числа 0 и 1 и законы их сложения и умножения по модулю 2 (показаны в виде таблиц на рис.5). Видно, что таблица сложения разбивается на две диагонали, образованные соответственно нулями и единицами. Таблица сложения кодируется двумя таблицами, где вместо нуля и единицы ставится единый значок (рис.5,б).

Вот уже эти маленькие таблички с количеством ячеек 2×2 складываются в общую таблицу 7×7

а

	сложение		умножение	
	0	1	0	1
0	0	1	0	0
1	1	0	0	1

б

для единиц		для нулей	
	●	●	
●			●

Рис.5. Таблицы сложения и умножения поля Галуа порядка 2 (а) и кодировка таблицы сложения (б).

ячеек (рис.4,а). «Юго-восточная» часть таблицы на рис.4,а размером 4×4 ячейки складывается так: вместо каждого нуля таблицы умножения ставится вся кодированная ячейка нулей 2×2 на рис.5,б, вместо единственной единицы таблицы умножения ставится вся кодированная ячейка единиц 2×2 . Остальные знаки таблицы 7×7 ставятся в соответствии с некоторыми теоремами конечных геометрий [5]. Собственно, и сборка «юго-восточного квадрата» 4×4 , описанная здесь как инструкция к детскому конструктору, — продукт цепочки теорем [5].

Такие таблицы называются таблицами инцидентности (принадлежности) числа к определенной тройке, а поставленные нами в ячейках значки — знаками инцидентности данной точки (номера столбца) прямой (номер строки). Прямая в данном случае может быть и ломаной, в нашем случае это треугольник. Таблицы инцидентности широко используются в разделе математики «конечные геометрии» [5], рассматривающем особые взаимные расположения точек и прямых (конфигурации). На самом деле использованное здесь правильное треугольное разбиение поверхности тора было найдено именно в форме таблицы инцидентности, а уже по ней построен чертеж. Конечные геометрии обобщают обычные многоугольники и многогранники: треугольник можно рассматривать как конфигурацию из трех точек и трех прямых, когда через каждую точку проходят две прямые и на каждой прямой лежат две точки. Такое обобщение позволяет рассматривать точки не только на сфере, но и, например, на торе, что мы и использовали.

Число вершин нашего симметричного разбиения (некристаллографического) задается числом элементов p поля Галуа через соотношение $N = p^2 + p + 1$, что и дает 7 при $p = 2$. Тор — это сфера с ручкой (можно сравнить ее с гирей цирковых силачей — в пределе шарообразная часть гири сдвигается до состояния ручки и две слитые вместе ручки сложатся в бублик-тор). Оторвав ручку, получим сферу и от правильного семивершинного разбиения тора на 14 треугольников с 21 ребром перейдем к неправильному семивершинному разбиению сферы на 10 треугольников с 15 ребрами. При этом выполняются соотношения Эйлера, связывающие числа вершин, ребер и граней разбиений: $7 - 21 + 14 = 0$ для тора и $7 - 15 + 10 = 2$ для сферы. Эти 10 треугольников и определяют семивершинное объединение четырех правильных тетраэдров с общей вершиной, показанное на рис.2,г. Именно связь данного семивершинника с минимальным полем Галуа порядка 2 позволяет считать его элементарной строительной единицей всех тетраэдрических, т.е. металлоподобных, структур. Надо заметить, что семивершинная фигура на рис.2,г обладает хиральностью (может быть левой или правой). Мы можем собирать бесконечные структуры по единому закону,

объединяя семивершинники одной хиральности (правый с правым или левый с левым) по единственной свободной грани, не содержащей общей для четырех тетраэдров вершины 1. Соединив при этих условиях два семивершинных объединения тетраэдров, получим 11-вершинную спиральную упаковку восьми правильных тетраэдров (рис.6). Она может быть продолжена в обе стороны до бесконечности, будучи при этом непериодической: ни один из атомов вдоль оси спирали не займет положения точно над первым атомом. Тетраспираль на рис.6 служит примером некристаллографического дальнего порядка, который, в противоположность кристаллографическому, реализуется лишь в одном направлении. Можно продолжить заполнение пространства тетраэдрами, присоединив два тетраэдра по незанятым граням, сходящимся в общей точке 1 (рис.7,а). Правда, мы тут же сталкиваемся с проблемой: физический принцип минимума энергии не может преодолеть геометрического ограничения — когда двугранный угол тетраэдра (70.53°) не равен $2\pi/5$, пять правильных тетраэдров с общим ребром оставляют щель и кристалла с минимумом энергии межатомного взаимодействия не получается.

Оставшуюся щель можно закрыть деформацией ребер тетраэдров, как это происходит в металлических сплавах, когда некоторые вершины заселяются атомами другой химической природы, т.е. другого диаметра. Именно поэтому во многих металлических сплавах кристаллическая структура содержит в качестве строительных единиц икосаэдры (рис.7,б), которые порождаются объединением у общего ребра по пять тетраэдров, соответственно по 20 тетраэдров у одной общей вершины. Надо отметить, что изображенный на рис.7,б икосаэдр правильный, т.е. имеет 20 правильных треугольных граней, по пять вокруг каждой вершины. Но собран он из неправильных тетраэдров, поскольку общая (центральная) вершина может быть заселена лишь сферой с диаметром на 10% меньшим, чем сферы, заселяющие 20 вершин икосаэдра. Поэтому в металлических сплавах в центре или в вершинах икосаэдра обычно размещается атом другого сорта, например в химических (интерметаллических) соединениях типа Nb_3Sn , Al_3W (Sn и W в центре), иногда атомы дру-

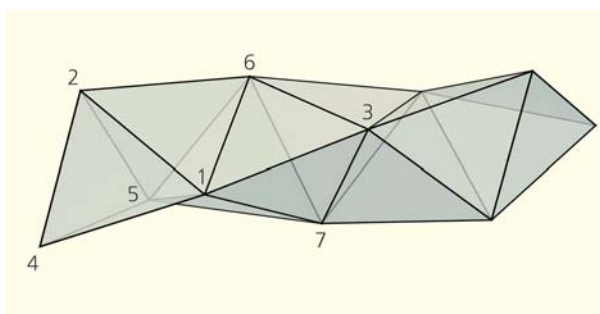


Рис.6. Присоединение к грани 3-6-7 тетраэдрического семивершинника второго такого же порождает спиральную укладку 8 тетраэдров с 11 вершинами. Эта укладка может быть продолжена в обе стороны до бесконечности (спираль Бьёрдийка—Кокстера), при этом ни одна вершина вдоль оси спирали не окажется точно над первой. В четырехмерном политопе из тетраэдров эта спираль обладает симметрией дробной оси $30/11$ и замыкается в петлю.

го сорта частично заселяют вершины икосаэдра, как в $MgCu_2$, $MgZn_2$ (так называемые фазы Лавеса) [6].

Мы же хотим определить возможности объединения правильных тетраэдров (с вершинами, заселенными атомами одного сорта), и выяснить, какие структуры при этом получаются.

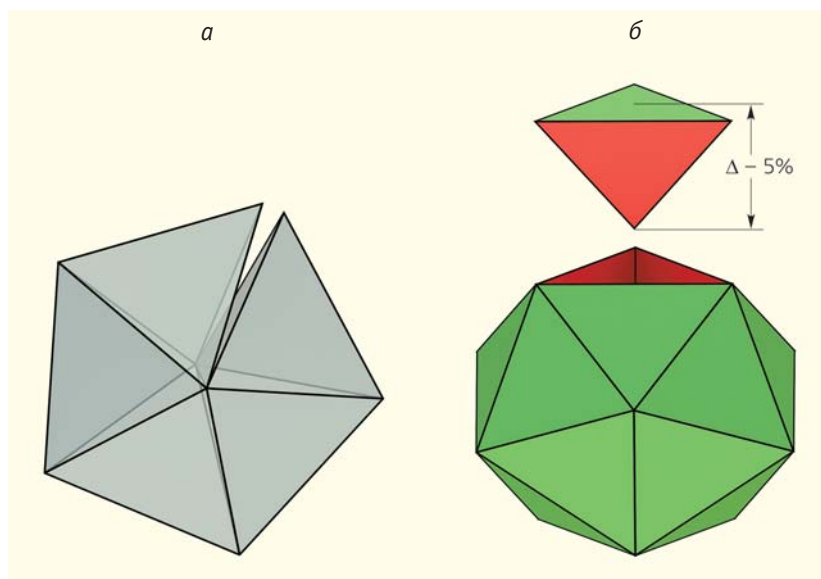


Рис.7. При сборке пяти тетраэдров вокруг общего ребра (а — вариант, не использованный на рис.2) остается зазор в 7.35° , поскольку угол между гранями тетраэдра не равен 72° . Сборка кристалла при условии минимума энергии межатомного взаимодействия невозможна в принципе из-за метрики нашего пространства (теоремы Пифагора). Правильный икосаэдр (б), собранный из равноресных треугольников (по пять в каждой вершине), можно разделить на 20 тетраэдров с общей вершиной в центре икосаэдра (в центре сферы, на которой располагаются все вершины правильного икосаэдра). Эти 20 тетраэдров неправильные (неравноресные): на рисунке вершина правильного внутреннего тетраэдра не совпадает с центром икосаэдра.

Поднимаемся в четвертое измерение

Заполнить плоскость правильными пятиугольниками нельзя, поскольку три пятиугольника с общей вершиной оставляют щель с углом 36° (рис.8,а). Однако, если выйти из плоскости, т.е. повысить размерность пространства с двух до трех, из плоской развертки пятиугольника при вращении каждой грани (куска плоскости) вокруг ребра получится трехмерное платоново тело — додекаэдр, в котором пятиугольники уложены без зазоров (рис.8,б).

Повысим размерность пространства на единицу еще раз — сделаем его четырехмерным. Тогда можно кусок трехмерного пространства повернуть, не деформируя ребра тетраэдров, заполнить щель и получить укладку правильных тетраэдров, подобно предыдущему примеру с вращением части плоскости при получении додекаэдра. Поэтому с 80-х годов прошлого века для описания атомной структуры конденсированных фаз стали использовать особые конструкции алгебраической геометрии — четырехмерные полиэдры, называемые политопами (от греч. «многоточечники») [7, 8]. В политопной концепции первична сборка трехмерных полиэдров (атомных кластеров), при этом бесконечная трехмерно периодическая ре-

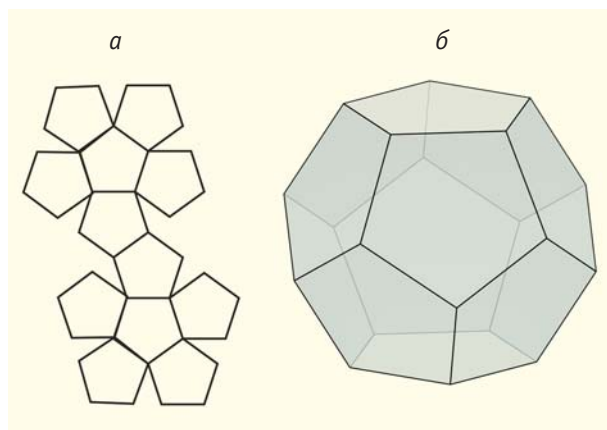


рис.8. Из двумерной плоскости вырезаем 12 пятиугольных кусков (а), вращаем эти куски вокруг общего ребра, используя третье измерение, т.е. выходим из двумерного пространства, закрываем зазоры между пятиугольниками и получаем замкнутую фигуру из правильных (равнобедренных) пятиугольников без зазоров — додекаэдр (12-гранник) с 20 вершинами на сфере (б). У этого платонова тела столько же вершин, сколько граней у икосаэдра (рис.7), и столько же граней, сколько вершин у икосаэдра (дуальные фигуры). Подобно этой сборке, зазоры между первым и пятым тетраэдрами на рис.7 можно закрыть, вращая кусок трехмерного пространства относительно общей плоскости, такое вращение возможно при наличии дополнительного, т.е. четвертого, измерения. При повороте зазор закрывается без нарушения равнобедренности, все тетраэдры остаются правильными.

сетка может возникнуть, а может и нет. Все полиэдры (многогранники) образованы плоскими фигурами — многоугольниками (полигонами), объединенными по ребрам. Подобно этому, правильные политопы сложены объединением правильных трехмерных полиэдров по общим граням [7]. Правильный тетраэдр порождает три политопа (соответственно, по три, четыре или пять тетраэдров вокруг общего ребра), октаэдр, куб и додекаэдр — по одному, поэтому правильных политопов не пять, а шесть. Политопы можно изобразить в виде трехмерных проекций, на рис.9,а показана аксонометрическая проекция четырехмерного куба. Хорошо видно, что он состоит из восьми кубов, два из них представлены неискаженными кубами разного размера, у остальных шести по четыре грани при проектировании исказились до трапеций. Вершины всех правильных политопов принадлежат трехмерной сфере, которая может существовать в пространстве с размерностью не менее четырех, подобно пустой двумерной сфере, существующей в трех- (или более) мерном пространстве. На рис.9,б показана трехмерная проекция трехмерной сферы. Видно, что это объединение коаксиальных торов.

При сборке правильных тетраэдров по пять вокруг общего ребра получается четырехмерный аналог икосаэдра, имеющий 120 вершин, принадлежащих 600 правильным тетраэдрам. Он особенно важен для описания металлических структур, составленных из тетраэдров. Надо обратить внимание, что каждая из 120 вершин служит центром правильного икосаэдра. Собирая этот политоп из правильных тетраэдров, мы далеко от симметричных конструкций минимального поля Гаула ($p = 2$) не ушли. Семивершинник из четырех тетраэдров, порожденный этой конструкцией, можно объединить с еще четырьмя такими же вдоль оси этой спиральной упаковки и получить правильный икосаэдр с рис.7,б. Общая точка четырех тетраэдров каждого семивершинника становится общим центром икосаэдра (в трехмерном пространстве тетраэдры деформируются). Если сборку выполнить в четырехмерном пространстве, этот икосаэдр будет объединять 20 правильных тетраэдров. Можно сказать, что икосаэдр разделяется на пять тетраэдрических семивершинников, как апельсин на дольки. Как говорилось, семивершинник можно продолжать вдоль его оси в обе стороны, но в пространстве трехмерной сферы этот процесс не будет бесконечным, поскольку вершины политопа располагаются на ней и исходная грань первого тетраэдра совпадает с последней гранью 30-го тетраэдра, т.е. спиральная упаковка тетраэдров, или тетраспираль, замкнется. При этом все 30 вершин такой замкнутой равнобедренной тетраспирали будут размещены на поверхности тора, а все 120 вершин четырехмерного аналога икосаэдра распределяются по четырем таким торам.

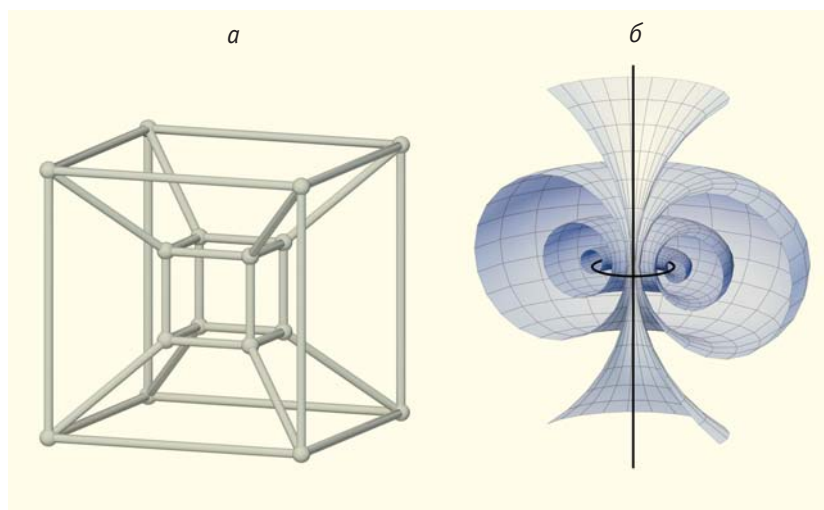


Рис.9. При объединении трех кубов вокруг общего ребра остается зазор в 90° . При наличии четвертого измерения этот зазор закрывается поворотом куска трехмерного пространства и образуется четырехмерный куб (а). Это четырехмерное платоновое тело имеет 16 вершин и собрано из 8 кубов. Два concentрических куба (большой и малый в центре) при проектировании сохранили равнорребность, остальные шесть видны у нас в трехмерном пространстве с искажениями четырех боковых граней до трапеций. У каждого ребра объединены по три куба, в четырехмерном пространстве все кубы правильные, их вершины принадлежат трехмерной сфере. При проектировании трехмерной сферы из четырехмерного пространства в трехмерное (б) видно, что это соединение коаксиальных торов.

Новые симметрии

Показанные спиральные упаковки тетраэдров возникают благодаря элементам симметрии политопа, которые теория кристаллографических групп «не видит» (пропускает). Так, для политопов наряду с обычными кристаллографическими поворотными осями порядков $n = 2, 3, 4$ и 6 допустимы и нецелочисленные винтовые поворотные оси порядков $n = p/q$, где p, q — взаимно простые числа. Эти оси описывают симметрию укладки шаров одинакового диаметра в одномерные спиральные цепочки: поворот на угол $360 \cdot q/p$ и сдвиг вдоль этой оси. Показанная выше сборка спирали из тетраэдрических семивершинников соответствует винтовой поворотной оси $30/11$ четырехмерного аналога икосаэдра. Соответствующий угол поворота равен в политопе $360 \cdot 11/30 = 132^\circ$, а два таких последовательных поворота реализуют вращение на 264° или на 96° в другую сторону. Конечно, 96° — «некристаллографический» угол поворота (несовместимый с трехмерной периодичностью), и вся бесконечная спиральная упаковка состоит из правильных тетраэдров, «извлеченных» из четырехмерного политопа, что тоже не годится для кристалла. Но незначительной деформацией ребер тетраэдров этот угол можно изменить до «кристаллографического», в 90° . Например, можно нарушить равнорребность тетраэдров в каждом семивершиннике таким образом, чтобы пер-

вый и третий тетраэдры оказались относительно друг друга в зеркальном положении и при этом сохранили равнорребность (рис.10,а). Тогда каждая пара зеркально сопряженных тетраэдров в цепочках на рис.10,б дополняется октаэдром, и мы получаем спиральную укладку октаэдров (рис.10,в). Если размножить эти спиральные упаковки октаэдров трансляциями по какой-либо двумерной решетке, например по квадратной (рис.10,б), получим трехмерно-периодическую кристаллическую структуру. Именно такая спираль кислородных октаэдров образует кристаллическую структуру анатаза (TiO_2). Оказалось, что совокупность всех вершин бесконечной гранецентрированной кубической решетки из атомов одного сорта (рис.10,г) тоже разбивается на такие октаэдрические спирали, не имеющие общих вершин. Мы видим, что даже базовая для кристаллографии трехмерно-периодическая кубическая плотнейшая упаковка — гранецентрированная кубическая решетка — определяется подструктурой четырехмерного аналога икосаэдра (рис.7).

Другой набор деформаций ребер этой тетраэдрической спирали позволяет размножать ее трансляциями по двумерной квадратной решетке, и мы получаем кристаллическую структуру соединения BaCd_{11} , в которой параллельные спиральные упаковки кадмиевых тетраэдров ориентированы вдоль тетрагональной оси решетки. Эксперимент показывает, что тетраспираль можно транслировать не только по двумерной, но и по трехмерной кубической решетке, и тогда воспроизводится структура кубической β -модификации марганца. В данном случае необходимые деформации ребер достигаются заселением вершин тетраэдров ионами марганца разной валентности в отношении 12:8 (20 атомов на элементарную ячейку). Фактически это химическое интерметаллическое соединение двух марганцев разной валентности $\text{Mn(I)}_2\text{Mn(II)}_8$. Упаковка тетраэдрических спиралей вдоль трех направлений, перпендикулярных граням куба в структуре β -модификации марганца (с пересечением по общим тетраэдрам), приводит к дополнению незанятых граней до полного икосаэдра, и мы в этой структуре можем выделить также спиральную упаковку икосаэдров. Разумеется, в реальной структуре эти икосаэдры неправильные: ребра имеют разную длину, поскольку вершины икосаэдра заняты иона-

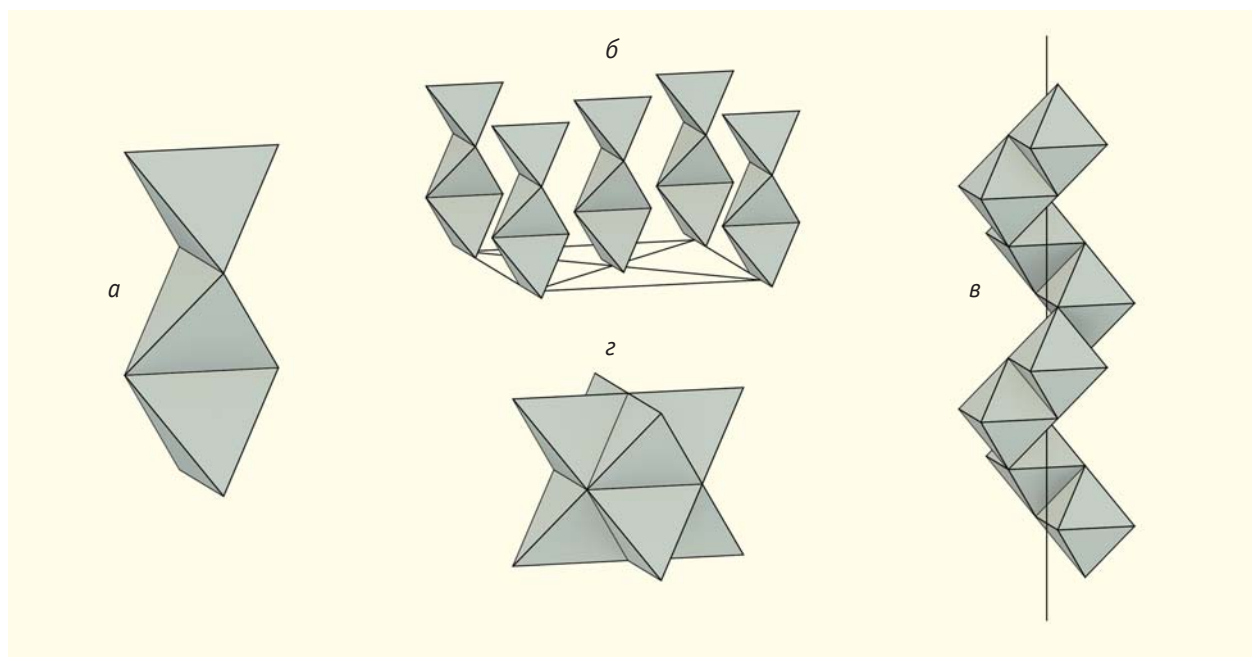


Рис.10. Растягивая свободное ребро каждого четного тетраэдра в цепочке на рис.3, переводим нечетные тетраэдры с общим ребром во взаимно-зеркальное положение (а). Эти цепочки можно размножать по двумерной решетке центрированных квадратов (б). Углубление между двумя тетраэдрами заполняется без зазоров октаэдром, что порождает спираль из октаэдров (в). На такие непересекающиеся (не имеющие общих вершин) спирали может быть разбита кубическая гранецентрированная упаковка (г), в которой на каждой грани каждого октаэдра стоит тетраэдр.

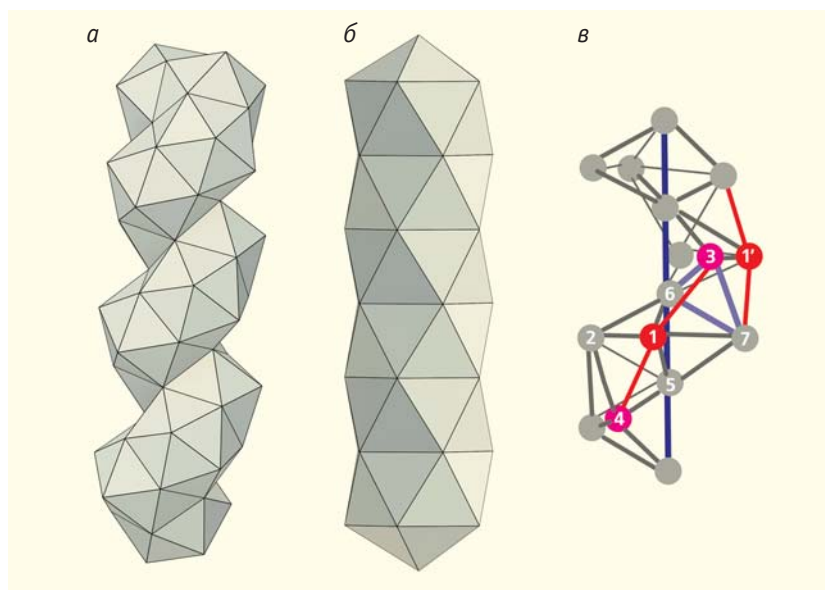


Рис.11. Поместив в каждую вторую вершину спирали 30/11 на рис.3 центр правильного икосаэдра, получим спиральную укладку икосаэдров (а). Последовательность всех четных (нечетных) вершин спирали 30/11 соответствует спирали 15/4, их в спирали 30/11 две. Вдоль оси 10_1 политопа выделяется прямолинейная укладка икосаэдров (б), из которой можно выделить 40-вершинное объединение правильных тетраэдров с общей винтовой осью $10/3$ (показана синим цветом, в). Эта ось действует на семивершинник с общей для четырех тетраэдров вершиной 1, переводя его в следующий семивершинник с общей вершиной $1'$. Два семивершинника объединены по грани 3-6-7.

ми марганца разной валентности. На рис.11 показана сборка спирали из правильных икосаэдров, «извлеченных» из четырехмерного аналога икосаэдра. Как было сказано выше, каждая вершина этого политопа окружена 12 вершинами правильного икосаэдра. Спиральную упаковку икосаэдров на рис.11 можно получить не только достройкой тетраэдрической спирали 30/11, но и воспользовавшись другим элементом симметрии политопа — уже упомянутой поворотной нецелочисленной осью $15/4$. Этой осью связаны между собой каждая вторая вершина спирали 30/11 на рис.4. Естественно, остальные (нечетные) вершины 30/11 также будут связаны осью $15/4$. Спиральная упаковка икосаэдров на рис.11 получается, если каждую вершину спирали $15/4$ назначить центром правильного икосаэдра. Угол поворота оси $15/4$ равен $(360:15) \cdot 4 = 96^\circ$. Деформация ребер превращает эту ось в винтовую ось четвер-

того порядка в кристаллической структуре β -Mn с углом поворота 90° .

Не нужно думать, что кристаллическая структура β -Mn — нечто экзотическое. Во многих нержавеющих жаропрочных сталях в объеме основного металла присутствуют маленькие кристаллы (упрочняющие частицы) именно с такой структурой (так называемые «вторые фазы»), эту структуру имеют также и многие соединения разных металлов, и даже карбиды металлов. Интересно, что такую же икосаэдрическую спираль образуют ионы иода в кубической структуре суперионного проводника RbAg_4I_5 . Положительные ионы Ag^+ дрейфуют вдоль оси иодной спирали, обеспечивая высокую ионную проводимость этого соединения при комнатной температуре. Геометрическое подобие спиралей в структуре металлических кристаллов и ионного проводника наводит на мысль о том, что геометрия первична в отношении типа кристаллической структуры по сравнению с физической природой химической связи (электронной структурой). На то же указывает структура кристалла твердого кислорода $\beta\text{-O}_2$ типа A15 (как у сверхпроводника Nb_3Sn). Это удивительное явление: при одних и тех же температуре и давлении электронная плотность у одной части молекул O_2 распределена шарообразно, а у другой — в виде сплюснутых эллипсоидов вращения (приблизительно дисков). Сферические молекулы кислорода выстраиваются в бесконечную кубическую объемноцентрированную решетку (как у вольфрама), а диски укладываются друг на друга в стопки, ориентированные по трем направлениям декартовых осей вдоль граней куба. Мы видим, что распределение электронной плотности подстраивается под законы геометрии (симметрию и строение четырехмерных политопов). Структура типа A15 выводится из четырехмерного аналога икосаэдра выпрямлением его фрагментов (цепочек икосаэдров вдоль определенных осей симметрии политопа) [9]. Хорошо известная структура γ -латуни совпадает по строению с фрагментом трехмерной проекции четырехмерного аналога икосаэдра (пересечение четырех икосаэдров по общему тетраэдру) [10]. Совпадение подструктур кристаллических структур с фрагментами политопов весьма распространено, так как многие из этих структур выводятся из политопной конструкции. На рис.11,б показан другой вариант объединения икосаэдров — в прямолинейную цепочку по общей оси пятого порядка. В четырехмерном политопе это винтовая ось 10-го порядка, и бесконечный икосаэдрический стержень замыкается в тор с 60 вершинами. Разумеется, в трехмерном пространстве этот стержень собирается из неправильных тетраэдров, хотя наружные ребра на поверхности стержня одинаковы. Если мы захотим выделить из этого стержня максимальную упаковку правильных тетраэдров, то получим их 40-вершинное спиральное объединение (рис.11,в). Ось

этого стержня обвивается семивершинниками из рис.2 и 3, объединяемых по общей грани 3-6-7. В данном случае ось 40-вершинника — винтовая ось $10/3$, и весь стержень — результат размножения семивершинного объединения четырех тетраэдров этой осью, т.е. поворотом на угол $(360:10) \cdot 3 = 108^\circ$ и смещения вдоль оси.

Показанные на рис.11 конструкции, выделенные в четырехмерном тетраэдрическом политопе, представляют собой шаблоны для построения ряда кристаллических структур неорганических веществ. Мы видим, что использование политопной концепции позволяет математически выводить структурные типы, а не рассматривать их один за другим, как животных в клетках зоопарка. Это относится вообще к структурам конденсированных фаз (кристаллических, некристаллических, жидких). Геометрическая задача проектирования фрагментов политопа эквивалентна задаче проектирования контуров земных континентов на плоскую географическую карту, поскольку вершины политопов расположены на трехмерной сфере. Понятно, что при проектировании к нам, в трехмерное евклидово пространство, кусок четырехмерного политопа надо выпрямлять (как и при построении географических карт), такое выпрямление по Нельсону [11] выполняется введением дисклинаций (дефектов) — дисклинация меняет число ребер, сходящихся в вершине, соответственно меняется кривизна поверхности, на которой располагаются вершины политопа. В икосаэдре все вершины пятикратные (общие для пяти ребер). Уменьшение числа сходящихся в одной вершине ребер до четырех порождает полиэдры Бернала, увеличение до шести — полиэдры Франка—Каспера, т.е. практически все строительные единицы, из которых складывается структура кристаллических неорганических веществ.

Вариант некристаллографического дальнего порядка на рис.6 можно рассматривать как модель строения металлической жидкости и металлических стекол. Будучи сложной только из тетраэдров, эта спираль соответствует плотности упаковки, по крайней мере соизмеримой с кристаллической, что может объяснить высокую относительную плотность металлических жидкостей и металлических стекол (аморфных металлических сплавов) в 71—73% (расчетная плотность хаотической плотной упаковки — в лучшем случае 64—66%). Сейчас известны металлические стекла системы Pd-Cu-P, плотность которых выше плотности соответствующего кристаллического сплава-аналога. Ранее мы применили подобные представления для описания процесса плавления металлов как перехода от кристаллографического (трехмерного) к некристаллографическому (одномерному) дальнему порядку [12]. Оказалось, что такой подход позволяет «из первых принципов» вычислить тепловой эффект плавления металлов в очень хорошем согласии с экспериментом. Появление жидкотекучести при

этом оказывается следствием механической эйлеровой неустойчивости длинных тетраэдрических стержней, а приблизительное сохранение плотности (иногда увеличение) и других физических характеристик при плавлении обусловлено сохранением тетраэдрической упаковки, свойственной металлическому твердому состоянию. Если принять, что металлические жидкости и металлические стекла представляют собой упаковку таких плотных полимерных цепочек, получим естественное объяснение магнитной анизотропии металлических стекол, а также гигантскую магнитострикцию* аморфного металлического сплава $TbFe_2$, на два три порядка превышающую магнитострикцию обычных ферромагнетиков.

Итак, определенные кристаллические и некристаллические структуры можно выводить из четырехмерного аналога икосаэдра, вытягивая из него, как пряжу, объединения тетраэдров вдоль разных осей симметрии этого политопа, обязательно включая нецелочисленные оси. Объемноцентрированную кубическую кристаллическую структуру (структурный тип вольфрама) можно полу-

* Магнитострикция — удлинение ферромагнитного тела под действием магнитного поля.

чить, выпрямляя другой четырехмерный политоп — собранный объединением октаэдров по три вокруг общего ребра. В этом нетрудно убедиться, разбив структуру вольфрама на октаэдры (деформированные, естественно).

Кристаллографический почерк биополимеров

Расширение симметричного базиса кристаллографии с включением политопной концепции позволило установить закономерности в строении кристаллических структурных типов, а также сформулировать концепцию некристаллографического дальнего порядка, включив тем самым в описываемые кристаллографией объекты металлические жидкости и металлические стекла. Общий вывод возможных нецелочисленных поворотных осей был дан в работе [13]; позднее было показано, что тот же подход позволяет объяснить строение биополимеров типа α -спирали и некоторых видов ДНК [14].

Складывая два тетраэдрических семивершинника по треугольной грани, не содержащей точки 1, мы получили тетраэдрическую спираль на

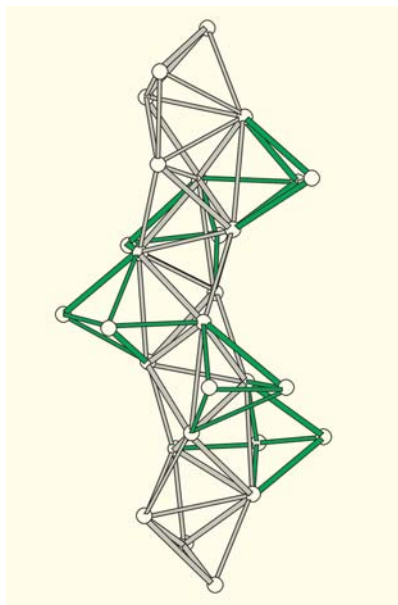


Рис.12. Тетраэдры, граничащие с тетраэдрической спиралью Бьёрдийка—Кокстера (рис.6), образуют обвивающую ее спираль. Дополнительные по отношению к рис.6 ребра показаны зеленым.

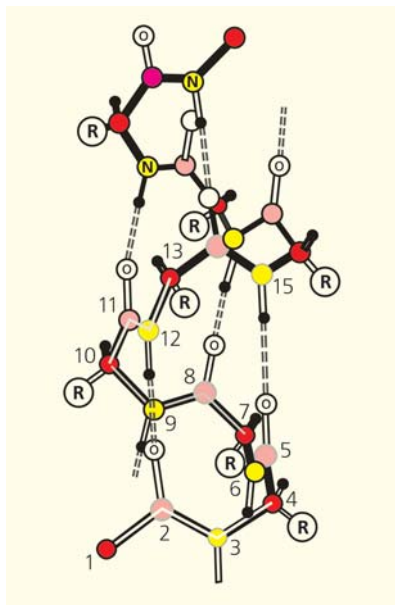


Рис.13. Структура α -спирали (данные эксперимента). Боковые группы обозначены буквой R, водородная связь показана пунктиром [14]. Красные, розовые, желтые, белые и черные шары изображают атомы C_{α} , C' , N, O и H.

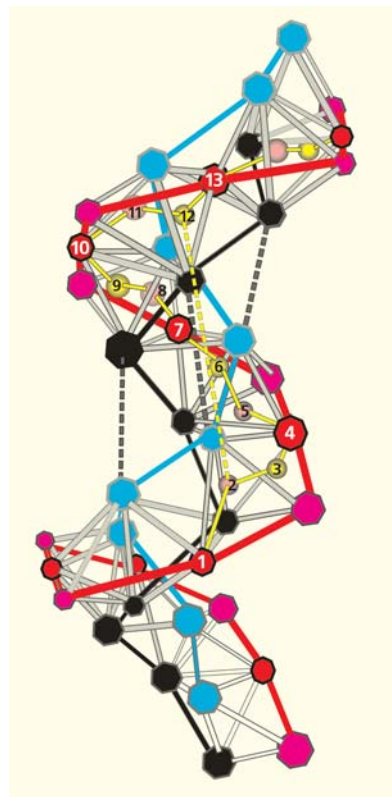


Рис.14. Размещение основных структурных элементов α -спирали (C_{α} , C' , N, O, H) в симметричных позициях расширенной спиральной упаковки на рис.12 определяет структурные параметры α -спирали на рис.13. Черная и голубая спирали 40/11 — две деформированные спирали 15/4, пробегающие все вершины серой спирали 30/11, показанной на рис.12. Красная спираль образована ребрами зеленых наружных тетраэдров, часть которых показана на рис.12.

рис.6, которой в политопе соответствует поворотная ось 30/11. В трехмерном пространстве это равносторонняя и непериодическая спираль. Но мы можем сложить две семивершинные структурные единицы по той же треугольной грани еще двумя способами, поворачивая присоединяемую грань на 120° (симметрия равностороннего треугольника это допускает). Последовательно выполняя такие повороты, мы в пределах четырехмерного аналога икосаэдра получим 40-вершинное объединение тетраэдров вокруг нецелочисленной оси 10/3 (рис.11,в). Согласно рентгеновским данным, такую ось симметрии имеет коллагеновый белок. Выполнив другой возможный поворот, мы получаем 60-вершинное объединение тетраэдров вокруг нецелочисленной оси 15/4 (рис.12). В эту конструкцию превращается спираль из 30 тетраэдров (на рис.6 показаны лишь восемь), если к ее нечетным ребрам присоединить дополнительные тетраэдры из остающихся в политопе 570. На рис.12 ребра дополнительных тетраэдров, обвивающих стартовую спираль, выделены зеленым. Нечетные ребра стартовой спирали образованы вершинами из двух спиралей 15/4. При выпрямлении в трехмерном пространстве тетраэдры деформируются и спираль 15/4 становится спиралью 40/11, т.е. от поворота на 96° мы переходим к повороту на $(360:40) \cdot 11 = 99^\circ$.

Фрагмент строения α -спирали, определяющей пространственную структуру белков, показан на рис.13 (по данным многочисленных структурных работ [15]). Как известно, α -спираль имеет угол

закручивания 100° (он определен рентгенографически) и характеризуется определенным соотношением шага спирали к радиусу. Оказалось, что эти структурные параметры достигаются при размещении соответствующих атомов в высокосимметричных позициях извлеченной из четырехмерного политопа спиральной упаковки тетраэдров (рис.12) [14]. Такая конструкция выделяется еще и тем, что она определяется условием топологической устойчивости* особой поверхности. Кроме того, она (приблизительно) предсказывает и положения групп ОН с водородной связью, обеспечивающей устойчивость всей структуры α -спирали (рис.14).

Таким образом, использование в качестве базовой строительной единицы тетраэдрического семивершинника, который задается минимальным полем Галуа и размножается симметричными конструкциями обобщенной кристаллографии (определяемой как структурное приложение алгебраической геометрии), получает экспериментальное обоснование. Каждый из трех возможных вариантов объединения двух семивершинников дает старт генерации трех классов структур: жидкостей (рис.6), трехмерно-периодических кристаллов (рис.11) и биополимеров (рис.12). В следующем номере журнала мы расскажем, как в кристаллах происходят структурные превращения. ■

* Топологически устойчивой считается поверхность, которая увеличивает свою площадь при ее любой непрерывной вариации [14, 16].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 14-02-00079.

Литература

1. Шагина Н.М. Предыстория Института кристаллографии // Природа. 2014. №1. С.43—51.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Т.III: Нерелятивистская теория. М., 1962, 1989.
3. Изюмов Ю.А., Сыромятников В.Н. Фазовые переходы и симметрия кристаллов. М., 1984.
4. Конвей Дж., Слоэн Н. Упаковки шаров, решетки и группы. Т.1. М., 1990.
5. Картеси Ф. Введение в конечные геометрии / Пер. с англ. М., 1980.
6. Шуберт К. Кристаллические структуры двухкомпонентных фаз / Пер. с нем. М., 1964.
7. Coxeter H.S.M. Regular polytopes. N.Y., 1973.
8. Mosseri R., Vincenzo D.P., Sadoc J.F., Brodsky M.H. Polytope model and the electronic and structural properties of amorphous semiconductors // Phys. Rev. 1985. V.B32. P.3974—4000.
9. Sadoc J.F., Chaurolin J. Crystal structures built from highly symmetrical units // J. Phys. I. France. 1992. №2. P.845—859.
10. Талис А.Л., Крапошин В.С. Возможности обобщенной кристаллографии: описание полиморфных превращений и новых дефектов в структуре алмаза // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2006. №2. С.45—53.
11. Nelson D. Order, frustration and defects in liquids and glasses // Phys. Rev. 1983. V.B28. P.5515—5535.
12. Kraposbin V.S., Talis A.L., Samoylovitch M.I. Axial (helical) substructures determined by the root lattice E8 as generating clusters of the condensed phases // Journal of Non-Crystalline Solids. 2007. V.353. P.3279—3284.
13. Samoylovich M., Talis A. A special class of simple 24-vertex polyhedra and tetrahedrally coordinated structures of gas hydrates // Acta Cryst. 2010. V.A66. P.616—625.
14. Samoylovich M., Talis A. Symmetry of helicoidal biopolymers in the frameworks of algebraic geometry: α -helix and DNA structures // Acta Cryst. 2014. V. A70. P.186—198.
15. Финкельштейн А.В., Птицын О.Б. Физика белка. М., 2005.
16. Тужилин А.А., Фоменко А.Т. Элементы геометрии и топологии минимальных поверхностей. М., 1991.

Стремительная эволюция гриппа: как одни изменения влекут за собой другие

Г.А.Базыкин, Ю.Э.Стефанов

В общественном сознании закрепилось довольно легкомысленное отношение к гриппу. Действительно, зачастую его симптомы не тяжелее простудных, да и беспокоит он нас не дольше недели, причем проходит обычно без всякого лечения. Однако история взаимодействий человека и вируса гриппа требует более серьезного подхода к этому патогену. Достаточно вспомнить, что одни из самых страшных пандемий прошлого века были вызваны этим вирусом*. Да и обычный сезонный грипп далеко не безвреден: по оценкам Всемирной организации здравоохранения, ежегодно от него и связанных с ним осложнений умирают сотни тысяч человек (в первую очередь, пожилые люди, младенцы и страдающие хроническими заболеваниями), а в годы тяжелых пандемий — миллионы. По числу унесенных жизней среди инфекционных заболеваний грипп уступает, пожалуй, только ВИЧ. Основная проблема профилактики и лечения гриппа связана с тем, что вирус очень быстро меняется, и каждый год мы имеем дело с его новыми



Георгий Александрович Базыкин, кандидат биологических наук, заведующий сектором молекулярной эволюции в Институте проблем передачи информации им.А.А.Харкевича РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории эволюционной геномики факультета биоинженерии и биоинформатики МГУ им.М.В.Ломоносова. Занимается изучением различных вопросов биологической эволюции с использованием методов геномики и биоинформатики.



Юрий Эдуардович Стефанов, кандидат биологических наук, научный сотрудник Института молекулярной биологии РАН им.В.А.Энгельгарта и научный консультант студии научного дизайна Visual Science. Область научных интересов — эволюция мобильных генетических элементов, трехмерное компьютерное моделирование вирусных частиц.

формами, поведение которых далеко не всегда можно предсказать. Очередным шагом на пути к пониманию изменчивости вируса гриппа стал компьютерный анализ последовательностей аминокислот в белках вируса и нуклеотидов в его геноме.

Сегментированный геном

Эволюция вирусов доставляет нам немало проблем, поскольку постоянно создает штаммы патогенов, к которым не готовы ни наш иммунитет, ни индустрия производства противовирусных препаратов и вакцин. Способность вирусных популяций быстро эволюциони-

* Подробнее см. публикации Гендона Ю.З.: Пандемии гриппа: прошлое и будущее // Природа. 2008. №5. С.3—9; «Свиной грипп»: страсти и факты // Природа. 2010. №2. С.3—8.

ровать держится, с одной стороны, на огромном количестве потомства, производимого патогеном в ходе инфекции, а с другой — на высокой изменчивости вирусного генетического материала, которая дает естественному отбору шанс выявить варианты («штаммы»), противостоящие нашему иммунитету эффективнее своих предшественников. Но не все вирусы способны меняться одинаково быстро. Особенно высокая изменчивость присуща вирусам с РНК-геном, поскольку ферменты, которые осуществляют его копирование, в отличие от полимераз, реплицирующих ДНК, не в состоянии исправлять ошибки синтеза [1]. Это приводит к появлению большего числа мутаций, чем у ДНК-вирусов.

Есть и другой механизм, позволяющий еще сильнее увеличить изменчивость. Его могут использовать РНК-вирусы, геном которых разделен на части — сегменты, напоминающие человеческие хромосомы. Если в клетку одновременно проникают два штамма одного вируса с сегментированным геном, в потомстве может произойти перемешивание участков генетического материала — реассортация, подобно тому, как в каждом из нас перемешаны фрагменты генетического материала наших родителей. В результате реассортации возникает новый штамм вируса. Если вирусы-«родители» сильно отличались друг от друга генетически, то их потомок может приобрести набор свойств, существенно отличающийся его от каждого из них. Один из патогенов, способных на такой резкий эволюционный сдвиг, — вирус гриппа. Его геном состоит из восьми отдельных молекул РНК, каждая из которых необходима для успешного осуществления жизненного цикла вируса.

Общая длина генома вируса гриппа составляет приблизительно 13 500 нуклеотидов [2]. Три самых крупных (примерно по 2300 нуклеотидов) его сегмента (РА, РВ1 и РВ2) кодируют вирусную полимеразу — белок, копирующий РНК и состоящий из трех крупных субъединиц. Четвертый по длине (около 1750 нуклеотидов) сегмент (НА) отвечает за синтез гемагглютинаина. Этот белок заякорен в липидной оболочке вируса и отвечает за его проникновение в клетку, связываясь с рецептором на поверхности клеточной мембраны [3]. В зависимости от того, какой именно вариант гемагглютинаина несет вирус, связывание может быть более или менее крепким. После этого клетка поглощает вирус, помещая его в мембранный пузырек внутри цитоплазмы. Большинство макромолекулярных комплексов, поглощаемых таким образом, перевариваются клеткой. Однако вирус избегает этой участи: его мембрана сливается с мембраной пузырька, в результате чего ее содержимое оказывается в цитоплазме. В этом процессе гемагглютинин также играет важную роль. Затем геном вируса проникает в ядро, где с него может начать считываться информация.

Сегмент размером около 1550 нуклеотидов (NP) кодирует нуклеопротеин — белок, необходимый вирусу для упаковки РНК. Множество копий такого белка распределяется по каждому из геномных сегментов, связываясь с молекулой нуклеиновой кислоты. В результате фрагменты генома образуют нуклеопротеидные тяжи, сложенные пополам и закрученные в спираль, к каждому из которых прикрепляется своя копия полимеразного комплекса [4].

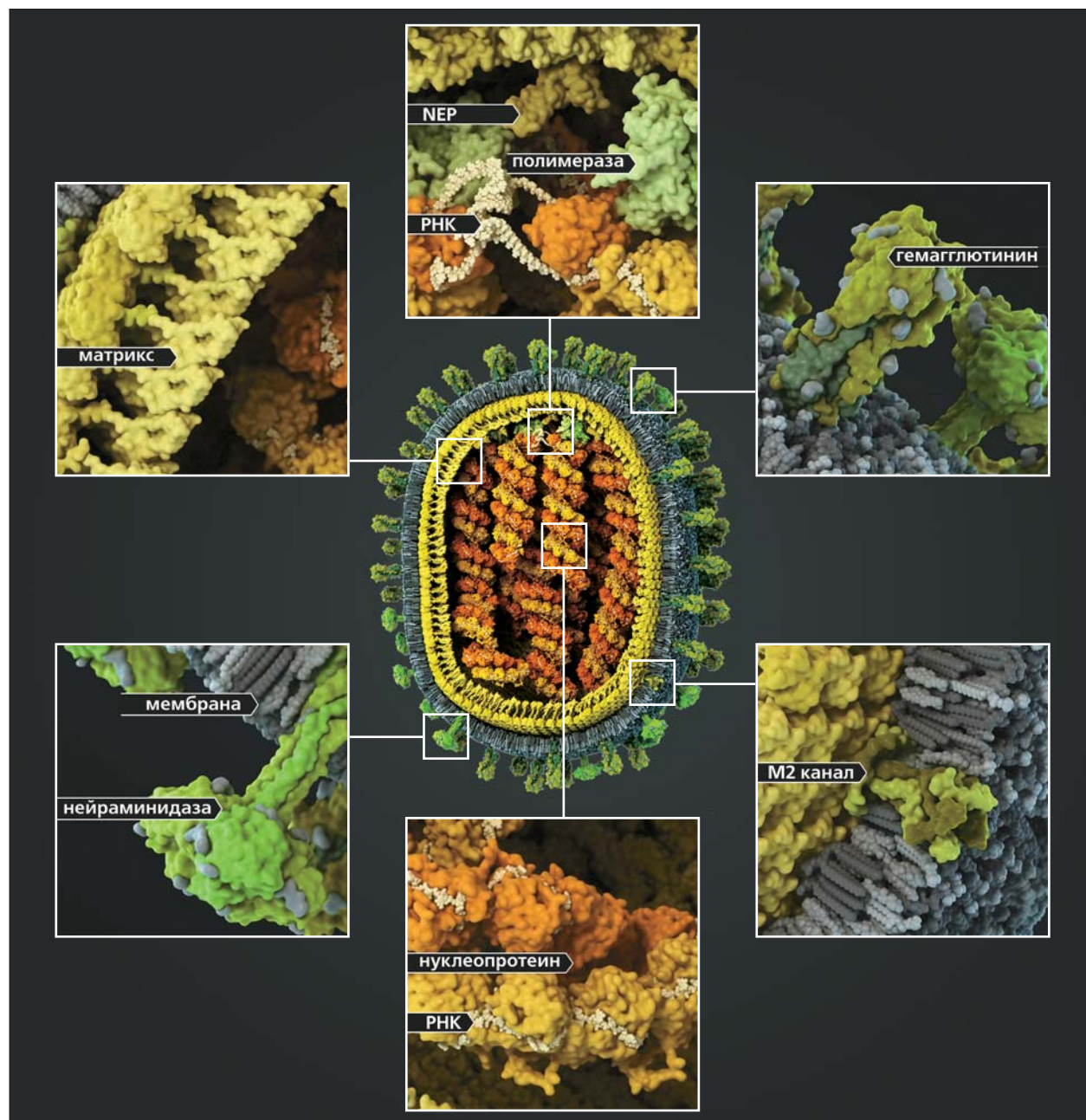
Следующий сегмент длиной около 1450 нуклеотидов (NA) кодирует белок нейраминидазы. Он нужен вирусу для того, чтобы только что образованная новая частица могла «отрезать» себя от хозяйской клетки. Кстати, некоторые лекарства против гриппа (например, озельтамивир, известный под торговой маркой «тамифлю») нацелены именно на блокирование нейраминидазы, которое позволяет снизить распространение вирусных частиц [5]. Правда, некоторые варианты нейраминидазы обеспечивают вирусу возможность избегать действия этих препаратов, делая его устойчивым к соответствующим лекарствам.

Сегмент M1/M2 длиной 1000 нуклеотидов, в соответствии со своим названием, кодирует сразу два белка — M1 и M2. Из молекул первого из них образован слой (матрикс), подстилающий вирусную липидную оболочку. Обычно M1 играет ключевую роль в формировании вирусных частиц, поскольку он взаимодействует одновременно с поверхностными белками вируса и внутренними компонентами вирусной частицы. Задача матриксного белка — собрать все составляющие воедино [6]. Белок M2 выполняет роль ионного канала. Он расположен в липидной оболочке вируса и способствует его распаковке в цитоплазме клетки [7].

Последний, самый короткий (из 865 нуклеотидов) сегмент РНК вируса гриппа отвечает за синтез двух белков, которые не попадают в зрелую вирусную частицу. Эти белки называются NS1 и NEP. Первый необходим вирусу, в частности, для того, чтобы блокировать считывание информации с клеточных молекул РНК [8]. Благодаря ему клетке приходится синтезировать преимущественно вирусные белки, оставляя свои собственные нужды. Второй белок, NEP, обеспечивает транспорт новообразованных геномных комплексов вируса из ядра к клеточной мембране, где происходит сборка вирионов [9].

Новые штаммы и поиск реассортаций

Классификация штаммов вируса гриппа основана прежде всего на том, какие именно варианты гемагглютинаина и нейраминидазы входят в его состав. Широко известны комбинации букв H и N в сочетании с порядковыми номерами (например,



Первая в мире полная достоверная модель вируса гриппа А/Н1N1 с атомным разрешением, созданная в рамках проекта Viral Park компании Visual Science (visualscience.ru) при участии Национального центра биотехнологии в Мадриде. Цель проекта — построение научно достоверных 3D-моделей распространенных вирусов человека с максимальной детализацией. Специалисты Visual Science собирают воедино данные огромного количества работ по молекулярной биологии, вирусологии и кристаллографии вирусов, мнения экспертов ведущих научных центров мира и результаты молекулярного моделирования, полученные научным отделом компании. Модель в значительной степени построена на основе данных, опубликованных исследовательскими коллективами под руководством: Хуана Ортина (Испанский национальный центр биотехнологий, Мадрид, Испания), Такеши Нода (Университет Токио, Япония), Роба Ригро (Отдел взаимодействий вируса и клетки, Гренобль, Франция) и Питера Розентал (Национальный институт медицинских исследований, Лондон, Великобритания). Точное строение генома вируса гриппа удалось смоделировать благодаря сотрудничеству с Хайме Мартин-Бенито (Испанский национальный центр биотехнологий, Мадрид, Испания), группа которого добилась уникальных результатов в описании упаковки вирусного генетического материала.

Создатели модели: Иван Константинов (руководитель проекта), Юрий Стефанов (научный консультант), Анастасия Бакулина (ведущий молекулярный моделлер), Дмитрий Щербинин (молекулярный моделлер), Александр Ковалевский (3D-моделлер)

H3N2) как раз и обозначают подтип вируса: гемагглютинин 3, нейраминидаза 2. Таких подтипов десятки, однако человека заражают лишь немногие — обычно те, у которых не слишком большие номера N и H. Наиболее давние хозяева вируса гриппа — птицы, от которых новые штаммы время от времени передаются домашнему скоту и, прямо или опосредованно, людям [10]. Чем более долгий период коэволюции провели вместе патоген и хозяин, тем менее болезненным становится их совместное существование. Птичьи штаммы вируса зачастую оказываются очень опасными после передачи новым хозяевам [11].

Известно, что именно реассортации сегментов РНК привели к возникновению штаммов, которые вызвали пандемии азиатского и гонконгского гриппа в 1957 и 1968 гг., унесшие около 2.5 млн жизней [12]. Возможно, что и испанский грипп начала прошлого века, число жертв которого шло на десятки миллионов, тоже появился в результате такой эволюционной схемы [13].

Сам процесс и последствия реассортаций изучены в настоящее время недостаточно полно. В частности, не совсем ясно, как такое резкое изменение генетического материала сказывается на дальнейшей эволюции вируса. Дело в том, что белкам, кодируемым разными сегментами вирусного генома, надо взаимодействовать между собой. Например, это важно при сборке вирусной частицы. В ходе этого процесса на поверхности зараженной клетки концентрируются вирусные белки, интегрированные в липидную оболочку. К ним относятся гемагглютинин, нейраминидаза и М2. Поверхностные белки вируса должны взаимодействовать с матриксом, который в это время формируется под клеточной мембраной. С другой стороны, М1 должен связаться с сегментами генома, чтобы они оказались упакованы в новую частицу. Да и сами сегменты должны собраться вместе таким образом, чтобы составить полный функциональный геном. Все эти ключевые для жизненного цикла вируса молекулярные взаимодействия могут быть затруднены, если белки синтезированы фрагментами геномов разных штаммов, которые еще не «притерлись» друг к другу в ходе совместной эволюции. Возможно, именно из-за этого успешные реассортации происходят сравнительно редко. Однако, коль скоро реассортация случилась, разным кускам генома, оказавшимся в одном новом штамме, надо приспособиться друг к другу.

Можно предположить, что после успешных реассортаций в геноме новой линии вируса должны закрепляться дополнительные точечные мутации, обеспечивающие такую «притирку». Эту гипотезу можно проверить биоинформатическими методами — с помощью компьютерного анализа тысяч прочитанных («отсеквенированных») геномов различных штаммов вируса, содержащихся в открытых базах данных в Интернете.

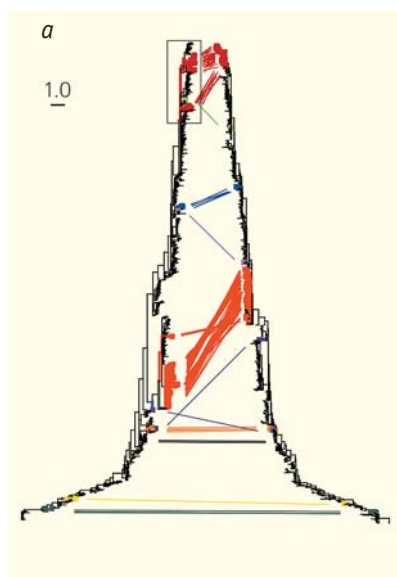
Для этого, прежде всего, необходимо узнать, что в ходе эволюции данной линии вируса гриппа произошла реассортация. Здесь на помощь приходят методы восстановления эволюционных деревьев. С помощью компьютерных программ можно сравнить ряд последовательностей одного и того же гена, взятых из большого числа особей (например, отдельных штаммов вируса), и понять, эволюционное дерево какой формы наиболее вероятно описывает историю этих штаммов. На таком дереве более похожие последовательности будут «сидеть» на близких ветках. Обычно все гены в геноме имеют одну и ту же эволюционную историю и, соответственно, описываются одним и тем же эволюционным деревом. Но из-за реассортации может оказаться, что история разных генов, попавших в один геном, различается, поскольку вирусные частицы-«родители» имеют разное происхождение. Тогда, например, может оказаться, что сегмент NA сидит на одной ветке, а сегмент NA, взятый из того же генома — совсем на другой ветке дерева. Существуют компьютерные программы, которые ищут реассортации как раз по таким несоответствиям между эволюционными деревьями разных генов. Одна из таких программ называется Graph-incompatibility-based Reassortment Finder (GiRaF) [14]. Принцип ее работы заключается в построении для некой выборки секвенированных вирусов отдельных филогенетических деревьев по каждому из восьми сегментов генома. Последующее сравнение этих деревьев позволяет обнаружить ветви, в которых построенные деревья не совпадают друг с другом. Такие ветви указывают на то, что в данный период эволюции вируса произошла реассортация, поскольку иначе деревья бы совпали.

Подобное исследование можно провести с использованием геномов вируса гриппа, опубликованных в свободном доступе. Избрав в качестве объекта штаммы H3N2, можно составить выборку из 1376 сегментированных геномов, а затем сравнить между собой филогенетические деревья для этих вирусов, построенные в отдельности по каждому из геномных сегментов [15].

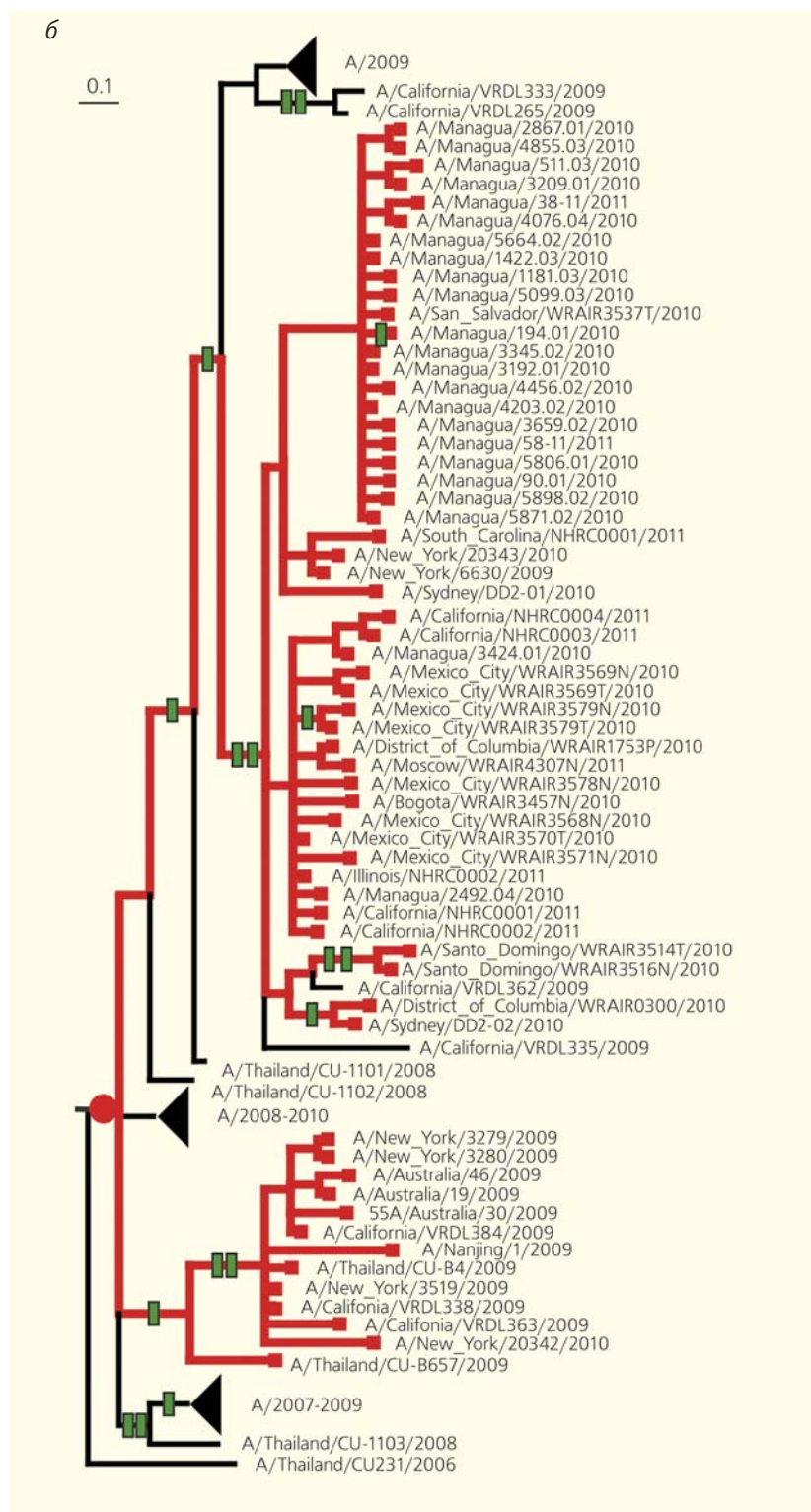
В результате такого сравнения оказалось, что число реассортаций примерно сопоставимо для разных сегментов: в ходе эволюции гриппа в популяции человека каждая пара сегментов в недавнем прошлом реассортировала около 50 раз.

Последствия реассортаций

После того как ветви, в которых произошли реассортации, были обнаружены, стало возможным оценить их влияние на накопление в сегментах вирусного генома точечных замен. Для этого можно сравнить время, прошедшее между каждой такой заменой и ближайшей пред-



Эволюционные деревья (а), построенные по разным генам (дерево слева — по гену гемагглютинирина, справа — по гену нейраминидазы) одного и того же набора штаммов вируса гриппа [15]. Сравнение деревьев позволяет обнаруживать реассортации — моменты эволюционной истории, когда геномы разных штаммов «перемешивались». Без реассортаций два дерева были бы одинаковыми; из-за реассортаций кажется, что некоторые ветки на одном дереве «отрезали и перепривили», чтобы получилось другое дерево. Соответствующие друг другу «листья» на «перепривитых» ветках соединены линиями разных цветов. На увеличенном фрагменте дерева (б) красным кружком обозначен момент реассортации, зелеными прямоугольниками — следовавшие за ним изменения аминокислотной последовательности. На масштабных линейках указана доля изменившихся нуклеотидов.



шествующей ей реассортацией, с тем, которое бы ожидалось из компьютерной модели, если бы реассортации не влияли на замены. Проведенный анализ показал, что по крайней мере в пяти из восьми сегментов генома мутации ускоренно накапливаются после реассортации. Наиболее

ярко эффект проявился для нейраминидазы и белка PB1. Ускорение аминокислотных замен после реассортаций вирусных геномов указывает на то, что в такие периоды эволюции вируса гриппа прежде всего происходит адаптация белков к новому генетическому окружению. Из-за

того, что вирусные белки взаимодействуют между собой, молекулы из разошедшихся штаммов вынуждены какое-то время изменяться, приспосабливаясь друг к другу.

При этом для разных сегментов эффект ускоренного накопления точечных замен длится разное время. Если реассортация затрагивает субъединицу полимеразы, период «притирки» сегментов к новому копирующему белку оказывается сравнительно долгим. В случае нейраминидазы период повышенной скорости замен короче, и большинство дополнительных точечных замен встречается на филогенетических ветвях, которые сразу следуют за той, что отмечена реассортацией.

Интересно, что у нейраминидаз наблюдалось 30 замен, расстояние от которых до ветви, несущей реассортацию, меньше того эволюционного расстояния, на котором мы бы ожидали встретить одну случайную синонимичную замену в гене данного белка. Такой результат свидетельствует о том, что все эти 30 мутаций произошли и закрепились необычайно быстро, и что необходимость быстрой адаптации возникла именно благодаря тому, что соответствующий сегмент генома попал в новое генетическое окружение.

Какие же именно мутации случаются после реассортаций? Чтобы ответить на этот вопрос, можно разделить мутации на разные категории, пользуясь уже имеющимися знаниями о биологии вируса, о структуре его белков и об их эволюции. Например, известно, что некоторые мутации подвержены так называемому положительному отбору. Это значит, что они увеличивают приспособленность данного штамма — возрастает число вирусных частиц-потомков, которые он производит. В результате на такие «полезные» для вируса мутации начинает действовать дарвиновский естественный отбор, и частота их встречаемости со временем повышается. Такой отбор в поверхностных белках вируса гриппа (гематтенине и нейраминидазе), как правило, связан с действием иммунной системы хозяина: более приспособленными оказываются такие мутантные частицы, которые эффективнее «маскируются», избегая иммунитета. Места в белках, которые вирус может изменить, чтобы стать незаметным для иммунной системы, и которые поэтому обычно подвержены такому отбору, хорошо известны [16]. Можно было бы ожидать, что эти места также эволюционируют быстрее и после реассортаций. Но оказалось, что ускорение эволюции после реассортаций происходит совсем в других частях белка. По-видимому, это означает, что за взаимодействия белков друг с другом отвечают не те участки, что за их взаимодействие с иммунной системой.

Кроме того, можно изучить параллельные мутации, которые многократно затрагивали одни и те же позиции в уже эволюционно разошедших-

ся белках. Оказалось, что такие мутации часто случаются и вскоре после реассортаций. Возможно, это означает, что существенная доля параллельных мутаций происходит как ответ на мутации в других белках вируса. Вирус — тесно скоординированная структура, и, возможно, не только реассортации, но и каждое важное эволюционное событие влечет за собой «шлейф» изменений в других местах того же белка или других белков. Взаимодействия между разными генами и между разными местами одного гена называются эпистазом. Пары замен у вируса гриппа, когда вторая замена нейтрализует вредные последствия первой, были известны и ранее [17]. Оказалось, что замены в сайтах, способные уравнивать изменения в других местах того же белка, быстро возникают также и после реассортаций, по-видимому, «подстраивая» межбелковые взаимодействия после замен в другом белке. Похоже, существуют такие аминокислоты, изменения которых могут нейтрализовать множество различных «поломок» в вирусном геноме.

Реассортация — это резкое эволюционное изменение, которое поначалу может снижать общую приспособленность вируса к условиям окружающей среды и к организму-хозяину. Однако иногда оказывается, что из-за такой перетасовки белков из разных штаммов новая форма патогена оказывается более приспособленной, чем штаммы-предшественники, получая возможность эффективнее распространиться [18]. Похоже, что за коррекцию первичного вредного эффекта от реассортации как раз и отвечают быстро закрепляющиеся адаптивные мутации.

Предсказания, полученные только статистическими методами, — путем анализа последовательностей белков и кодирующих их генов, — конечно, не могут иметь стопроцентную точность. Действительно ли взаимодействуют две определенные аминокислоты, можно проверить экспериментально. Однако каждый белок вируса состоит из сотен аминокислот, так что возможны десятки тысяч разных взаимодействий. Постановка такого числа экспериментов практически неосуществима. Биоинформатический анализ позволяет составлять приоритеты: выбирать и анализировать только те аминокислоты, которые участвуют во взаимодействиях, экономя время и силы экспериментаторов. Кроме того, такой подход позволяет понять, насколько взаимодействия, приводящие к вредности реассортаций, распространены на уровне всего генома.

Вопрос этот отнюдь не праздный. Связь между реассортациями и последующим накоплением аминокислотных замен может быть важна для предсказания возникновения новых линий вируса, способных вызвать пандемии. Например, «птичий» грипп (H5N1) — один из вероятных кандидатов на роль агента будущих серьезных эпидемий [19, 20]. Существующие штаммы

этого подтипа гриппа в настоящее время не передаются между млекопитающими; однако для того чтобы получить такую способность, вирусу необходимы всего лишь пять дополнительных мутаций либо реассортация в сочетании с че-

тырьмя заменами [21, 22]. При этом две из этих мутаций уже распространены среди вирусов H5N1 [23]. Если произойдет реассортация, недостающие замены могут возникнуть быстрее, чем считалось ранее. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-04-02098) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 11.G34.31.0008).

Литература

1. Steinbauer D.A., Domingo E., Holland J.J. Lack of evidence for proofreading mechanisms associated with an RNA virus polymerase // *Gene*. 1992. V.22. №2. P.281—288.
2. Teng Q., Hu T., Li X. et al. Complete genome sequence of an H3N2 avian influenza virus isolated from a live poultry market in Eastern China // *J. Virol.* 2012. V. 86. №21. P.11944. doi:10.1128/JVI.02082-12.
3. Carr C.M., Kim P.S. A spring-loaded mechanism for the conformational change of influenza hemagglutinin // *Cell*. 1993. V.73. №4. P.823—832.
4. Arranz R., Coloma R., Chichyn F.J. et al. The structure of native influenza virion ribonucleoproteins // *Science*. 2012. V.338. №6114. P.1634—1637. doi:10.1126/science.1228172.
5. Kamali A., Holodnyi M. Influenza treatment and prophylaxis with neuraminidase inhibitors: a review // *Infection and Drug Resistance* 2013. №6. P.187—198. doi:10.2147/IDR.S36601.
6. Nayak D.P., Hui E.K., Barman S. Assembly and budding of influenza virus // *Virus Res.* 2004. V.106. №2. P.147—165.
7. Lear J.D. Proton conduction through the M2 protein of the influenza A virus; a quantitative, mechanistic analysis of experimental data // *FEBS Lett.* 2003. V.552. №1. P.17—22.
8. Hale B.G., Randall R.E., Orth J. et al. The multifunctional NS1 protein of influenza A viruses // *J. Gen. Virol.* 2008. V.89. №10. P.2359—2376. doi:10.1099/vir.0.2008/004606-0.
9. Robb N.C., Smith M., Vreede F.T. et al. NS2/NEP protein regulates transcription and replication of the influenza virus RNA genome // *J. Gen. Virol.* 2009. V.90. №6. P.1398—1407. doi:10.1099/vir.0.009639-0.
10. El Zowalaty M.E., Bustin S.A., Hussein M.I. et al. Avian influenza: virology, diagnosis and surveillance // *Future Microbiol.* 2013. V.8. №9. P.1209—1227. doi:10.2217/fmb.13.81.
11. Kaplan B.S., Webby R.J. The avian and mammalian host range of highly pathogenic avian H5N1 influenza // *Virus Res.* 2013. V.178. №1. P.3—11. doi:10.1016/j.virusres.2013.09.004.
12. Kilbourne E.D. Influenza pandemics of the 20th century // *Emerg. Infect. Dis.* 2006. V.12. №1. P.9—14.
13. Suzuki Y. A phylogenetic approach to detecting reassortments in viruses with segmented genomes // *Gene*. 2010. V.464. №1—2. P.11—16. doi:10.1016/j.gene.2010.05.002.
14. Nagarajan N., Kingsford C. GiRaF: robust, computational identification of influenza reassortments via graph mining // *Nucleic Acids Research*. 2011. V.39. №6. e34. doi:10.1093/nar/gkq1232.
15. Neverov A.D., Lezhnina K.V., Kondrashov A.S., Bazykin G.A. Intratype Reassortments Cause Adaptive Amino Acid Replacements in H3N2 Influenza Genes // *PLoS Genet.* 2014. V.10. №1. e1004037. doi:10.1371/journal.pgen.1004037
16. Wolf Y.I., Viboud C., Holmes E.C. et al. Long intervals of stasis punctuated by bursts of positive selection in the seasonal evolution of influenza A virus // *Biol. Direct.* 2006. V.1. P.34.
17. Kryazhimskiy S., Dushoff J., Bazykin G.A. et al. Prevalence of epistasis in the evolution of influenza A surface proteins. *PLoS Genet* 2011. V.7. №2. e1001301. doi:10.1371/journal.pgen.1001301.
18. Li K.S., Guan Y., Wang J. et al. Genesis of a highly pathogenic and potentially pandemic H5N1 influenza virus in eastern Asia // *Nature*. 2004. V.430. №6996. P.209—213.
19. Ferguson N.M., Fraser C., Donnelly C.A. et al. Public health. Public health risk from the avian H5N1 influenza epidemic // *Science*. 2004. V.304. №5673. P.968—969.
20. Yong E. Influenza: Five questions on H5N1 // *Nature*. 2012. V.486. №7404. P.456—458. doi:10.1038/486456a.
21. Herfst S., Schrauwen E.J., Linster M. et al. Airborne transmission of influenza A/H5N1 virus between ferrets // *Science*. 2012. V.336. №6088. P.1534—1541. doi:10.1126/science.1213362.
22. Imai M., Watanabe T., Hatta M. et al. Experimental adaptation of an influenza H5 HA confers respiratory droplet transmission to a reassortant H5 HA/H1N1 virus in ferrets // *Nature*. 2012. V.486. №7403. P.420—428. doi: 10.1038/nature10831.
23. Russell C.A., Fonville J.M., Brown A.E. et al. The potential for respiratory droplet-transmissible A/H5N1 influenza virus to evolve in a mammalian host // *Science*. 2012. V.336. №6088. P.1541—1547. doi:10.1126/science.1222526.

Портрет Y-хромосомы в юности

А.П.Лисачев, П.М.Бородин

Если что и остается у людей в памяти о школьном курсе генетики, так это уверенность в том, что у самок есть две одинаковые X-хромосомы, у самцов же — одна X, а другая Y. Некоторые даже помнят, что X-хромосома большая и несет в себе тысячи генов, а Y — маленькая, и генов в ней совсем мало. Все верно. Именно так сейчас обстоят дела у людей и большинства млекопитающих, некоторых видов рыб, рептилий и амфибий.

Однако среди других позвоночных животных мы обнаруживаем самые разные варианты определения пола. Большинство рыб и многие виды рептилий вообще обходятся без половых хромосом: у них пол определяется условиями развития эмбрионов. У всех птиц, некоторых видов рыб и рептилий самцы имеют две одинаковые Z-хромосомы, а самки — одну Z, другую — W. Они тоже различаются по размерам и содержанию: как правило, Z больше, чем W.

Отчего это так? Почему половая хромосома, которая у одного из полов присутствует в одном экземпляре, обычно меньше той, что имеется у другого пола в двух экземплярах? Это приводит нас к вопросу, как возникают половые хромосомы и почему одна из них — та, что у одного из полов всегда в единичестве, — со временем непременно деградирует и, если ве-



Артем Павлович Лисачев, аспирант Института цитологии и генетики СО РАН. Область научных интересов — молекулярная биология мейоза, сравнительная цитогенетика позвоночных.



Павел Михайлович Бородин, доктор биологических наук, заведующий лабораторией рекомбинационного и сегрегационного анализа того же института, профессор кафедры цитологии и генетики Новосибирского государственного университета. Занимается проблемами эволюционной генетики, генетики мейоза. Лауреат почетного диплома Президиума РАН за лучшие работы по популяризации науки (2009).

речь газетам, может даже умереть. Да что там газеты, некоторые вполне серьезные ученые утверждают, что Y-хромосома, определяющая мужской пол у человека и других млекопитающих, дегенерирует и достаточно скоро, по геологическим меркам, исчезнет [1]. Одни считают, что после этого исчезнут мужчины, а за ними и все человечество. Другие полагают, что мужской пол никуда не денется, но начнет определяться другой генетической системой. Наконец, третьи утверждают, что дегенерация остановилась миллионы лет назад и Y-хромосоме ничто не угрожает [2].

Примечательно, однако, что сам факт деградации Y хромосомы никто не отрицает. Во-первых, потому что все признаки ее деградации хорошо видны на млекопитающих [1–3]; во-вторых — потому что одинокая, лишенная партнера для рекомбинации, хромосома просто обязана деградировать [4].

В свете возможной гибели Y-хромосомы млекопитающих мы попытаемся рассмотреть самое начало ее эволюционного пути: как она возникла, как выглядела в юности, как приобрела свои фаталь-

ные свойства. «За плечами» половых хромосом млекопитающих — долгая эволюционная история, и мы можем наблюдать лишь ее финальный этап. Для того чтобы увидеть ее ранние стадии, мы обратимся не к млекопитающим, а к носителям более молодых половых хромосом — рыбам, а точнее, к аквариумной рыбке гуппи. А поскольку все теоретики (которые редко в чем друг с другом соглашались) согласны с тем, что именно подавление рекомбинации между Y- и X-хромосомами обрекает Y на деградацию, мы обратим особое внимание на поведение этих хромосом в мейозе у самцов.

Прежде чем перейти собственно к истории Y-хромосомы, мы должны бы коротко объяснить, как вообще устроены хромосомы, что такое мейоз и как происходит рекомбинация. Но мы это делать не будем. Во-первых, потому что интеллигентные читатели журнала и так это знают из школьного курса биологии. Во-вторых, потому что один из нас уже сто раз объяснял это во всех своих статьях*

* Бородин П., Башева Е., Голенищев Ф. Взлет и падение Y-хромосомы // Природа. 2012. №1. С.45—50; Бородин П.М. Генетическая рекомбинация в свете эволюции // Природа. 2007. №1. С.14—22.

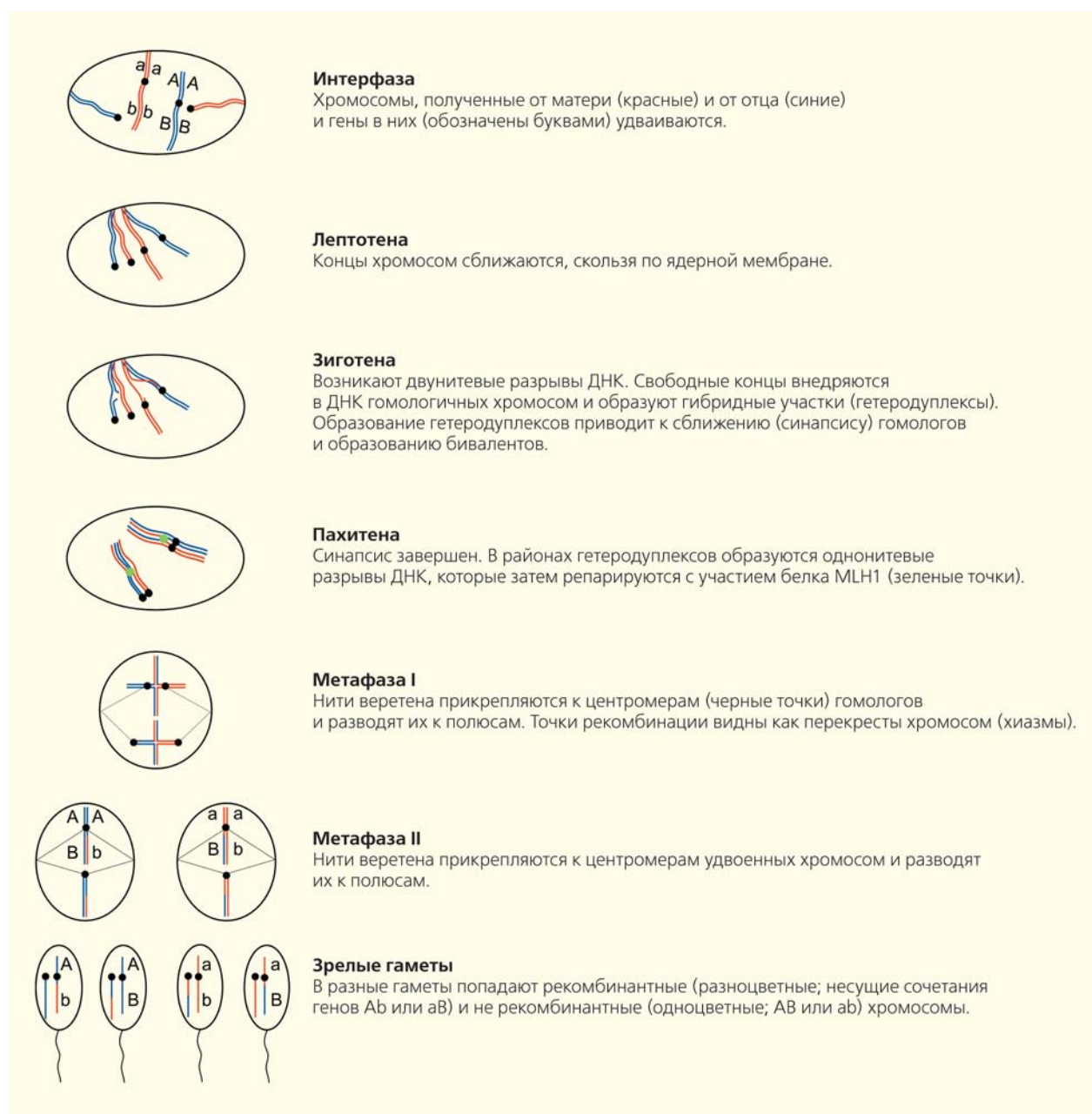


Рис.1. Основные события мейоза.

в журнале «Природа» и ему надоело повторяться. В-третьих, для тех читателей, которые забыли школьный курс и не читали наших предыдущих объяснений, мы в этой статье даем так называемую теперь инфографику мейоза (рис.1).

Четыре возраста Y-хромосомы

Первый возраст. День рождения. Как мы уже сказали, далеко не у всех животных пол определяется хромосомами. Половые хромосомы возникают тогда, когда в результате мутации пол начинает определяться одним-единственным геном, а не набором из нескольких. Важно отметить, что этот ген вовсе не отвечает в одиночку за все признаки пола. Для полноценного развития как мужского, так и женского организма нужна сложная работа многих генов. Большинство из них находится в аутосомах. Продукт гена-детерминатора пола играет всего лишь роль триггера, определяя тот или иной путь развития. Если доминантный аллель вызывает развитие мужского пола, то хромосома, в которой он находится, становится половой хромосомой Y (а ее гомолог — X). Если этот новый доминантный аллель направляет развитие по женскому пути, то несущая его хромосома становится хромосомой W (а ее гомолог — Z).

В эволюции млекопитающих это событие произошло у общего предка сумчатых и плацентарных один-единственный раз, около 180 млн лет назад. Значит, Y-хромосомы всех млекопитающих (от кенгуру до человека) — потомки единственной аутосомы, в которой один из аллелей гена SOX3 в результате мутации стал мастер-геном мужского пола SRY (*Sex Reversal Y*). Примерно в то же время или чуть позже (около 140 млн лет назад) птицы обрели ZW систему определения пола. И это тоже случилось один раз и тоже и на основе одной-единственной аутосомы.

Иное дело рыбы. У них половые хромосомы (и Y, и W) возникали много раз, в разное время и на основе самых разных аутосом. В большинстве случаев все это происходило относительно недавно. Системы определения пола варьируют между видами даже в пределах относительно небольшого семейства пецилиевых рыб. Так, у гуппи — это XY-система, а у черных моллинезий, имевших с ней общего предка всего 20 млн лет назад, — ZW-система. Да что там виды! У меченосцев в пределах одного вида встречаются популяции и с XY-, и с ZW- и с нехромосомными системами определения пола.

Почему это так? Почему рыбы половые хромосомы так молоды, гораздо моложе наших с вами и птичьих половых хромосом, хотя сами рыбы гораздо старше нас? Самое простое объяснение — именно потому, что они гораздо старше нас: те из них, кто давно завел половые хромосомы, уже вы-

мерли (есть и более остроумная гипотеза под названием «Фонтан молодости», о которой мы расскажем чуть позже).

Как справедливо заметил Козьма Прутков, «первый шаг младенца есть первый шаг к его смерти». Когда аутосома становится хромосомой Y, неумолимая логика естественного отбора направляет ее по пути медленной и неизбежной деградации (рис.2). Каждый шаг эволюции при этом ведет к повышению приспособленности или по крайней мере к сохранению ее уровня, достигнутого предками, а в результате этих шагов целая хромосома деградирует.

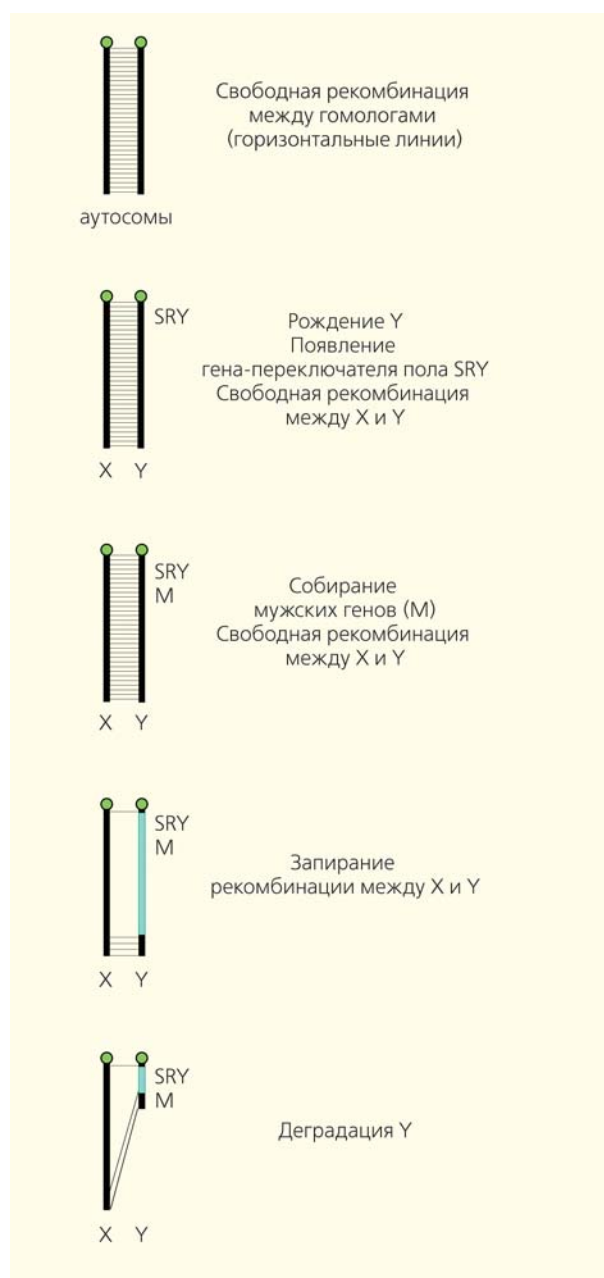


Рис.2. Эволюция Y-хромосомы.



Рис.3. Разнообразие окраски у самцов гуппи.

<http://fish-etc.com/fish/live-bearers/guppies>

Второй возраст. Детство и соби́рание мужских генов. На Y-хромосоме начинают накапливаться гены, играющие важную роль в жизни самцов. У человека, например, помимо гена SRY, определяющего пол, имеются гены, отвечающие за сперматогенез и формирование семенников. У гуппи Y-хромосома содержит гены, отвечающие за элементы брачного наряда — яркую окраску тела и привлекательную форму плавников (рис.3, 4).

Гены, полезные для одного пола и бесполезные или вредные для другого, называются половыми антагонистами. В геноме время от времени происходят перестройки: гены могут копироваться (дупликация), вырезаться (делеция), переноситься на другое место (транслокации), менять свою ориентацию в хромосоме (инверсии). Когда такие перестройки оказываются вредными, естественный отбор отсеивает их. Однако в случае с половыми антагонистами переносы самцовых генов с аутосом на Y-хромосому могут быть весьма по-

лезными, и тогда естественный отбор удерживает их, и они закрепляются.

Третий возраст. Юность и запи́рание рекомбинации. Самцовые гены должны быть на Y-хромосоме. Однако в каждом поколении в мейозе юные Y-хромосомы у самцов сближаются с X-хромосомами и вступают с ними в рекомбинацию, в результате которой самцовые гены могут иногда отрываться от гена SRY и уходить на X-хромосому. Потомки, получившие такие рекомбинантные хромосомы, оказываются в невыгодном положении: сыновья теряют столь им необходимые мужские достоинства, а дочери их приобретают, хотя им эти достоинства ни к чему. В выигрыше оказываются те самцы, у которых рекомбинация между SRY и генами мужских достоинств происходит крайне редко или ее вообще нет.

В результате любая мутация, запирающая рекомбинацию в Y-хромосоме между SRY и генами мужских достоинств, немедленно подхватывается

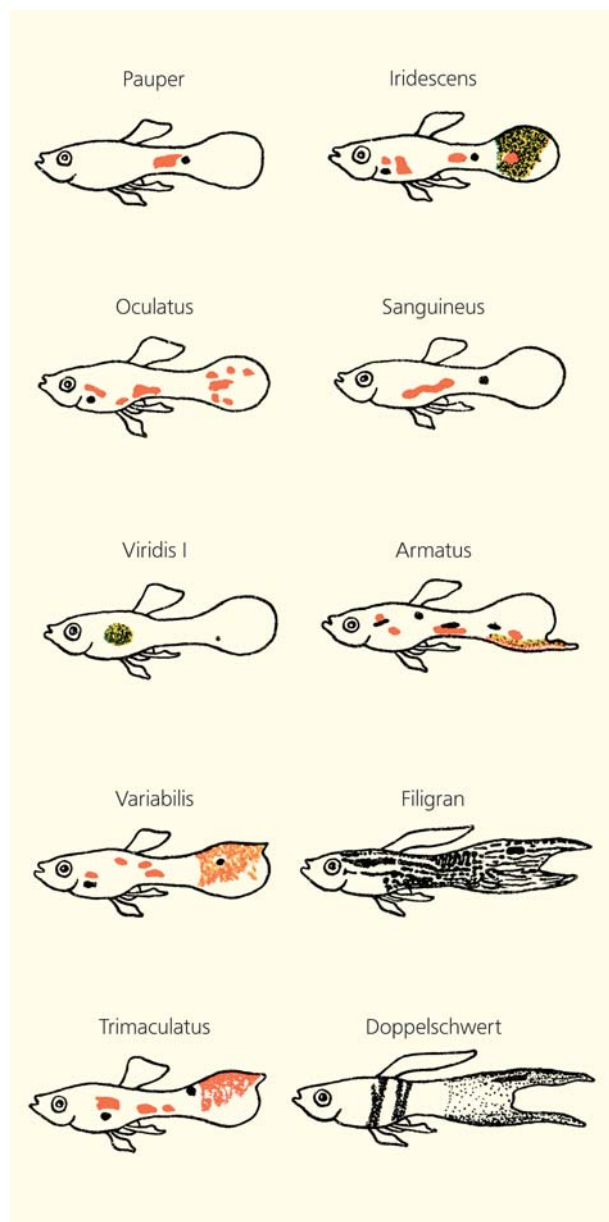


Рис.4. Фенотипическое проявление генов, локализованных на Y-хромосоме гулли [7].

отбором и становится достоянием всего вида. В то же время отбор поддерживает рекомбинацию за пределами этого района, поскольку она необходима для обеспечения нормального расхождения хромосом во втором делении мейоза (см. рис.1). Как правило, до самой смерти Y сохраняет определенный район гомологии с X (так называемый псевдоаутосомный район). У молодых половых хромосом он относительно длинный, у старых — очень короткий. У большинства млекопитающих он составляет около 5% от длины Y-хромосомы, а у некоторых отсутствует вовсе.

Четвертый возраст. Старение и деградация. Прекращение рекомбинации в любом районе

любой хромосомы неизбежно ведет к деградации. Почему это так? Об этом очень хорошо и подробно рассказано в статье «История одинокой хромосомы» [4]. А к чему эта деградация может привести, один из нас уже писал в «Природе»*. К этим статьям мы и отсылаем любопытных читателей, а сами переходим к описанию юных Y-хромосом. Как мы уже говорили, их надо искать у рыб и, как всегда, лучше всего под фонарем — у аквариумных.

Y-хромосоме столько лет, на сколько она выглядит

У рыбки гулли Y-хромосому нашли еще в 1934 г. Ученые заметили, что некоторые признаки окраски передаются только по отцовской линии и никогда не проявляются у самок [5]. На основе этих наблюдений заключили, что гены, отвечающие за такие признаки, должны находиться в Y-хромосоме. Однако тогда методы работы с препаратами хромосом не позволили идентифицировать половые хромосомы: они слишком похожи друг на друга. Только в 1990 г. с помощью специального окрашивания исследователи смогли различить X- и Y-хромосомы гулли. Оказалось, что Y несет в дистальном (т. е. в удаленном от центромеры) районе большой блок плотно упакованной ДНК (гетерохроматина), который отсутствует у X-хромосомы (за счет него Y немного длиннее своего гомолога). Авторы работы предположили, что нерекombинирующий Y-специфичный сегмент гулли, содержащий гены мужских достоинств, находится именно в этом дистальном участке [6].

Позднее с использованием флуоресцентной гибридизации ДНК *in situ* (Fluorescence in situ hybridization — FISH) выяснили, что этот район включает уникальные для Y-хромосомы последовательности ДНК. Окрасив ДНК самца и самки гулли разными флуоресцентными красителями, исследователи нанесли их на препараты хромосом. Так как между одинаковыми последовательностями ДНК имеется сродство, нанесенные пробы связались с ДНК хромосом. При этом дистальный район Y-хромосомы светился только одним цветом, а весь остальной геном — обоими. Это значило, что в дистальном сегменте находятся уникальные последовательности ДНК, которых нет в геноме самки. Таким образом, был подтвержден вывод о том, что половые хромосомы гулли делятся на два сегмента — гомологичный проксимальный (близкий к центромере) и специфичный дистальный [7].

Значит, первые два возраста Y-хромосома гулли уже прожила: она родилась и собрала в себе ге-

* Бородин П., Башева Е., Голенищев Ф. Взлет и падение Y-хромосомы // Природа. 2012. №1. С.45—50.

ны мужских достоинств. Вошла ли она в третий возраст, возник ли в ней запрет на рекомбинацию между этими генами и геном-определителем пола? И если да, то насколько велика запретная зона?

Ответ на этот вопрос могли дать исследования мейотических хромосом. В 1995 г. один из нас (вместе с коллегами) провел электронно-микроскопический анализ спаривания половых хромосом в мейозе у самцов гуппи, и решил (самостоятельно), что X и Y полностью гомологичны друг другу. Это казалось достаточно обоснованным: в абсолютном большинстве из сотен проанализированных клеток все хромосомы были сближены по всей длине. Немногочисленные пары хромосом, где синапсис оказался неполным, а длина хромосом слегка различалась, один из нас ошибочно посчитал артефактами [8].

Из результатов электронно-микроскопического исследования, опубликованных в 2001 г. [7], следовало, что по сравнению с аутосомами для половых хромосом гуппи характерна небольшая задержка в синапсисе. По мере синапсиса более длинная Y-хромосома вынуждена сокращаться до тех пор, пока длины хромосом не уравниваются. Авторы предположили, что спаривание начинается в проксимальном гомологичном сегменте, а затем распространяется в сторону дистального, негомологичного, где, по их представлениям, рекомбинации быть не должно. Поскольку используемый метод не позволял отличать проксимальные концы от дистальных, авторы решили, что если у X и Y дистальные концы разные, а проксимальные одинаковые, то именно в них должен происходить синапсис [7].

Однако такому умозаключению противоречили наблюдения тех же авторов за хромосомами самцов гуппи в метафазе I мейоза (см. рис.1). На этой стадии половые хромосомы всегда связаны между собой дистальными концами, чего не должно быть при отсутствии рекомбинации в дистальном сегменте. В проксимальном сегменте тоже наблюдались точки соединения, но крайне редко. Чтобы свести концы с концами, авторы предположили, что спаривание дистальных концов связано не с рекомбинацией, а с каким-то другим механизмом.

В новой работе, опубликованной в 2009 г., рекомбинацию половых хромосом гуппи авторы изучали генетически и обнаружили группу генов, по распределению которых у потомства определили частоту рекомбинации между X- и Y-хромосомами. Выяснили, что такой обмен происходит крайне редко (всего в 2% клеток), причем ограничен он небольшим участком в проксимальном районе [9]. Исходя из полученных данных, следовало, что у гуппи рекомбинация между половыми хромосомами либо почти прекратилась, и значит, ее Y-хромосома гораздо старше, чем она выглядит, либо авторы этих работ где-то ошибаются.

Реабилитация юной Y-хромосомы

Чтобы устранить эти неувязки, мы решили изучить половые хромосомы гуппи с помощью иммуноокрашивания ключевых белков мейоза (такой метод раньше не применялся в исследованиях этого вида)*. Из семенников гуппи приготовили препараты мейотических клеток и нанесли на них меченные флуоресцентными красителями антитела к двум белкам — SYCP3 и MLH1. Первый белок образует оси хромосом, а второй маркирует точки рекомбинации. ДНК мы окрасили синим флуоресцентным красителем DAPI. В результате нам удалось получить изображение бивалентов (спаренных хромосом) с отмеченными на них точками рекомбинации (рис.5, а). В каждой клетке было 23 бивалента, и каждый имел по крайней мере одну точку рекомбинации. Какой же из них образован X- и Y-хромосомами и где у XY-бивалента проксимальный конец, а где дистальный, т.е. где находится центромеры составляющих его хромосом?

Для идентификации XY-бивалента использовали флуоресцентную *in situ* гибридизацию ДНК самца гуппи с его мейотическими хромосомами. Мы нанесли на препараты хромосом помеченную зеленым флуорохромом пробу ДНК и с помощью этого метода выявили гетерохроматиновые (содержащие сильно уплотненную ДНК) районы хромосом. Это были блоки прицентромерного гетерохроматина на всех хромосомах, включая X, и Y, а также очень большой гетерохроматиновый блок на дистальном конце полового бивалента (рис.6,б). В половых бивалентах с незавершенным синапсисом меченый дистальный сегмент был спарен, а проксимальные концы X и Y хромосом оставались свободными (рис.6,а,б). Именно так выглядело большинство половых бивалентов с незавершенным синапсисом.

Таким образом, мы установили, что у гуппи спаривание половых хромосом начинается с дистального конца, а не с проксимального, как полагали ранее. Так ли это важно, с какого конца начинается синапсис, если по его завершении хромосомы все равно оказываются спаренными по всей длине и, казалась бы, рекомбинация возможна? В том-то и дело, что, согласно современным представлениям, это очень важно, ведь рекомбинация только и может происходить в точках инициации синапсиса, поскольку она его и иницирует (см. рис.1, зиготена).

Точки рекомбинации мы наблюдали почти на всех половых бивалентах, а не только на 5% из них, как предсказывали генетические данные. Точки эти показывали очень интересное распределение:

* Авторы выражают благодарность М.И.Родионовой за помощь в приготовлении препаратов, Н.Б.Рубцову за методические консультации, К.С.Задесенец за помощь в проведении FISH, Центру микроскопического анализа биологических объектов СО РАН за предоставление доступа к микроскопам центра.

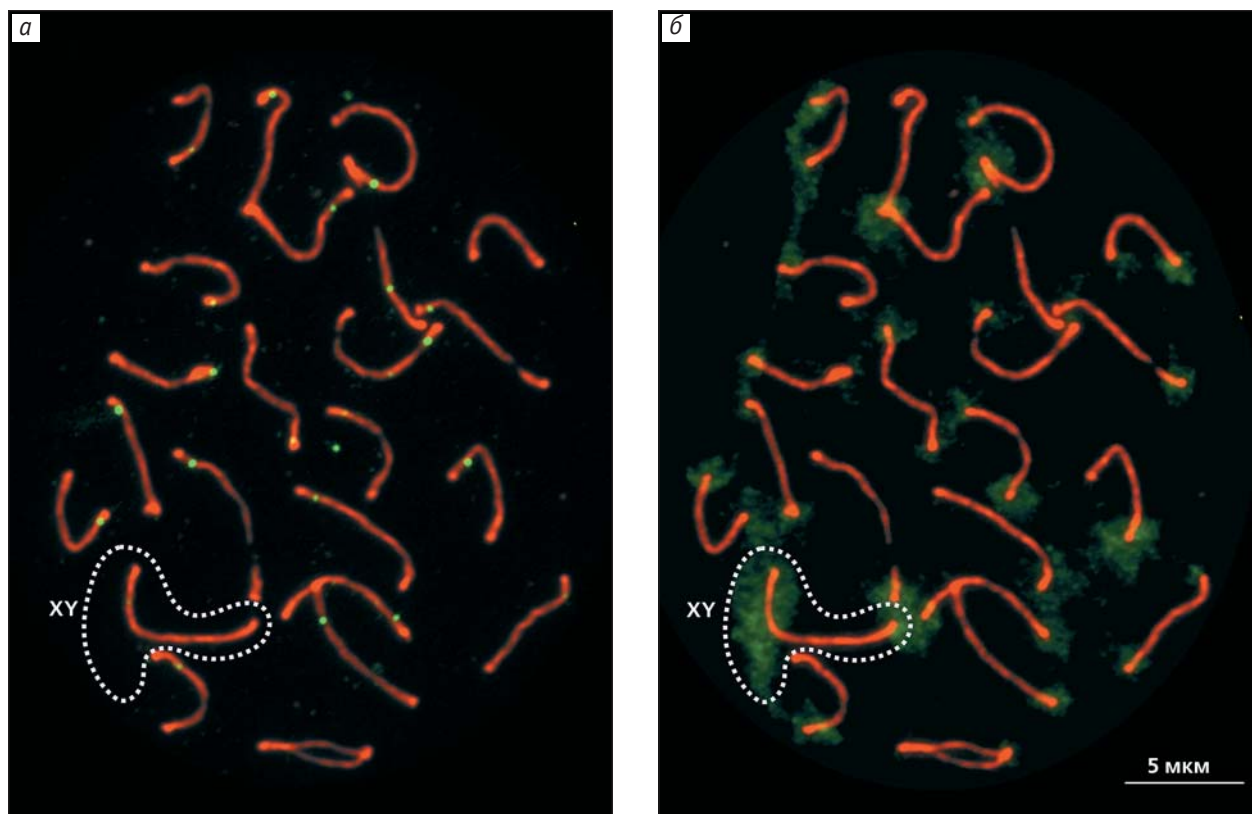


Рис.5. Биваленты хромосом самца гуппи, полученные методом иммуноокрашивания двух белков мейоза — SYCP3, который образует оси хромосом, и MLH1, маркирующего точки рекомбинации. С помощью меченых флуорохромом антител (красным для осевого белка и зеленым — для маркера MLH1) удалось определить позиции этих точек на всех бивалентах (а). На тех же мейотических клетках после проведения реакции FISH в каждом биваленте выявились гетерохроматиновые районы (диффузный зеленый сигнал), примыкающие к центромерам. С помощью FISH определили и положение XY-бивалента. На его дистальном конце располагался большой гетерохроматиновый район [5].

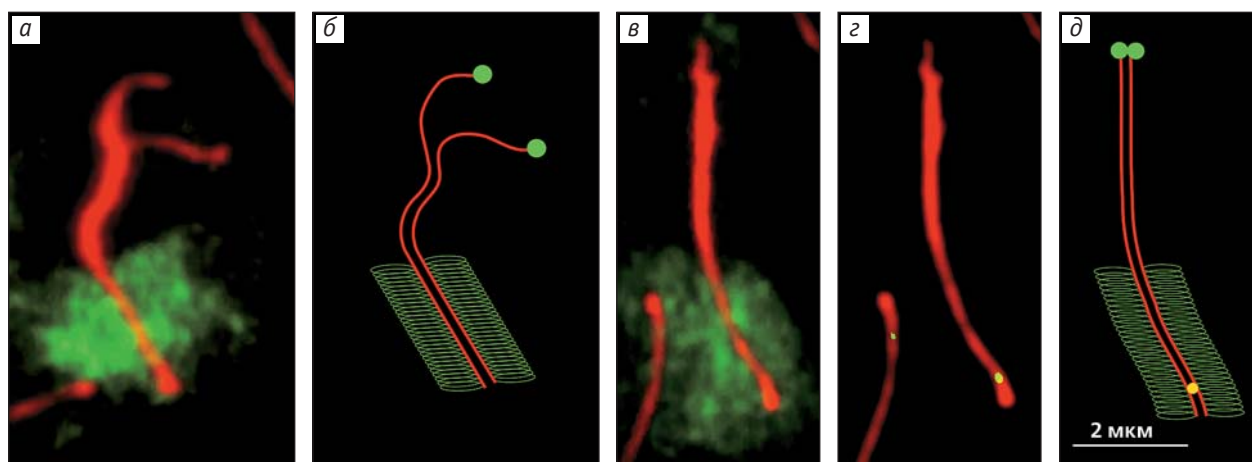


Рис.6. Микрофотографии (а, в, г) и схематические изображения (б, д) XY-бивалента гуппи. На препарате после его иммуноокрашивания видны красные оси хромосом и светло-зеленые точки рекомбинации (г). Метод FISH с пробой геномной ДНК самца выявил диффузный зеленый участок — гетерохроматиновый район на дистальном конце бивалента (а, в). Судя по изображению (а), между X- и Y-хромосомами синapsис не завершен, их проксимальные примыкающие к центромерам части (на схеме обозначены зелеными кружками) еще не спарены и отличаются размерами (а, б). На следующих снимках (в, г) и схеме (д) видно, что синapsис закончился — оси X- и Y-хромосом подогнаны друг другу и утолщены в проксимальной части. На дистальном конце выявляется точка рекомбинации.

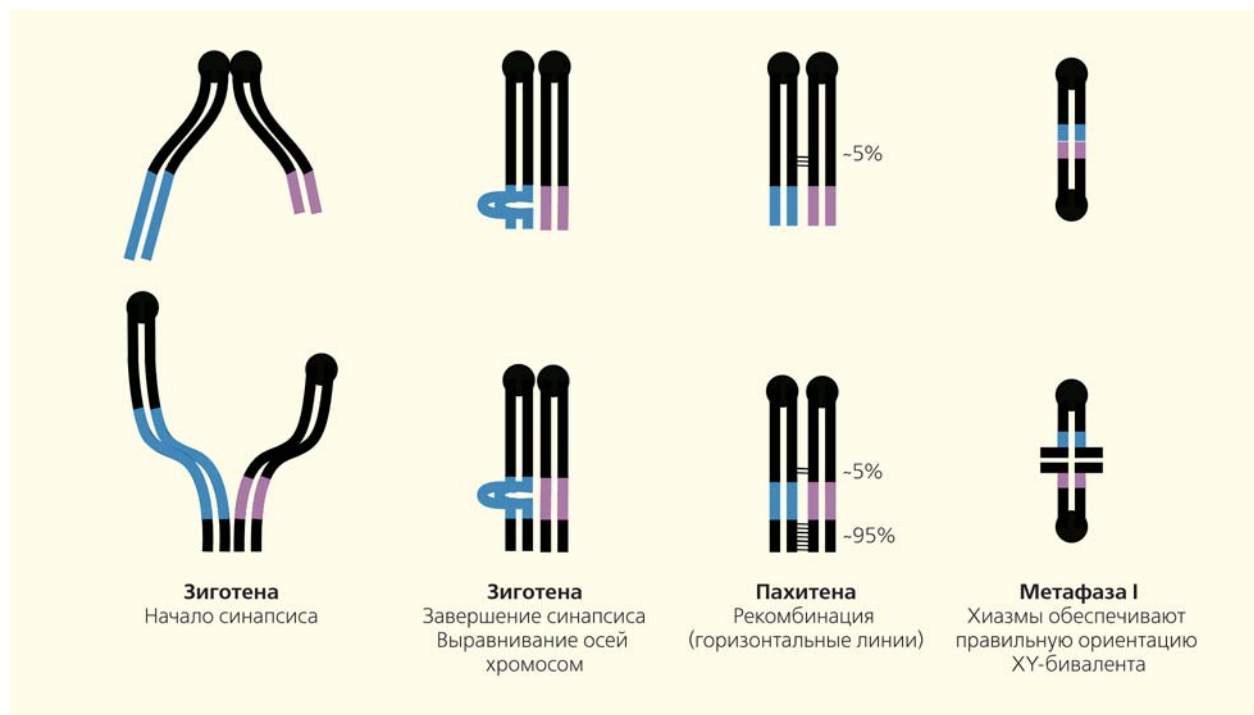


Рис.7. Поведение половых хромосом в мейозе у самцов гуппи по данным предыдущих работ (вверху) и по нашим. Синим обозначен Y-специфичный сегмент, розовым — X-специфичный. Кругами показаны центромеры.

в проксимальной половине XY-бивалента их вовсе не было, совсем мало (около 5%) — примерно в его середине, а все остальные концентрировались в дистальной четверти бивалента (рис.6, в, г). Между этими двумя районами находилась зона, запретная для рекомбинации. Преимущественная локализация обменов на конце вполне согласуется с давно обнаруженным соединением концов половых хромосом на поздних стадиях мейоза. Этот факт подтвердили и наши исследования.

Теперь концы с концами вроде бы сходятся (рис.7). Согласно нашей модели, синапсис начинается в зиготене преимущественно с дистальных концов половых хромосом, где в пахитене наблюдается абсолютное большинство точек рекомбинации, а в метафазе I обнаруживаются хиазмы, что гарантирует правильное расхождение хромосом в гаметы. Остается один вопрос — почему проведенный ранее генетический анализ выявил так мало точек рекомбинации между X и Y только в середине бивалента, а на его конце даже не обнаружил их множество? Все дело в том, что как подтвердили последние исследования с использованием FISH, в руках генетиков пока нет маркеров, локализованных на дистальном конце, и исследователи просто не видят происходящих там обменов.

Итак, содержащиеся в Y-хромосоме гуппи ген-детерминатор пола, гены мужских достоинств и примкнувший к ней самцовый блок гетерохроматина скорее всего находятся в запрет-

ной для рекомбинации зоне, расположенной в дистальном районе хромосомы. Поскольку зона эта пока невелика, то значит и Y-хромосома изученных нами рыбок еще очень молода и выглядит весьма неплохо.

Что ждет Y хромосому в будущем?

По всей видимости, особенности спаривания и рекомбинации, характерные для половых хромосом гуппи, возникали на основе небольшого изменения черт, присущих аутосомам. На них мы тоже наблюдаем инициацию спаривания в дистальных районах и преимущественно дистальную локализацию точек рекомбинации. В проксимальных районах аутосом рекомбинация происходит относительно редко.

Какое будущее уготовано половым хромосомам гуппи?

Сценарий №1, пессимистический. Запретная для рекомбинации зона распространится далее в проксимальном направлении, и все рекомбинационные события сосредоточатся на конце дистального сегмента. Разница в длине между X и Y будет нарастать, гомология в проксимальном районе исчезнет, и спаривание прекратится. За этим должна последовать деградация нерекombинирующего сегмента. Так со временем (примерно через 150 млн лет) наступит предсмертное состояние половых хромосом.

Сценарий №2, оптимистический. Произойдет смена системы определения пола с XY на ZW или же XY образуется на основе совсем другой пары аутосом. Для этого достаточно одного мутационного события — возникновения доминантного гена переключателя пола, который перехватит на себя управление со старого гена. Как только это случится, старые половые хромосомы немедленно станут заурядными аутосомами, а хромосома, содержащая новый ген-переключатель, превратится в Y (или W), а ее гомолог — в X (или Z). Такие смены, по-видимому, не раз происходили в эволюции рыб и потому их половые хромосомы остаются вечно молодыми.

Сценарий №3, косметический. Основная причина старения и деградации Y (или W) хромосомы — это подавление рекомбинации. Если время от времени снимать запрет на рекомбинацию и позволять вечно юной хромосоме X хоть иногда обмениваться генами со стареющей Y, то эта последняя может омолодиться. Гипотезу «фонтана молодости» предложил швейцарский ученый Никола Перрин [10]. Она исходит из следующих предпосылок.

Известно, что рекомбинация зависит от реального, а не от хромосомного пола. Например, у нормальных (XX) самок млекопитающих частота рекомбинации в аутосомах выше и точки рекомбинации распределены по хромосомам более равномерно, чем у самцов (XY). Эти же особенности рекомбинации мы наблюдаем и у XY-самок, несущих мутации в гене-переключателе пола (SRY). Естественно, их X- и Y-хромосомы не рекомбинируют за пределами псевдоаутосомного района, поскольку их дивергенция уже зашла слишком далеко. Но если X и Y еще относительно молоды и сохраняют высокий уровень го-

мологии, то переключение с мужского пола на женский может восстановить их способность к рекомбинации.

У холоднокровных животных вообще, и у рыб в частности, онтогенез намного пластичнее, чем у млекопитающих, и более зависим от внешних условий. Под влиянием внешних условий (температуры, демографической структуры популяций, стресса, социальных отношений, паразитов) возможен сбой в хромосомном определении пола (или даже переопределение пола). В результате могут появляться XY-самки. У этих «обращенных» самок рекомбинация должна идти по самочьему типу во всех хромосомах, в том числе и в половых. Такие эпизодические акты рекомбинации нивелируют различия в генетическом составе между X- и Y-хромосомами, восстанавливают гомологию между ними, и обеспечивают Y-хромосомам если не вечную, то очень долгую молодость.

Таким образом, гипотеза «фонтана молодости» не обещает радикального омоложения старых половых хромосом, но сильно притормаживает старение относительно молодых. Она получила надежное подтверждение в исследованиях на земноводных [10]; вероятно, похожая ситуация возможна и у некоторых рыб.

Мы находимся в самом начале понимания эволюции половых хромосом, многое еще предстоит изучить. Какие именно мутации запирают рекомбинацию между ними? Судя по тому, что у особей с обращенным полом разные половые хромосомы пытаются вести себя в мейозе как одинаковые, а одинаковые — как разные, это связано с эпигенетическими изменениями, а не с хромосомными перестройками. Вероятно, будущие исследования позволят пролить свет на этот вопрос. ■

Работа выполнена в Институте цитологии и генетики СО РАН по проекту VI.53.1.4 (Молекулярная и функциональная организация и эволюция хромосом эукариот) и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-04-00233А).

Литература

1. Sykes B. Adam's curse: A future without men. 2004. WW Norton & Company.
2. Griffin D.K. Is the Y chromosome disappearing? — Both sides of the argument // Chromosome Res. 2012. V.20. P.35—45.
3. Rice W.R. Evolution of the Y sex chromosome in animals // Bioscience. 1996. P.331—343.
4. Попадьян К., Мамирова Л. История одинокой хромосомы // Природа. 2004. №9. С.11—16.
5. Курпичников В. Генетика и селекция рыб. 2-е изд. Л., 1987.
6. Nanda I., Feichtinger W., Schmid M., et al. Simple repetitive sequences are associated with differentiation of the sex chromosomes in the guppy fish // J. Mol. Evol. 1990. V.30. P.456—462.
7. Traut W., Winking H. Meiotic chromosomes and stages of sex chromosome evolution in fish: zebrafish, platyfish and guppy // Chromosome Res. 2001. V.9. P.659—672.
8. Rodionova M.I., Nikitin S.V., Borodin P.M. Synaptonemal complex analysis of interspecific hybrids of Poecilia (Teleostei, Poeciliidae) // Braz. J. Genet. 1996. V.19. P.231—236.
9. Tripathi N., Hoffmann M., Willing E.M. et al. Linkage analysis reveals the independent origin of Poeciliid sex chromosomes and a case of atypical sex inheritance in the guppy (Poecilia reticulata) // Genetics. 2009. V.182. P.365—374.
10. Perrin N. Sex reversal: a fountain of youth for sex chromosomes? // Evolution. 2009. V.63. P.3043—3049.

От науки к интернет-играм: коллективное решение биоинформатических задач

М.С.Гельфанд

В биоинформатике есть много задач, которые наиболее эффективно решаются сочетанием компьютерного и экспертного анализа. В методических разделах научных статей этап «сделали вручную» обычно не афишируется, потому что его трудно строго описать, в то же время ручная подгонка, например, выравниваний последовательностей считается совершенно естественной и приемлемой. Однако есть случаи, в которых такая обработка — основной технический прием, причем производится она не группой специалистов, а большим сообществом пользователей Интернета. Это связано с тем, что для многих задач относительно легко построить функционал, оценивающий качество решения, но вычислительно очень сложно его оптимизировать: пространство решений велико и имеет множество локальных оптимумов. Оказалось, что, если оформить задачу поиска оптимального решения как интернет-игру, найдется множество желающих в ней поучаствовать.

Первый проект

Исторически первым проектом такого рода стала игра «Foldit» (от англ. fold it — сложи это), направленная на решение тради-



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

ционной задачи вычислительной биологии и биофизики — предсказание пространственной структуры белка по его аминокислотной последовательности. Экспериментальные методы анализа белковой структуры, кристаллография и ЯМР-спектроскопия, очень трудоемки. Компьютерное же прогнозирование полезно при определении функции белка, поиске взаимодействующих с ним малых молекул (а значит, конструировании лекарств) и анализе белок-белковых взаимодействий. Кроме того, для предсказаний, сделанных с помощью компьютерных программ, уровень соответствия действительности показывает, насколько хорошо мы понимаем механизмы образования пространственной структуры. Все началось с проекта «Rosetta@home». Создатели алгоритма «Rosetta», который предсказывал пространственную структуру белка *ab initio*, без учета информации о структурах родственных ему белков, построили такую функцию вычисления свободной энергии, которая, как правило, имела минимум для нативной структуры молекулы [1]. Но, как это часто бывает в биоинформатике, высокое качество функционала привело к сложностям его оптимизации для конкретных белков: вычисления занимали слишком много времени. Тогда авторы обратились к опыту проекта «SETI@home», в котором владельцам персональных компьютеров предлагали пожертвовать свободное время своих процессоров для поиска сигналов внеземных цивилизаций. Аналогичная программа распределенных вычислений была разработана и на основе алгоритма «Rosetta». Компьютерная заставка показывала текущую структуру белка, и пользователи часто наблюдали, как алгоритм подолгу блуждает в окрестности локального оптимума, не делая очевидных

с точки зрения человека шагов (например, таких, как перемещение внутрь молекулы торчащего наружу большого гидрофобного остатка). Дело в том, что разложение этого действия на элементарные составляющие, которыми оперирует алгоритм, требует отклонения в область высоких энергий, так как молекулу надо локально «распутать» (что энергетически невыгодно), переместить гидрофобный остаток, а потом «свернуть» заново. Поэтому, пообщавшись с такими пользователями, авторы проекта решили привлечь их к решению содержательных научных задач.

Для этого был разработан простой веб-интерфейс (рис.1) с естественным набором элементарных операций. Некоторыми участник игры управляет с помощью компьютерной мыши. Так, можно было перемещать индивидуальный аминокислот-

ный остаток (и связанные с ним остатки — с сохранением стерических ограничений) или целый элемент молекулярной структуры. Другие операции представляли собой упрощенные (для сокращения времени) версии процедур базового алгоритма «Rosetta» — это глобальная оптимизация свободной энергии либо, наоборот, ее локальная минимизация за счет движений основной цепи в заданном интервале или за счет поворотов боковых остатков. Кроме того, визуальный интерфейс выделял пространственные конфликты между боковыми остатками, которые необходимо разрешить, а также энергетически невыгодные пустоты в структуре и торчащие наружу гидрофобные остатки. Был разработан набор учебных задач, который вводил элементарные операции и давал возможность пользователям понять, как они работают.

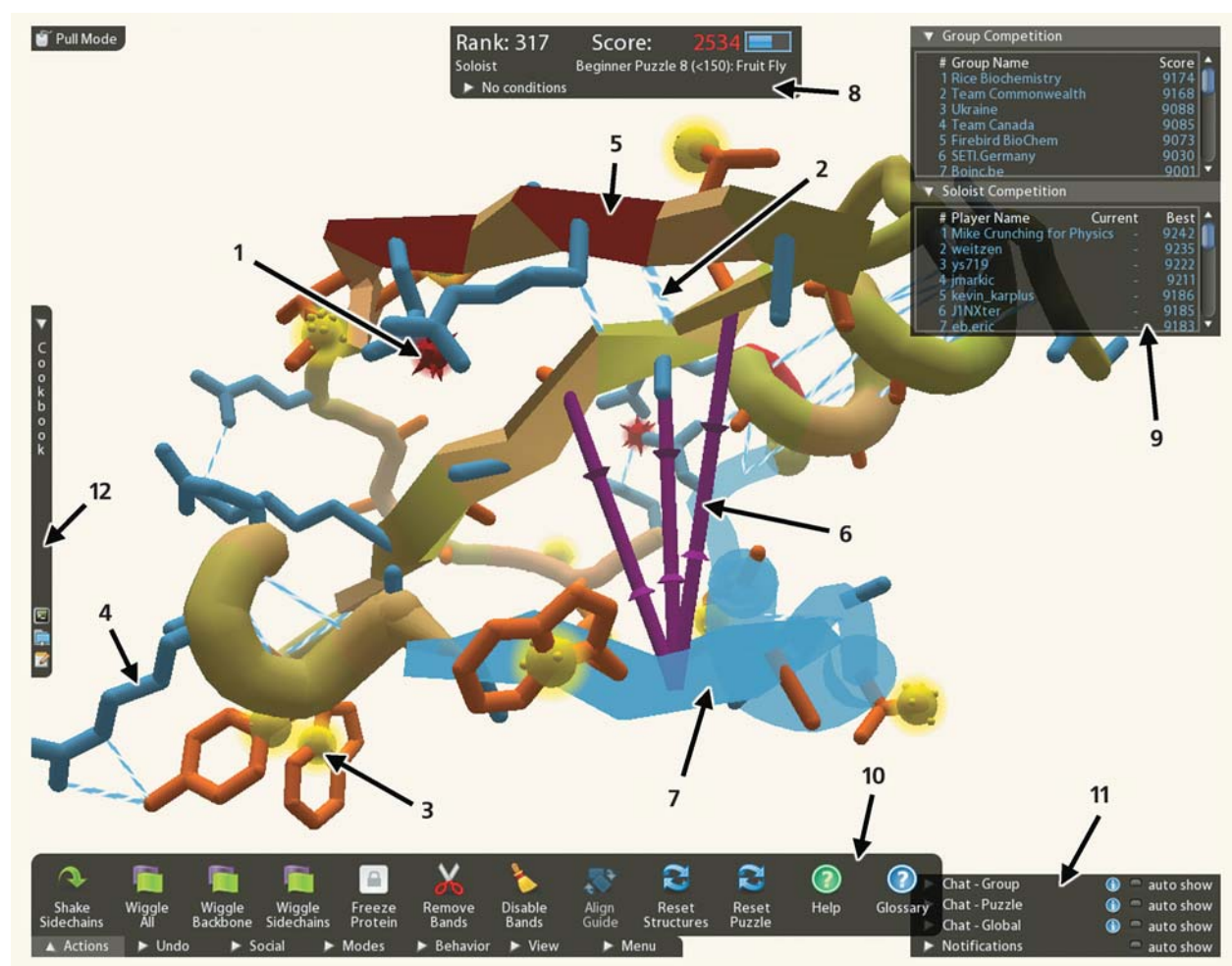


Рис.1. Снимок экрана компьютера с загруженной игрой «Foldit» [2]. Стрелками отмечено, что программа показывает пользователю в процессе его работы над пространственной структурой белка (изображенного в центре): атомы, находящиеся слишком близко друг к другу (1); водородные связи (2); открытые гидрофобные (3), гидрофильные (4) и обладающие высокой энергией (5) аминокислотные остатки. Игрок может вносить модификации в структуру, например, вводя связи (6), ограничивающие применение каких-либо операций, или «замораживая» степени свободы (7), что препятствует их изменению. Графический интерфейс пользователя также показывает текущие баллы игрока (8), рекорды других участников (9), панель с доступными операциями (10), средство общения с другими игроками (11) и инструменты создания новых «рецептов» (12).

На веб-сайте проекта регулярно появлялись новые аминокислотные последовательности белков, а за каждую предсказанную структуру в соответствии с абсолютной величиной ее свободной энергии пользователю начислялись игровые баллы.

Видимо, ключевым элементом успеха проекта (рис.2) стало то, что его авторы не ограничились просто игрой, а создали целое сообщество игроков. Для каждого белка велись записи текущих рекордов, отмечались суммарные достижения конкретного участника за все время игры. Более того, были созданы средства для общения игроков, обмена удачными находками и формирования команд, совместно работающих над новыми задачами. Примечательно, что в числе авторов первой

опубликованной работы, посвященной проекту, значится некто под именем Foldit players (игроки «Foldit»; если точнее — указано, что их более 57 тыс.) [2]. В этой статье сопоставлялись результаты автоматического предсказания пространственной структуры белка с помощью алгоритма «Rosetta» и прогнозы, сделанные коллективом игроков. Эталонном служили соответствующие структуры, определенные кристаллографическими методами. Во многих случаях результаты, полученные участниками проекта, оказались существенно лучше, чем чисто автоматические (а качество оценивается близостью структуры к нативной). Игроки проявляли себя с наиболее сильной стороны в ситуациях, когда уже есть автоматически пред-

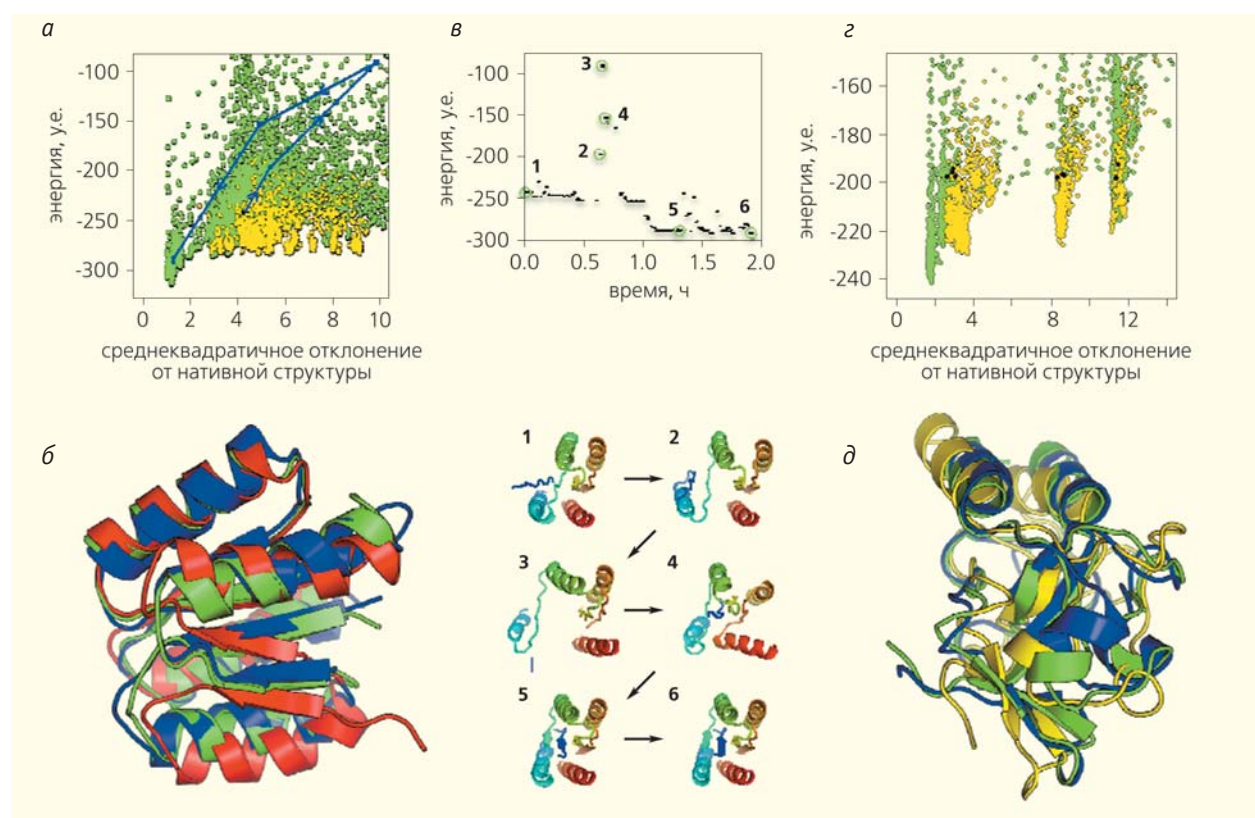


Рис.2. Примеры задач, в решении которых игроки «Foldit» превзошли компьютер [2]. Решение задачи №986875, которая была посвящена предсказанию пространственной структуры белка 2kro (а—в), и задачи №986698 о белке 2kky (г, д). Конформации, полученные игроками, показаны зелеными точками, а программой «Rosetta» — желтыми. По горизонтальной оси отложено полноатомное среднее квадратичное отклонение предсказанной структуры от нативной (опубликованной), по вертикальной — ее энергия (а, г). Черной точкой отмечено начальное приближение (4.28 Å от нативной конформации). Наилучшие результаты «Foldit» отличаются от нативной структуры на 1.4 Å, а в случае программы «Rosetta» — на 2 Å. Голубые линии соответствуют траектории одного из игроков (а). Наложение предсказания «Foldit» (изображено зеленым) на структуру белка 2kro, экспериментально определенную с помощью ЯМР (синим). Стартовое приближение, в котором концевой тяж переставлен с соседним (и образует неправильную конформацию), показано красным. 8% игроков смогли верно расположить эти тяжи (б). Траектория самого успешного в задаче №986875 игрока показывает, как он проходил области высоких энергий в поисках оптимальной структуры белка 2kro (снизу изображены переходы 1—6). По вертикали отложена энергия предсказанной конформации, по горизонтали — истекшее время (в). Сравнение структур, полученных игроками и программой «Rosetta» для белка 2kky: игрокам удалось выбрать из множества стартовых конформаций (отмечены черным) ближайшую к нативной структуре и улучшить ее (г). Наложение предсказания «Foldit» (изображено зеленым) на нативную структуру белка 2kky (синим). Стартовое приближение показано желтым (д).

сказанная конформация белка с правильно определенными основными элементами его вторичной структуры и их взаимным расположением и требуется провести доработку, например, убрать торчащие гидрофобные остатки или уточнить ориентацию элементов вторичной структуры. Более тонкая работа по уточнению положений боковых аминокислотных остатков производится компьютером, причем участники неоднократно делают это в процессе игры. Таким образом, успех работы критическим образом зависит от того, удастся ли автоматической процедуре угадать общие черты структуры и оказаться в достаточно близкой окрестности оптимальной конформации. К счастью, часто современные алгоритмы способны это сделать. Интересно, что в командах игроков само собой происходит разделение ролей: каждый делает то, что у него лучше получается, — от анализа структуры «с высоты птичьего полета» до уточнения мелких деталей.

Успехи игроков

Предсказание пространственной структуры белка — область, где очевидны критерии качества (заметим, что не все биоинформатические задачи таковы), а значит, возможно и соревнование. Раз в два года такой конкурс действительно проводится, он называется CASP (Critical Assessment of protein Structure Prediction). Для него выбирают белки, структуры которых уже определены, но еще не опубликованы. Участники делают свои предсказания по аминокислотной последовательности, а потом публикуются и предсказания, и нативные структуры. При этом участники соревнуются в различных категориях, в зависимости от того, какая задача решается (например, можно предсказывать не структуру белка, а то, как он взаимодействует с малыми молекулами) и какие данные доступны. Поскольку для многих белков известны структуры их гомологов, рабочая группа «Foldit» дополнила набор игровых операций. Теперь участники проекта могли использовать выравнивания аминокислотных последовательностей мишени и белков, конформация которых уже известна [3]. Хотя в категории предсказания белковой структуры по гомологии игроки в целом оказались не очень успешны, одна группа смогла превзойти остальные в анализе одной сложной структуры. Самым же ярким успехом стало предсказание структуры протеазы ретровируса Мейсона-Пфайзера (M-PMV, Mason-Pfizer Monkey Virus) — возбудителя, вызывающего синдром приобретенного иммунодефицита обезьян. Это небольшой белок длиной 114 аминокислот, он уже давно был кристаллизован, но, несмотря на это, определить его структуру не получалось. Игроки нашли конформацию, послужившую хорошим начальным приближением, которое затем удалось улучшить традиционными кристалло-

графическими методами, и в результате структура белка была определена [4]. При этом в научной публикации виновники торжества решили не указывать свои настоящие имена, а в обсуждении хода работы и конкретных решений, существенно способствовавших достижению общей цели, упоминаются игровые имена игроков [3]. Это необычно для «классического» научного мира, где важно и кто значится в списке авторов, и на каком месте.

Следующий шаг также был сделан в результате наблюдений над совместной работой игроков. Создатели проекта «Foldit» разработали специальную систему, которая позволяла игрокам делиться «рецептами» — используемыми ими стандартными последовательностями операций [5]. Сначала это делалось с помощью графического интерфейса, а затем был придуман простой язык. Игроки могли модифицировать «рецепты», находящиеся в общем доступе, а разработчики классифицировали их по нескольким категориям (в зависимости от решаемых задач и используемых операций), следя за всем процессом, и собирали статистику. Одновременно с этим шла независимая работа по совершенствованию алгоритма автоматического предсказания для более быстрого, но не менее надежного поиска оптимальной пространственной структуры белка.

Последнее по времени достижение игроков — работа по улучшению фермента, катализирующего реакцию Дильса—Альдера, одну из основных в органической химии. Требовалось не только поменять аминокислотные остатки в функциональном центре фермента, но и структуру самого центра, т.е. ход основной цепи молекулы. Опять пополнился набор инструментов: теперь можно было вставлять аминокислотные остатки и заменять одни на другие. Предсказанные белки химически синтезировали и проверяли их ферментативную активность. Чтобы облегчить взаимодействие между коллективом игроков и экспериментальной лабораторией, один из участников взял на себя роль посредника — формулировал подзадачи, постепенно приближающие всех к желанной цели. Сначала смоделировали изменения в функциональном центре фермента, благодаря которым увеличилось количество его контактов с лигандами, а потом добавили элемент, стабилизирующий пространственную структуру активного центра. В результате был получен фермент, активность которого в 18 раз выше, чем у исходного [6].

Развитие идеи

Естественно, появились и другие проекты, построенные на схожих идеях. Создатели «EteRNA» описывают свой проект как «большую открытую лабораторию» [7]. Игроки (в феврале 2014 г. их было уже 37 тыс.) предлагают последовательности РНК, которые должны свернуться в заранее указанные

организаторами структуры. Каждую неделю голосованием выбирается восемь последовательностей. Их синтезируют в экспериментальной лаборатории, а затем проверяют состояние каждого нуклеотида (спарен он или нет) и тем самым определяют, насколько хорошо подобрана последовательность. Это обратная задача по отношению к более известной — предсказанию вторичной структуры РНК по нуклеотидной последовательности. Участники проекта начинали с того, что пытались использовать компьютерные программы для решения прямой задачи, чтобы подобрать ответ к обратной. Однако синтезированные молекулы сворачивались не так или не только так, как надо было. Постепенно у сообщества накапливался соответствующий опыт, который формализовали в виде все увеличивающегося набора эмпирических правил. Часть из них, связанная с минимизацией симметрии и ролью гуанин-цитозинового состава, уже была известна ученым, изучающим структуру РНК, однако некоторые правила были совсем новыми, например, накладывающими ограничения на использование конкретных нуклеотидов рядом с основаниями шпилек или положение гуанинов в петлях. Структурно-молекулярная основа этих новых принципов до сих пор неясна. Оказалось, что игроки могут не просто подбирать последовательности, принимающие заданную конформацию, но и, как в случае с белками, находить структуру, связывающую заданную молекулу (лиганд).

В задаче построения множественного выравнивания нуклеотидных последовательностей экспериментальная проверка невозможна в принципе, поэтому в проекте «Phylo» обратные связи между его создателями и игроками практически отсутствуют [8]. Организаторы сделали игру максимально

абстрактной: участники выравнивают не нуклеотиды, а разноцветные геометрические фигурки, используя даже сотовые телефоны и планшеты. Задачи при этом решаются настоящие, научные — улучшить 739 проблемных участков во множественном выравнивании регуляторных областей генов позвоночных. Единственная уступка, которую авторы делают биологии, — они позволяют игроку самому выбрать ген, исходя из его медицинской важности.

Итак, на наших глазах разворачивается замечательный социальный эксперимент, существенно меняющий представления о том, кто и как должен и может заниматься наукой. Участники проектов контактируют друг с другом и с разработчиками, которые внимательно следят за происходящим в игре и постоянно улучшают возможности взаимодействия. За короткое время образовалось три сообщества, насчитывающих десятки тысяч участников, решающих сложные научные задачи и активно обменивающихся идеями, использование которых позволяет совершенствовать существующие алгоритмы. Принципы построения подобных сообществ различны, но общее для них — игровая составляющая. Организаторы формулируют биологические задачи доступно и увлекательно для людей, не специализирующихся в данной области. Для этого важно избегать скучных формальных описаний, заменяя их игровым обучением в форме последовательности усложняющихся задач. Неслучайно эти игры все чаще используют в обучении [9]. Возможно, еще одна область биоинформатики, где возможен такой подход, — изучение истории хромосомных перестроек, как для кольцевых бактериальных хромосом, так и для линейных эукариотических, с различными наборами элементарных операций. ■

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

Литература

1. *Robl C.A., Strauss C.E., Misura K.M. et al.* Protein structure prediction using Rosetta // *Methods Enzymol.* 2004. V.383. P.66—93. doi:10.1016/S0076-6879(04)83004-0.
2. *Cooper S., Khatib F., Treuille A. et al.* Predicting protein structures with a multiplayer online game // *Nature.* 2010. V.466. P.756—760. doi:10.1038/nature09304.
3. *Khatib F., DiMaio F., Foldit Contenders Group et al.* Crystal structure of a monomeric retroviral protease solved by protein folding game players // *Nat. Struct. Mol. Biol.* 2011. V.18. P.1175—1177. doi:10.1038/nsmb.2119.
4. *Gilski M., Kazmierczyk M., Krzywdka S. et al.* High-resolution structure of a retroviral protease folded as a monomer // *Acta Crystallogr. D Biol. Crystallogr.* 2011. V.67. P.907—914. doi:10.1107/S0907444911035943.
5. *Khatib F., Cooper S., Tyka M.D. et al.* Algorithm discovery by protein folding game players // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. V.108. P.18949—18953. doi:10.1073/pnas.1115898108.
6. *Eiben C.B., Siegel J.B., Bale J.B. et al.* Increased Diels-Alderase activity through backbone remodeling guided by Foldit players // *Nat. Biotechnol.* 2012. V.30. P.190—192. doi:10.1038/nbt.2109.
7. *Lee J., Kladwang W., Lee M. et al.* RNA design rules from a massive open laboratory // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2014. V.111. P.2122—2127. doi:10.1073/pnas.1313039111.
8. *Kawrykow A., Roumanis G., Kam A. et al.* Phylo: A citizen science approach for improving multiple sequence alignment // *PLoS One.* 2012. V.7. P.e31362. doi:10.1371/journal.pone.0031362.
9. *Farley P.C.* Using the computer game «FoldIt» to entice students to explore external representations of protein structure in a biochemistry course for nonmajors // *Biochem. Mol. Biol. Educ.* 2013. V.41. P.56—57. doi:10.1002/bmb.20655.

Новые технологии в золотодобывающей отрасли

А.В.Сергеев, В.В.Смолянинов

Когда мы слышим о золоте, то в первую очередь представляем несметные сокровища в древнем затерянном городе или сказочные богатства восточных шейхов. Красивая женщина подумает о ювелирном украшении, банкир — о золотом резерве, а любитель вестернов вспомнит времена золотой лихорадки и многочисленных старателей, бросившихся на поиски обеспеченной жизни. Золото — обыкновенный металл желтого цвета — очень давно привлекло внимание человека. Что же его сделало таким ценным? Во-первых, самородная форма. Благодаря ей, обнаружив золото, его можно быстро использовать (чего не скажешь, например, о рудных металлах, которые требуют выплавки и дополнительной подготовки). Во-вторых, инертность к условиям окружающей среды. Несмотря на излишнюю мягкость, оно способно сохраняться веками и тысячелетиями, в отличие от более крепкого, но подверженного окислению железа. Так со временем и повелось: железо — для всех, а золото — только для богатых и сильных, как гарант вечности и нерушимости их положений. Что же изменилось к XXI в.?

Немного истории

До сих пор химический элемент №79 все еще остается желанным объектом для людей.

© Сергеев А.В., Смолянинов В.В., 2014



Антон Владимирович Сергеев, аспирант, младший научный сотрудник Института математических проблем биологии РАН. Область научных интересов — математическое моделирование, микроскопия и обработка изображений, ДНК-нанотехнологии.



Владислав Владимирович Смолянинов, доктор биологических наук, директор научно-производственной фирмы «Гамма». Лауреат премии Совета министров СССР (1981). Занимается исследованиями и разработкой проектов в области биотехнологий.

И если раньше золото было символом власти и богатства, то сейчас это символ технологического расцвета (пускай и не такой заметный). Оно незримо окружает нас повсюду: мобильные телефоны, компьютеры, холодильники. Низкое электрическое сопротивление в сочетании с высокими антикоррозийными свойствами делают этот металл практически незаменимым в электротехнике. Различным отраслям промышленности требуется все больше золота. Проблема заключается в том, что старые месторождения с высокой концентрацией золота не вечны, и старателям все чаще приходится обращать свои взгляды в сторону более бедных месторождений [1].

За свою долгую историю золотодобыча претерпела несколько экономических и технологических этапов, что превратило ее в серьезную наукоемкую отрасль. Изначально большая часть этого благородного металла добывалась обычной промывкой золотоносного

песка или поиском и выработкой золотых жил. Известный термин «золотая лихорадка», описывающий стихийный наплыв людей, связан в первую очередь с тем, что они находили крупные самородные месторождения, сконцентрированные на поверхности. Вести о легком заработке и невероятных богатствах распространялись зачастую далеко за пределы областей золотодобычи.

Начиная с XVII в. население Земли пережило большое количество таких «лихорадок». Поочередно объектами внимания целых когорт охотников за богатством становились территории Австралии, Бразилии, Канады, России, США и ЮАР. Тогда же начали формироваться первые золотодобывающие предприятия, которые пытались конкурировать с индивидуальными предпринимателями. У таких предприятий был один большой плюс. Дело в том, что значительная часть старателей довольствовалась довольно крупными выделениями самородного золота, а золотую пыль и более мелкие вкрапления получить в то время было нелегко.

В конце XIX в. предприниматели Дж.Макартур и братья Форресты запатентовали реакцию цианирования, позволявшую извлекать из породы более 95% золота. К слову сказать, эта реакция была впервые исследована и описана пятьюдесятью годами ранее русским военным и государственным деятелем П.Р.Багратионом (племянником П.И.Багратиона — героя 1812 г.). С помощью цианидов золото растворяли и вымывали из породы, а затем, применяя дополнительные химические вещества, извлекали его из раствора. Цианидное выщелачивание стало, пожалуй, самой распространенной технологией, применяющейся в золотодобыче.

Экономика с точки зрения геолога

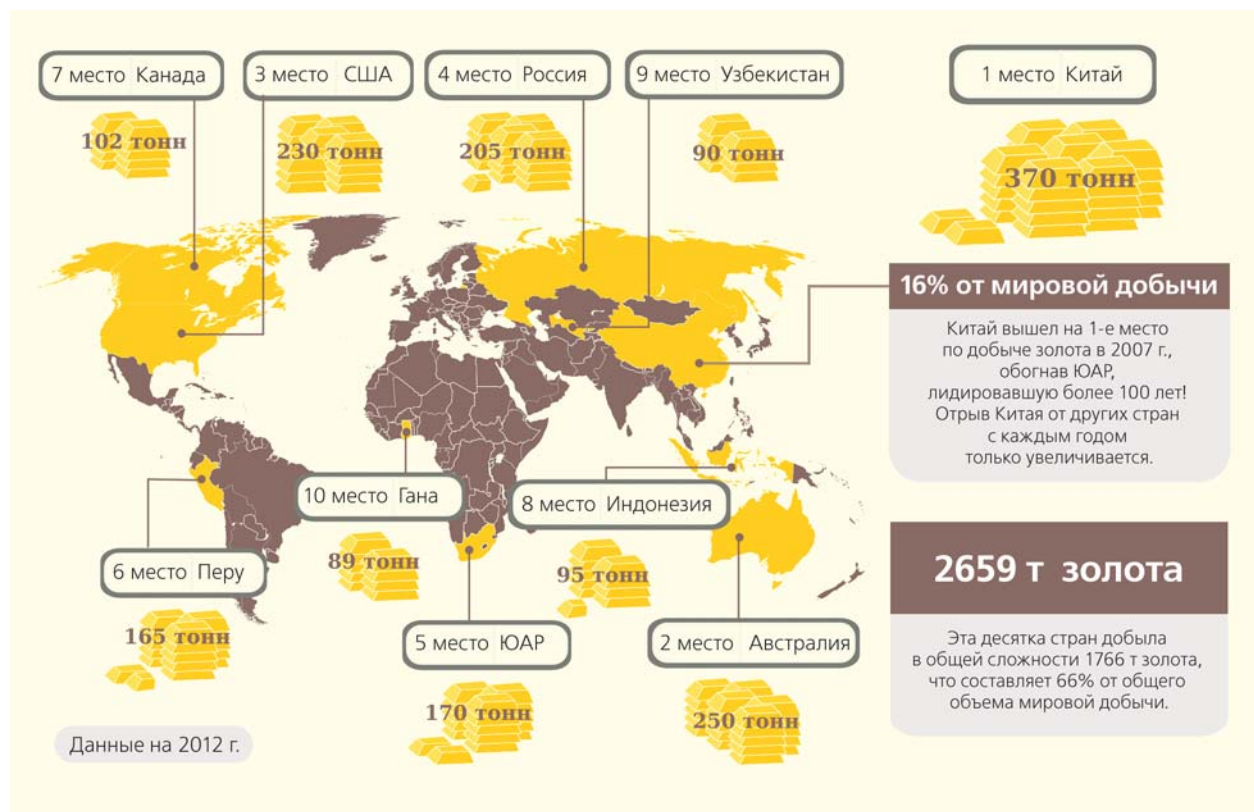
До середины XX в. золото было по своей сути основной мировой валютой. Но в 1944 г. вступило в силу соглашение, по которому тройская унция золота стала эквивалентна 35 амер. долл., что перевело его из основной валюты в резервную. Однако дальнейшие экономические осложнения и высокая инфляция в США привели к отмене этого соглашения. В 70-х годах была создана новая валютная система плавающих курсов, что сделало данный драгоценный металл одним из инвестиционных товаров.

Изменения на мировом рынке, случившиеся в последующее время, вызывают удивление. Если в течение практически 150 лет цена на золото была на уровне 20—30 долл. за унцию, то после вышеописанных событий она, перевалив за 800 долл., подскочила почти в 20 раз! Помимо этого из-за нефтяного кризиса начали повышаться цены на нефть. Золотой запас стал очень выгодным товаром, что не могло не сказаться и на промышленности. Настала необходимость братья за менее перспективные месторождения (которых, естественно, гораздо больше) и, вырабатывая всего половину от старого количества, снижать себестоимость технологического процесса.

Дальнейшая стабилизация мирового рынка и совершенствование процессов добычи способствовали понижению цены на золото. Но соглашение центральных банков вкупе с экономическими проблемами начала XXI в. снова взрывают цены на этот металл. Они достигают почти 2000 долл. за унцию! Добыча драгметалла снова сулит большую выгоду. Вдобавок происходит перераспределение мест стран-лидеров по золотодобыче: ЮАР



Динамика цен за одну тройскую унцию золота.



Страны-лидеры в добыче золота.

уступает многолетнее первенство Китаю и еще нескольким странам.

Цианидное выщелачивание и его последствия

Как уже было сказано, цианирование при извлечении золота прочно заняло свое место, и сейчас мало кто видит ему замену. Обычная промывка золота в решете или лотке, как мы привыкли видеть в фильмах о Диком Западе, дает возможность находить достаточно крупные выделения благородного металла. Проблема состоит в том, что мелкие частицы прячутся внутри породы, и, чтобы их достать или даже просто увидеть, приходится применять химию и смекалку.

Во многих материалах есть большое количество очень маленьких пор. При извлечении золота эта пористая (и обычно измельченная) порода заливается цианидсодержащим раствором, который проникает внутрь и взаимодействует с золотой крупинкой. Последняя растворяется, образуя с цианидом сложный комплекс, вытекающий сквозь поры наружу. Нам остается лишь адсорбировать растворенный металл с помощью определенного реагента. Процесс закончен!

Простота данного механизма на самом деле лишь кажущаяся. Для различных пород требуются

различные вещества-посредники, которые облегчают и ускоряют реакцию извлечения. Цианирование, например, не совсем хорошо протекает в присутствии меди и сульфидов. Кроме того, зачастую добытая золотоносная порода проходит сложную предобработку (уже упомянутое измельчение). И наконец, самое главное — требуется обеспечить высокую безопасность процесса, так как большое количество химикатов чрезвычайно вредно для окружающей среды.

Напомним, что цианиды представляют собой соли синильной кислоты HCN — одного из самых сильных ядов. Летальная доза для человека составляет всего-навсего 0.1 г. А теперь представим себе, что на тонну золотоносной породы требуется 250–300 т цианида натрия. В масштабах только одной России расход цианидов составляет несколько десятков тысяч тонн! Простая арифметика показывает, что уровень защиты во время проведения золотодобывающих работ и (что немаловажно) последующей очистки должен быть просто беспрецедентным. И действительно, эта область промышленности хорошо продумана с точки зрения минимизации возможных негативных экологических последствий. Но строгие правила далеко не всегда так же строго выполняются.

События последних двух десятков лет явно показали, что применение особо ядовитых реак-



Золотые слитки (слева) и оставшееся после добычи хвостохранилище, наполненное растворенной отработанной породой с небольшим содержанием золота и большим количеством цианидов и других ядовитых соединений.

тивов — вещь очень опасная. За это время на территории нескольких стран по вине золотодобывающих компаний произошел целый ряд крупных утечек цианидов. Среди пострадавших можно назвать территории России и стран СНГ, Венгрии, Китая, Румынии. Утечка вредных веществ в Венгрии привела к отравлению большого пространства р.Дуная (а ведь это одна из крупнейших рек Европы!) и привела к экологической катастрофе.

Конечно же, от чрезвычайных происшествий никто не застрахован. Однако есть и другая не менее серьезная проблема. Зачастую после отработанных золотых месторождений остаются гигантские пустынные территории с разрушенными экосистемами. Хронические отравления почвы и воды происходят даже при высоком уровне защиты. Одних только потоков воздуха, насыщенных парами цианистых соединений, вполне достаточно, чтобы экологическое равновесие в данном районе пошатнулось. На этом фоне совсем не кажутся неожиданными запреты некоторых стран на использование цианидов в золотодобыче. И многие умы вот уже не один десяток лет пытаются продвинуть более дружелюбные к окружающей среде технологии.

Новые технологии

В списке основных задач любой горнодобывающей промышленности всегда находится повышение выхода добываемого материала. В случае золота был разработан один интересный подход, позволивший соединить современные технологии с биологическими науками, — бактериальное выщелачивание [2]. Метод основан на том, что особые виды бактерий (некоторые из них специально выращивают и «тренируют» в лабораториях) окисляют сульфиды. В золотодобывающую промышленность попадают только самые лучшие.

Например, одни бактерии выдерживают температуру до 70°C, а другие способны переносить очень кислую среду с $\text{pH} < 2$. Для добычи металлов уже используются бактерии родов *Acidithiobacillus*, *Halothiobacillus*, *Thiobacillus*, *Leptospirillum*, *Acidiphilium*, *Sulfobacillus*, *Ferroplasma*, *Sulfolobus*, *Metalllosphaera* и *Acidianus*.

После бактериального вскрытия породы золотые частицы значительно легче извлекаются и другими методами (тем же цианидным выщелачиванием), что увеличивает выход металла на десятки процентов, а иногда и в несколько раз. Такой своеобразный рабочий «симбиоз» человека и бактерии — один из замечательных примеров современных биотехнологий.

Разработка альтернативных подходов, призванных заменить цианидное выщелачивание, также не стоит на месте. Перед исследователями данного направления ставятся определенные цели. В частности, использование нового реагента должно быть недорогим и экологически чистым. Возьмем, к примеру, выщелачивание с помощью тиомочевина. Оно обладает рядом важных преимуществ перед цианированием. Во-первых, тиомочевина менее чувствительна к таким элементам, как медь, свинец или мышьяк. Во-вторых, трудности при взаимодействии с сульфидами, весьма распространенными в золотосодержащих породах, сводятся практически на нет. Кроме того, тиомочевина менее ядовита. К сожалению, некоторые сложности в освоении нового технологического процесса в сочетании с одинаковой стоимостью тиомочевина и цианидов делает работу в этом направлении не слишком привлекательной для многих коммерческих компаний.

Гораздо более интересным выглядит тиосульфатное выщелачивание: оно обладает всеми плюсами тиомочевинного, но его использование обеспечивает меньшую нагрузку на окружающую среду. Тиосульфат натрия давно знаком людям, за-

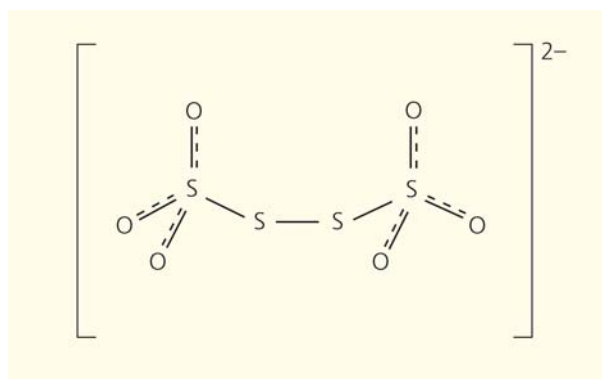
нимающимся классической (нецифровой) фотографией. Он составляет основу раствора (фиксация) для проявления фотографий, а в медицине его используют как антидот при отравлениях тяжелыми металлами и цианидами. Известно его применение в агрокомплексе в качестве удобрения. Все это подтверждает безопасность и безвредность тиосульфатов для человека.

Несмотря на все вышесказанное, цианидное выщелачивание до сих пор преобладает в технологиях золотодобычи. Почему же?

До недавнего времени проникновению тиосульфатов в золотодобывающую промышленность мешали объективные причины. Следующий после выщелачивания этап — элюция, или извлечение золота из раствора, — требовал новых химических реагентов, поскольку старые, как казалось, не были способны удовлетворить нужды производителей. Поиск таких реагентов требовал немалых инвестиций в научные исследования и внедрения новых технологий в процесс золотодобычи.

Решение пришло из научных лабораторий. Многие годы при химических исследованиях золота и его элюатов использовали политионаты — соли политионовой кислоты с общей формулой $H_2S_nO_6$, где $n \geq 2$. На рисунке показан один из представителей этого многочисленного семейства — тетратионат-ион. Политионаты — довольно любопытные соединения. Все мы еще со школы знакомы с органической химией, которую часто называют химией углерода из-за того, что огромное количество соединений существует за счет способности атомов углерода выстраиваться в длинные цепи. Но углерод далеко не единственный элемент, способный к такой кооперации. Атомы серы в политионовой кислоте выстраиваются в ряд ничуть не хуже углерода.

Почему же политионаты раньше практически не использовали? Дело в том, что раньше их получали с помощью галогенидов, даже мизерные количества которых приводили к повышенному из-



Представитель многочисленного семейства политионатов — тетратионат-ион.

носу оборудования. Недавно с нашим участием была открыта новая реакция получения политионатов [3], позволяющая производить их более дешевым и выгодным способом [4].

Это обусловило разработку ряда последовательностей, применение которых сможет улучшить экологическую и экономическую составляющие золотодобывающей отрасли в целом.

Сначала должно проводиться бактериальное выщелачивание для предподготовки и вскрытия породы. Затем используется тиосульфатное выщелачивание в качестве замены цианидному. С одной стороны, решатся многие экологические проблемы, а с другой, понизится себестоимость добычи, поскольку тиосульфаты более дешевый продукт. Кроме того, часто тиосульфаты справляются с задачей высвобождения золота лучше цианидов, особенно из пород с большим содержанием примесей. И наконец, заключительный этап — элюция политионатами.

Остается надеяться, что наметившиеся новые подходы будут подхвачены исследователями и начнут широко изучаться не только в лабораториях, но и внедряться в золотодобывающую промышленность. ■

Литература

1. Константинов М.М. Революция в геологии золота // Природа. 1998. №3. С.39—45.
2. Вайнштейн М.Б., Абашина Т.Н., Быков А.Г. и др. Технологии бактериального выщелачивания // Золото и технологии. 2011. №1(11). С.32—34.
3. Smolyaninov V., Shekbatova G., Vainshtein M. Gold leaching by organic base polythionates: new non-toxic and secure technology // SpringerPlus. 2014. V.3. №1. P.1—5.
4. Смолянинов В.В., Шехватова Г.В., Вайнштейн М.Б. Политионаты органических оснований: новые химические реакции, новые химические соединения, новые свойства // Золото и технологии. 2011. №3(13). С.62—70.

Что происходит с ледниками Северной Земли?

В.С.Корякин

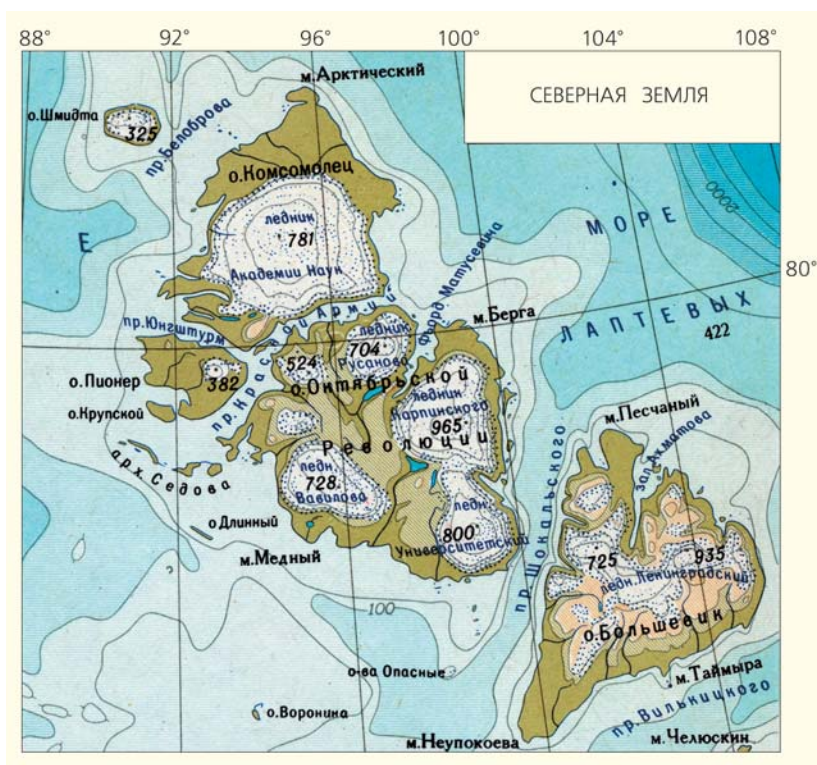
Почти половина всей суши на арктическом архипелаге Северная Земля покрыта льдом, общая площадь которого здесь составляет почти 18,5 тыс. км². Несколько крупных ледников находятся на центральном острове, получившем в 1930-х годах имя Октябрьской Революции. В его западной части на коренном ложе высотой до 300 м расположен ледник Вавилова площадью примерно 1820 км². До недавнего времени, согласно «Каталогу ледников СССР», он нигде не достигал моря, опускаясь лишь до высоты 110 м [2]. Сегодня на самом западе ледника появился широкий язык, спустившийся в воду.

На восточном побережье, где сосредоточена основная масса североземельского льда, лежат ледники Университетский (1803 км²), Русанова (956 км²) и Карпинского (2560 км²). Последние два своими выводными языками питают единственный на Северной Земле шельфовый ледник во фиорде Матусевича, отличавшийся в прошлом довольно протяженным фронтом и продуцировавший айсберги длиной до 12 км [3]. Об этих динамично изменяющихся ледяных полях — Вавилова и Матусевича — и пойдет речь в статье.

Изучение оледенения Северной Земли началось еще в 30-х годах XX в. В 1930—1932 гг. в Арктике работала Североземельская экспедиция под начальством полярного исследо-



Владислав Сергеевич Корякин, доктор географических наук, участник многих арктических экспедиций. Почетный полярник. Область научных интересов — гляциология, история полярных исследований. Постоянный автор «Природы».



вателя Г.А.Ушакова. Ученые составили первые карты архипелага и установили размеры и положение островных ледников. Известный полярный геолог Н.Н.Урванцев сделал первое описание оледенения, которое, по его мнению, интенсивно сокращалось.

В 1931 г. международное общество «Аэроарктик», занимающееся полярными исследованиями с помощью воздухоплавательных аппаратов, организовало экспедицию на самом мощном дирижабле того времени — «LZ-127» («Граф Цеппелин») [4]. В ее задачу входили аэрофотограмметрическая съемка, а также аэрологические и метеорологические наблюдения. На борту были советские и иностранные ученые. Экипаж возглавил Г.Эккнер, а научной частью экспедиции руководил профессор Р.Л.Самойлович. Экспедиция выполнила аэрофотосъемку центральной части Северной Земли, а Самойлович провел первые аэровизуальные наблюдения за ледниками.

Значение аэрофотосъемки для исследовательских целей отечественные специалисты оценили сразу. Известный геоморфолог профессор Я.С.Эдельштейн отметил, что на аэроснимках «рисуются четкая картина особенностей оледенения и границ его распространения в прошлом, отношения гидрографической сети к ледниковому покрову и к отдельным ледникам и пр.» [5]. По мнению члена-корреспондента АН СССР В.Ю.Визе, «то немногое, что видел автор этих строк, является изумительным достижением в исследовании полярных стран» [6]. Советским ученым оставалось лишь научиться использованию аэрофотоснимков, тем более что их дешифрирование немецкие специалисты выполнили весьма качественно.

Сплошная аэрофотосъемка архипелага была выполнена много лет спустя, в 1951—1953 гг. На ее основе в 1955 г. в Главсевморпути была выпущена топографическая карта масштаба 1:100 000.

В сентябре 1962 г., работая в составе гляциологического отряда Института географии АН СССР, я принимал участие в аэровизуальной съемке ледников Северной Земли. Наблюдения велись с самолета «Ан-2» Полярной авиации Главсевморпути (командир Л.И.Зотов). Над островами Большевик и Октябрьской Революции мы провели 15 ч летного времени. Забегая вперед, стоит сказать: после этих работ я пришел к выводу, что оледенение архипелага относительно стабильно и положение краев ледников по сравнению с картами, составленными на основе аэрофотосъемки 1931 и 1953 гг., изменилось мало.

В том же 1962 г. на Северной Земле работал коллектив исследователей из Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) под руководством Л.С.Говорухи. Гляциологи обследовали ледники на островах Комсомолец, Пионер и Октябрьской Революции, изучили строение снежно-фирновой толщи, гля-



Дирижабль «Граф Цеппелин». В 1931 г. он пролетел над значительной частью советской Арктики, произведя подробную аэрофотосъемку.

<https://ru.wikipedia.org>

циологическую зональность, а также выполнили снегосъемку.

С 1974 г. на леднике Вавилова начал работу постоянно действующий гляциологический стационар ААНИИ. Была реализована большая программа исследований: измерялись составляющие вещественного баланса и температурный режим ледника, изучались структуры льда, велись гляциоклиматические наблюдения. Гляциологи ААНИИ получили на ледниковой шапке Вавилова целый комплекс уникальных результатов. Это было особенно ценно, если учесть, что оледенение Северной Земли, в отличие от других полярных архипелагов, не изучалось по программе Международного геофизического года (1957—1959).

Первые космические снимки Северной Земли были сделаны со спутников «Landsat» в 1973 г. В последующие годы появилась целая серия таких фотографий. Ученые получили уникальные данные и возможность делать точные выводы об изменении размеров и площадей оледенения.

В начале 1980-х годов Главное управление геодезии и картографии СССР произвело полную аэрофотосъемку архипелага, и на ее основе были построены карты масштаба 1:100 000.

Итак, сегодня в нашем распоряжении имеются результаты аэрофотосъемки экспедиции «Аэроарктик» 1931 г., карты, составленные в Североземельской экспедиции 1930—1932 гг., топографическая карта 1955 г., результаты работ Института географии и ААНИИ, многочисленные фотографии со спутника «Landsat», топографические карты разных лет, а также современные космические снимки. Надо сказать, что некоторые из этих данных оказались неожиданными и противоречащими друг другу, что заранее предвещало трудности в определении характера изменения оледенения архипелага. Тем не менее эти материалы могут быть использованы для выявления особенностей поведения основных североземельских ледников.

Шельфовый ледник во фиорде

Языки ледников Русанова и Карпинского, соединяющиеся в крупном заливе моря Лаптевых, были впервые обнаружены в наземном маршруте Ушаковым и Урванцевым в начале лета 1931 г. Ледник во фиорде своей необычной морфологией сразу привлек к себе внимание исследователей. Урванцев описывал его так: «...фиорд оказался заполненным мертвым ледником, представляющим язык купола, расположенный внутри острова в его северо-восточной части» [7]. Ушаков же отметил значительные размеры ледника: «...почти 17 километров шли по языку глетчера, впадающему в фиорд» и специфический характер поверхности: «Поверхность ледника была изборозжена высокими ледяными валами, а порой широкими трещинами. Узкие трещины скрывались под снегом» [8], что свидетельствовало об активном движении льда и противоречило мнению спутника по маршруту.

Аэрофотосъемка 1931 г. показала, что шельфовый ледник Матусевича представляет собой ледяную плиту, питаемую выводными языками с ледниковых шапок. С расположенного севернее ледника Русанова во фиорд спускаются языки Журавлева, Ходова и Авсюка, а навстречу им с ледниковой шапки Карпинского выходят языки Сказочный, Полярников, ААНИИ и Исследователей. Ледник, образующийся при слиянии этих потоков, имеет площадь около 230 км² [9], из которых 54 км² относятся к языкам ледника Русанова, а 175 км² — Карпинского [2]. Площадь соответствующих ледосборов составляет 241 и 638 км² [10]. Следовательно, преобладающую роль в формировании плиты шельфового ледника Матусевича играет поступле-

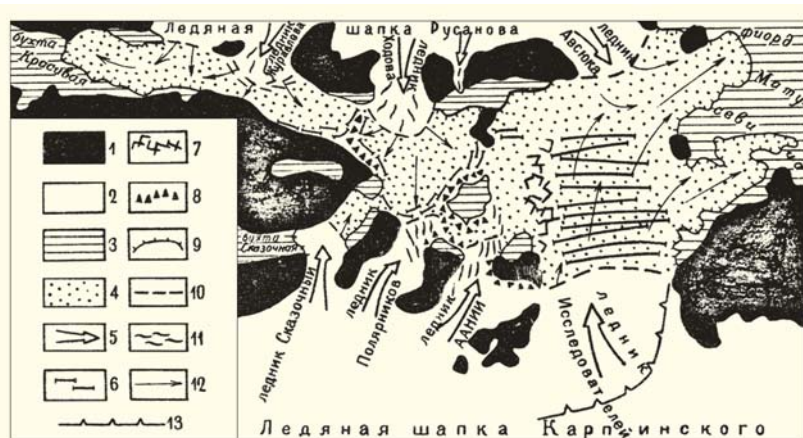
ние льда с купола Карпинского, а не Русанова, что подтверждается не только размерами, но и высотой этих шапок (965 и 704 м соответственно).

Накоплению льда в заливе, вероятно, способствовали различные факторы, но один из них очевиден: у входа во фиорд расположены острова, загораживающие ледяную плиту от воздействия моря и удерживающие лед в заливе. Один из этих островов так и назван — Преграждающий. Другой — Трудный. Кроме того, на дне фиорда Матусевича известны несколько поднятий, которые, в свою очередь, тоже способствовали сохранению льда: ледяная плита оседала на них по мере своего роста.

Что касается характерных для шельфовых ледников трещин (местами они образуют настоящие зоны дробления) и валов сжатия, описанных еще участниками Североземельской экспедиции, то их образование носит исключительно динамический характер: появляются эти формы в результате механического давления выводных языков с ледяных полей суши.

Тем не менее, поскольку большая часть ледяной плиты во фиорде Матусевича лишь незначительно возвышается над уровнем моря (в отличие от остальных ледников архипелага), именно здесь можно было ожидать наиболее значительного отступления льда.

Но ситуация оказалась неоднозначной. Выяснилось, что на карте Главсевморпути 1955 г., составленной по результатам аэрофотосъемки 1953 г., размеры шельфового ледника во фиорде Матусевича преуменьшены по крайней мере вдвое! Видимо, дешифрирование аэрофотоснимков выполнялось в то время с большой погрешностью. Эта ошибка повлекла за собой раз-



Шельфовый ледник во фиорде Матусевича [11]. Схема составлена по результатам аэровизуальной съемки 1962 г. Условные обозначения: 1 — коренные породы, 2 — ледники, 3 — море, 4 — шельфовый ледник, 5 — поступление льда с ледниковых шапок, 6 — валы на шельфовом леднике, 7 — зона дробления, 8 — морена, 9 — край шельфового ледника, 10 — границы шельфового ледника и выводных ледников, 11 — трещины, 12 — предполагаемое движение льда шельфового ледника, 13 — ледопад.



Схема фиорда Матусевича, составленная В.Д.Дибнером в 1955 г. [3]. На схеме видно, что край шельфового ледника упирается в о.Преграждающий (показан красной стрелкой).

ногласия во мнениях разных ученых на многие годы вперед.

В полетах над Северной Землей в 1962 г. я наблюдал (и отразил это на морфологической схеме, позднее опубликованной), что северный край ледника упирается в острова Трудный и Преграждающий, что было показано еще на карте экспедиции «Аэроарктик». Острова служат точными ориентирами положения кромки ледника, поэтому ошибиться в определении границы льда в заливе весьма трудно. Таким образом, с 1931 по 1962 г. положение края ледника во фиорде Матусевича практически не изменилось. Это подтверждается и схемой, опубликованной в 1955 г. пионером геолого-геоморфологических исследований в Арктике, специалистом Института геологии Арктики В.Д.Дибнером [3].

Дешифрирование первых космических снимков показало, что до начала 1970-х годов площадь шельфового ледника практически не менялась либо менялась незначительно. На снимке 1973 г. видна крупная подвижка, которая привела к выдвижению фронта на 12–15 км. Позднее, судя по изображению на снимке, ледник вернулся к положению 1962 г. Так, в «Атласе снежно-ледовых ресурсов мира» об оледенении Северной Земли в целом было сказано: «Сокращение площади ледника о.Пионер в 1953–1973 гг. достигло 10%. Остальные ледники находились в стационарном состоянии» [12].

Британские исследователи установили (правда, не учтя при этом упомянутый недостаток карты 1953 г.), что после 1973 г. началось постепенное отступление ледника во фиорде Матусевича [10]. Космические снимки «Landsat» показывают, что разрушение льда постепенно ускорялось, что было связано, очевидно, с прогрессирующим потеплением Арктики.

Результаты новых исследований из космоса, полученные в 1980-х, 1990-х и 2000-х годах, а также топографические карты 1992 и 2001 гг. показали, что ледник Матусевича неумолимо тает и сегодня его край находится уже далеко от положения, отмеченного в середине века [10].

Так, на снимке 1985 г. видно, что северный край ледника уже отступил значительно, а о.Пре-



Космические снимки шельфового ледника во фиорде Матусевича, сделанные в 1973 (вверху) и 1985 гг.

<http://blog.imagico.de/>

ice-retreat-and-advance-on-severnaya-zemlya/

Таблица

Изменения восточной части ледника Матусевича

Год	Изменения площади	
	км ²	%
1931	—	—
1953	0	0
1962	0	0
1973	0	0
1985	–57	–9
1988	+6	+1
1994	+7	+1
2012	–54	–10

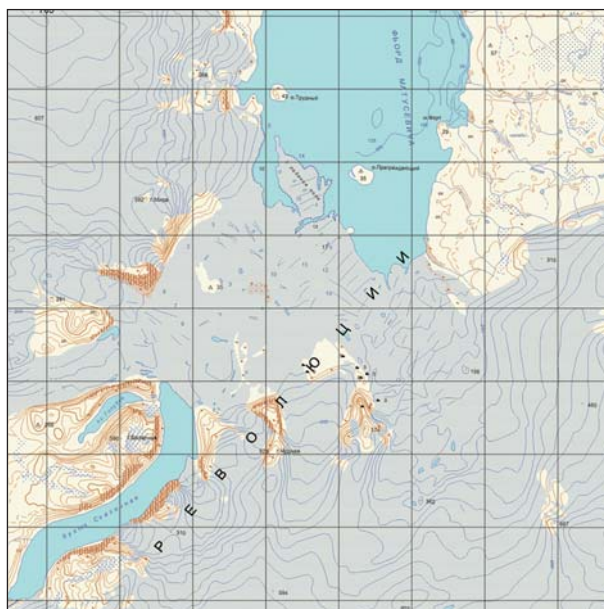
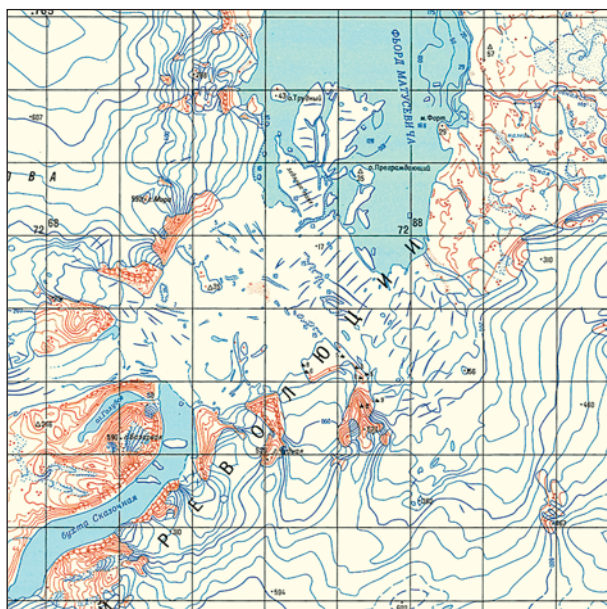


Космические снимки шельфового ледника во фиорде Матусевича, сделанные в 1994 (слева) и 2013 гг.

<http://blog.imagico.de/ice-retreat-and-advance-on-severnaya-zemlya/>

граждающий оказался окруженным со всех сторон водой [10]. К 1994 г. последовало компенсационное продвижение ледника Исследователей почти до фронта ледника Авсюка, причем остров теперь находился в стороне от основного потока

льда. Своеобразная полоса дробления в левой части ледяного потока, на которую я обратил внимание еще в 1962 г., отчетливо видна на всех снимках, с ней даже совпадает залив в виде клина в прифронтальной зоне ледника. При этом очер-



Крупномасштабные карты фиорда Матусевича, показывающие состояние местности на 1984 (слева) и 2001 гг.

тания общего фронта в 1980—1990-х годах приобрели характер своеобразной бахромы, поскольку он формировался из отдельных потоков между небольшими островами (нунатаками). Такая бахрома, однако, исчезла к 2012 г., когда общий ледяной поток с купола Карпинского, отступая, осел на коренное ложе. Теперь же, судя по последним снимкам, шельфовый ледник во фиорде Матусевича в связи с утратой поступления льда с ледниковых шапок Русанова и Карпинского оказался на грани распада.

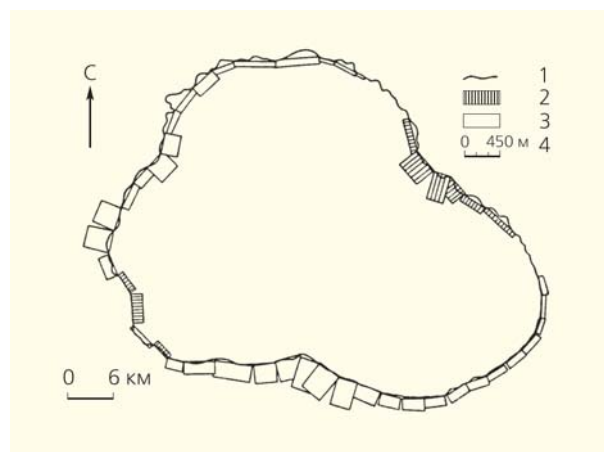
Ледяной купол

Совсем иная картина наблюдается на ледниковой шапке Вавилова, расположенной в 100 км западнее фиорда Матусевича.

Сведения, полученные об этом леднике Ушаковым и Урванцевым летом 1931 г., оказались крайне ограниченными. Первооткрыватели обнаружили, что ледник нигде не достигает моря, хотя на некоторых участках оканчивается ледяной стеной, имеющей высоту 10—15 м и переполненной моренным материалом. Каких-либо других признаков изменения положения края замечено не было. Аэросъемки 1931 и 1953 гг. показали, что ледник имеет правильные в плане округлые очертания, а его максимальная высота превышает 700 м. Он, очевидно, находится в более выгодном положении по сравнению с ледником во фиорде Матусевича, поэтому ему вряд ли грозит скорое таяние и активное разрушение льда.

И действительно, в 1962 г. мы обнаружили наступание южного края ледника Вавилова. Он продвинулся на 400 м по сравнению с предыдущим положением. Эта величина была определена довольно точно, так как в полосе, примыкающей к оз. Изменчивому, границы ледника легко привязываются к элементам речной сети, хорошо различимым с воздуха даже в условиях низкой освещенности.

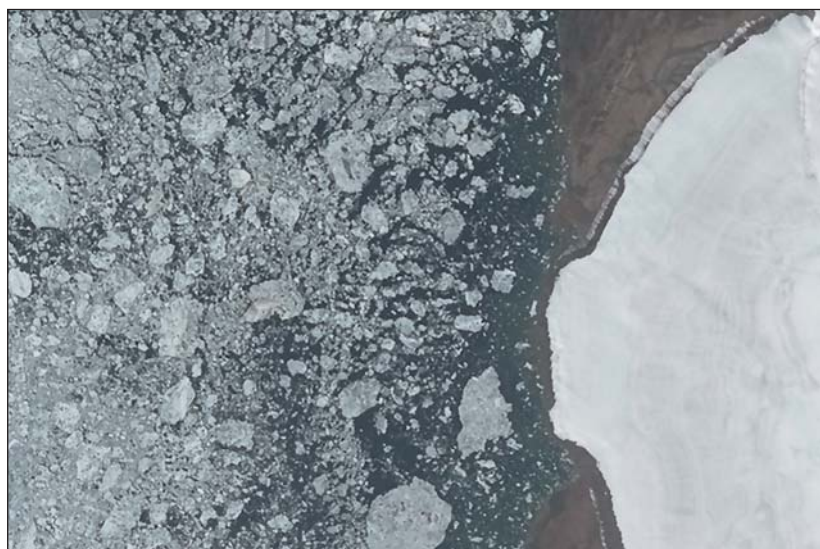
Вывод о наступании ледника поначалу вызвал недоверие в среде специалистов из-за господствовавшего в то время мнения об общем сокращении оледенения Северной Земли, а наши с коллегами идеи были встречены крайне отрицательно [14—16]. Но позднее Д.Ю. Болышиянов и В.М. Макеев писали: «Наряду с общим сокращением оледенения существуют ледники, края которых наступают на сушу... Впервые эту особенность ледника Вавилова заметили Е.М. Зингер и В.С. Корякин» [17].



Изменение ледника Вавилова с 1952 по 1985 г. [13]: 1 — положение края ледника в 1952 г.; 2, 3 — отступление и наступание ледника соответственно; 4 — масштаб изменений.

Авторы стали утверждать, что ледник Вавилова с 1952 по 1988 г. все же наступал и общее увеличение его площади составило 0.2% [13, 17]. Интересно, что происходило это на фоне отрицательного вещественного баланса. Такое очевидное противоречие за истекшие десятилетия так и нашло своего объяснения, поэтому резонно ожидать, что не только купол Вавилова, но и другие ледники Северной Земли еще преподнесут гляциологам немало сюрпризов.

Последним известным событием в эволюции ледника Вавилова (по словам сотрудника ИГ РАН, специалиста в области оледенения полярных стран А.Ф. Глазовского, оно было позднее подтверждено космическим снимком 2013 г.) стала крупная подвижка в его западной части к северу от



Космический снимок западной части ледника Вавилова, сделанный в 1985 г.
<http://blog.imagico.de/ice-retreat-and-advance-on-severnaya-zemlya/>



Космические снимки западной части ледника Вавилова, сделанные в 1994 (вверху) и 2013 гг.

<http://blog.imagico.de/ice-retreat-and-advance-on-severnaya-zemlya/>

мыса Кржижановского. Этот район ледника относится к наиболее питаемому, и лед активно накапливался здесь начиная с 1973 г. Поэтому очевидно, что подвижка была связана с общим наступанием края. Она произошла, когда прибывающий лед преодолел препятствия в виде поднятия коренного ложа и участка так называемого мертвого льда, скопившегося в этом районе. В результате язык льда площадью около 16 км² вторгся в морскую акваторию. Все это напоминало знаменитую подвижку ледника Бросвелл на Шпицбергене в 1938 г. Надо сказать, что подвижка на Вавилоче развивалась медленно. Это стало следствием общего слабого массоэнергообмена оледенения архипелага (небольших пространственных изменений североземельских ледников в целом по сравнению с другими арктическими архипелагами).

Подведем итоги

Таким образом, даже в пределах одного острова разные ледники могут демонстрировать противоположные тенденции в своем развитии на фоне незначительных изменений оледенения архипелага в целом. А поведение отдельных (нередко выбранных случайно) ледников часто озадачивает, мешая определить общую картину. В истории ледников Вавилова и Матусевича, в их реакциях на изменения окружающей среды отразились обстоятельства противоположного характера: первый существовал в более благоприятных условиях питания и показал прирост площади, второй же, имея чрезмерно развитую область расхода, сформировавшуюся в эпоху похолодания, оказался всего за несколько десятков лет под угрозой полного распада.

По всей видимости, у ледников Северной Земли колебания происходят разнонаправленно — небольшие ледниковые шапки сокращаются в размерах, в то время как крупные сохраняют стационарное положение или даже наступают [9]. При этом изменения размеров ледников практически уравниваются друг друга, так что общая площадь оледенения остается прежней [9, 18]. Такая же точка зрения отражена в «Атласе снежно-ледовых ресурсов мира» [12], в котором специально оговаривалось, что в 1931—

1973 гг. оледенение островов Северной Земли (за исключением о.Пионер) находилось в стационарном состоянии. В аналогичном положении оказался, к примеру, о.Шмидта, ледники которого в 1953—2001 гг. утратили 5% своей первоначальной площади [19].

Представления разных специалистов об общей направленности изменений оледенения Северной Земли за прошедшие годы могли как совпадать, так и различаться [9, 13, 17, 19, 20]. Но ключ к решению проблемы эволюции североземельских ледников лежит не в определении правильности одного из мнений, а в комплексном подходе к изучению истории развития оледенения на всех полярных архипелагах. Установлено, что существует пространственно-временная закономерность изменений вещественного балан-

са разных ледников (в пределах как одного архипелага, так и «цепочки» полярных островов), а также процесс так называемого затухания энергии оледенения в пределах всей природной системы Евразийской Арктики* [21, рис. на с.41]. Относительная стабильность оледенения Северной Земли по сравнению с другими арктическими ос-

тровами имеет объяснение. Архипелаг расположен у восточных пределов распространения потоков тепла и влаги из Северной Атлантики, поэтому ледники здесь имеют самый низкий массо-энергообмен [18]. Северная Земля по праву может считаться архипелагом, имеющим все возможности сохранить свой лед дольше других. И тем не менее поведение ледников архипелага, как мы убедились, может быть непредсказуемым и поэтому требует повышенного внимания со стороны специалистов. ■

* Об изменениях оледенения Северной Земли и других полярных архипелагов можно прочесть в статье «Арктические ледники и глобальное потепление» (Природа. 2013. №7. С.35—41).

Литература

1. Атлас СССР. М., 1985.
2. Каталог ледников СССР. Северная Земля. Л., 1980.
3. Дибнер В.Д. О происхождении плавучих ледяных островов // Природа. 1955. №3. С.89—92.
4. Die Arktisfahrt des Luftschiffes «Graf Zeppelin» im Juli 1931. Gotha, 1933.
5. Эдельштейн Я.С. Рецензия на статью Р.Л.Самойловича «Геоморфологические и гляциологические наблюдения во время полета на воздушном корабле «Граф Цеппелин» летом 1931 г.» // Бюллетень Арктического института. 1933. №9—10.
6. Визе В.Ю. Моря Советской Арктики. Л., 1936.
7. Урванцев Н.Н. Два года на Северной земле. Л., 1935.
8. Ушаков Г.А. По нехоженой земле. М., 1974.
9. Зингер Е.М., Корякин В.С. О современном оледенении Северной Земли // Известия Всесоюзного географического общества. 1964. №6. С.471—479.
10. Williams M., Dowdeswell J.A. Historical fluctuations of the Matusevich Ice Shelf, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2001. V.33. P.211—222.
11. Зингер Е.М., Корякин В.С. Рекогносцировка ледников Северной Земли // Материалы гляциологических исследований. Хроника. Обсуждения. 1965. №11. С.108—113.
12. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М., 1997.
13. Барков Н.И., Большаков Д.Ю., Гвоздик О.А. и др. Новые данные о строении и развитии ледника Вавилова на Северной Земле // Материалы гляциологических исследований. 1992. Вып.75. С.35—41.
14. Говоруха Л.С. Современное состояние оледенения Северной Земли (итоги гляциологических исследований 1962/63) // Доклады АН СССР. 1965. Т.163. №5. С.1209—1212.
15. Говоруха Л.С. Новые данные по палеографии позднего плейстоцена и голоцена Северной Земли // Доклады АН СССР. 1968. Т.182. №5. С.1149—1152.
16. Таймыро-Североземельская область (физико-географическая характеристика) / Под ред. Р.К.Сиско. Л., 1973.
17. Большаков Д.Ю., Макеев В.М. Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды. СПб., 1995.
18. Корякин В.С. Ледники Арктики. М., 1988.
19. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Евразийская Арктика // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М., 2006.
20. Современные глобальные изменения природной среды / Под ред. Н.С.Касимова, Р.К.Клиге. М., 2006.
21. Корякин В.С. Арктические ледники и глобальное потепление // Природа. 2013. №7. С.35—41.

Античные древности Анапы Склепы в Горгиипии

Е.М.Алексеева

Археологический заповедник «Горгиппия»
на набережной Анапы.

Фотографии предоставлены
Институтом археологии РАН

Летом 1975 г. Анапская экспедиция Института археологии АН СССР планомерно работала на нескольких участках в пределах городища Горгиппии, его некрополя и на хоре полиса*. В курортном городе археологические работы проводятся только в местах строительства. В воскресенье вечером на базу экспедиции зашел строитель. (Огромная ему благодарность! Имя его осталось неизвестным. Обычно строители скрывают находки, чтобы «не осложнять себе жизнь».) Он попросил посмотреть на то, что никак не может разбить мощным экскаватором. На дне котлована под строящийся 12-этажный жилой дом в центре города на ул. Горького лежали огромные блоки из ракушечника с тонким слоем известки с одной стороны. Выглядели они современно и не предвещали сенсации. Часть камней, вынутых из свода и одной из люнет (арочного проема в своде, ограниченно снизу горизонтально), успели отвезти в Джемете на строительство новой школы, и там их залили асфальтом. Через день мы поняли, что над скалой виден свод каменного склепа, но никто даже представить не мог, что ждало нас впереди и как трудно будет все это сохранить. Камни свода лежали на 80 см ниже анапского асфальта. Над склепом десятилетиями стояла увитая виноградом беседка в саду маленького домика радушной греческой семьи. В городе большая диаспора греков, большинство гордится древностями их прародины. Еще через день стало ясно, что склеп ограблен в древности: из замкового ряда кладки свода вынут один камень. При совершении захоронения склеп не засыпали землей, оттого было легко его ограбить за ночь. Разграбление могил широко практиковалось во все времена. Археологи встречают надгробия, на которых рядом с эпитафией написаны проклятия тем, кто придет совершить это зло. В лаз, проделанный ворами, за века просочился грунт и заполнил погребальную камеру доверху.

Раскопки склепа

Склеп оказался монументальным сооружением. Он был сложен насухо из больших пиленых камней разного формата (например, блок перекрытия дверного проема — 2.0×0.5×0.5 м) и впущен в рыхлую скалу (с прослойками глины) до пяти

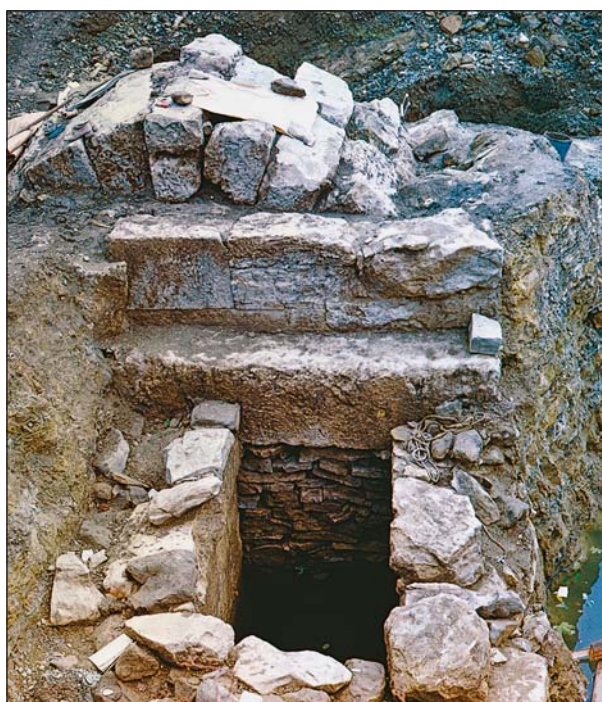
* См. первую статью авторского цикла: *Алексеева Е.М.* Античные древности Анапы. История Горгиппии // Природа. 2014. №10. С.36—46.



Екатерина Михайловна Алексеева, доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник Института археологии РАН. Руководила исследованиями Анапской экспедиции в 1972—2000 гг. Область научных интересов — археология, история классического общества, античная культура Средиземноморья и Причерноморья.

свода. Полуциркулярный свод опирался на две боковые стены и удерживался средним замковым рядом камней. В погребальную камеру вел короткий дромос (входной коридор) с каменными стенами без перекрытия, равный по величине каменному саркофагу. Высота стен дромоса — 2.3 м. От погребальной камеры его отделяла массивная двустворчатая каменная дверь (1.6×1.26 м). Снаружи ее прижимал засов — массивное бревно, от которого уцелели только пазы в боковых стенах для упора его концов. Дверь и засов снаружи были забутованы плотной кладкой из рваных камней.

Площадь погребальной камеры — 13 м², высота от плит пола до центра свода — 3.4 м. Пол сложен из массивных выпиленных из ракушечника плит, они продолжались и в дромос. Свод и стены по-



Дромос и свод склепа с фресками.

гребальной камеры целиком оштукатурены. Белое известковое покрытие толщиной 1—2 см нанесено в один слой, содержало толченые раковины и песок, выглядело грубым. Сразу стало понятно, что склеп относится к первым векам нашей эры. Для римской эпохи обычна именно такая тонкая и грубая штукатурка, в отличие от многослойных штукатурок эпохи эллинизма с тончайшим подкрасочным слоем и мраморной пудрой в нем. Штукатурка склепа хорошо связана с пористым камнем, ее сохранность находится в прямой зависимости от кладки под ней. Две люнеты склепа, несущие наиболее информативные сцены росписи, сложены из мелких камней разной величины, отчего фрески на них пострадали больше всего, особенно во время разборки склепа.

Мы удаляли грунт через отверстие, устроенное строителями. Пока изнутри освобождался свод, росписи не производили впечатления. На белой штукатурке были видны редкие красные пятна, как выяснилось позже — стилизованные лепестки роз. По мере того как убиралась земля и мы опускались вниз, наше удивление возрастало. Каждый пласт вынутого грунта открывал новые орнаменты и сюжеты. Рисунки плохо просматривались, так как были кальцинированы высолами, загрязненными грунтом. Часть сюжетов мы не увидели до сих пор — реставрация идет чрезвычайно медленно, высолы убираются вручную сантиметр за сантиметром. Фрески реставрируются в Москве и передаются затем в Анапский музей. Боюсь, что моей жизни не хватит, чтобы увидеть результаты полностью.

Когда склеп освободили от земли, в него стала интенсивно поступать грунтовая вода (да не из одного места, а по всей площади — она просачивалась между скальных слоев, разделенных материковыми глинами), быстро наполнившая склеп

до высоты в 1.5 м (уровень стояния грунтовых вод в Анапе за 2 тыс. лет значительно повысился). Ракушечник и штукатурка пропитывались влагой, отчего кальцинированные соли в местах слабого загрязнения становились слегка прозрачными. Мы удивлялись изобилию узоров, разнообразию сюжетов, яркости красок, варварской экспрессии, насыщенности всего и всем. Мы понимали, что перед нами не простое украшение стен: каждый узор и каждая сцена в погребальной архитектуре имеют глубокий смысл. Предстояло срочно фиксировать пропитанные водой фрески, чтобы успеть до заморозков их спасти. Непросто было пробудить у города понимание значимости находки. Сложно с откачкой воды: приехала помпа, но без рукавов, завтра — все наоборот. И так день за днем. Тогда не существовало современных средств фиксации, и пленку с цветными слайдами приходилось «доставать». Простые вопросы с техникой каждый раз заново решались по звонку министра культуры РСФСР председателю Горисполкома. Казалось, огромная гиря тормозит процесс. Для удобства фиксации фресок было решено вырыть рядом со склепом отстойник для грунтовых вод. Первый удар ковша экскаватора пришелся на крышку каменного саркофага — так в метре от склепа с фресками был открыт «скальный» склеп (склеп II 1975 г.). Он целиком вырублен в скале, сводчатый потолок имел в середине проем, равный размеру саркофага. Высота стен до пяты свода — 2 м, площадь — 10 м². Склеп оказался целиком засыпан рушенным скальным грунтом, вынутым при его рытье. Судя по составу погребального инвентаря (скелеты истлели полностью), он содержал мужское погребение в саркофаге, украшенном резным орнаментом, и захоронение двух девочек в соседнем. Наиболее богатый инвентарь содержал саркофаг с мужским погребением, до-



Перстни из цельного золота с геммами.

Здесь и далее — предметы из склепа II 1975 г.



Гемма на итальянском камне никола в золотом перстне: голова силена.

рогие и художественно исполненные предметы лежали также на полу склепа между саркофагами. Комплекс сохранился никем не потревоженным. В 1976 г. при зачистке скального грунта вблизи дромоса расписного склепа была открыта вырубленная в скале могила, перекрытая огромной плитой дикарного камня. Ее заполняла жидкая грязь, в которой от некогда богатого погребения уцелели пластина из тонкого золотого листа с рельефным зооморфным изображением и массивный перстень из цельного золота с геммой. Перстень идентичен двум другим из мужского погребения в скальном склепе.

Спасение фресок

Возник вопрос — что делать с раскопанным склепом? Решать проблему водоотвода и создания особого режима на месте обнаружения склепа никто не брался. Холода приближались, склеп был полон воды. Строительство стояло. Экспедиция решила разобрать склеп на блоки с маркировкой камней и осыпей штукатурки. Эту работу мастерски выполнил бессменный организатор экспедиции, ныне покойный Александр Шавырин. Стоя в воде, он стропил каждый камень, ежедневно «выбивая» у руководства города помпу, подъемный кран и погрузчик. Разобранный склеп был передан под охрану музея и зимовал на деревянном помосте, обшитый досками, на территории современного археологического заповедника. Тогда это был лишь большой раскоп в Горгиппии, статус заповедника он получил после того, как ЮНЕСКО признало анапские склепы 1975 г. выдающимся открытием года. Зимой кто-то проник в ангар с блоками и попытался выпилить для себя один из лучших мужских ликов, обведя его грубой канавкой, наивно полагая, что тот упадет ему в руки, но штукатурка плотно держалась на пористом камне. Следующим летом встала задача — спилить фрески с блоков со слоем камня. Это также оказалось непросто, хотя бы потому что струнную пилу удалось найти только в Армении, в Институте силикатов и камня. Пила сняла фрески с блоков со слоем камня толщиной 4 см для реставрации и дальнейшего экспонирования в закрытом помещении.

Следует сказать, что на сегодняшний день это практически единственные сохранившиеся фрески античной эпохи в нашей стране. В Северном Причерно-

морье (преимущественно вблизи Пантикапея, а также около Фанагории и в меньшей степени в некрополях Херсонеса и Ольвии) в XIX в. Императорской археологической комиссией исследовались десятки расписных склепов эпохи эллинизма и римского времени. Живопись зафиксирована акварельными рисунками и интерпретирована в фундаментальном труде с огромным «Атласом» [1, 2] блестящего российского историка М.И.Ростовцева, действительного члена Петербургской академии наук, профессора Петербургского университета, а в эмиграции — профессора Винконсинского и Йельского университетов. Все эти росписи давно утрачены, а место склепов утеряно. Войны, революция, разруха беспокойного XX в. не оставили им ни малейшего шанса. Только в Керчи сохранен на месте открытия так называемый склеп Деметры (с огромным ликом богини в центре свода), но доступ в него закрыт из-за критического состояния росписи. Несколько лет назад еще существовал перенесенный в Анапу из станицы Анапской подкурганый склеп, открытый в начале прошлого века Н.И.Веселовским, членом-корреспондентом Петербургской академии наук, профессором факультета восточных языков Петербургского (а затем Петроградского) университета, проводившим исследования в окрестностях Анапы. Недавно склеп был вытаскен из земли, так как мешал курортному строительству в Анапе. О разобранном склепе теперь никто не вспоминает, хотя застройщик обязан был его воссоздать, фрески в нем утрачены многие десятилетия назад.

Анапский склеп 1975 г. сравним с лучшими объектами, изученными Ростовцевым, если не превосходит всех их по обилию и сохранности росписи, а главное, по ее философскому содержанию.



Заповедник «Горгиппия». Улица III в. н.э. и подвалы домов.

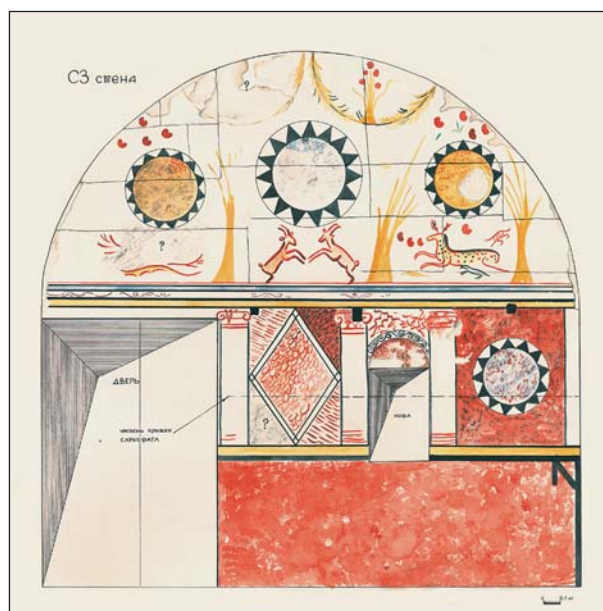
Роспись склепа

Роспись склепа, вся целиком, несет смысловую нагрузку, включая сюжеты, сцены, орнаменты и их элементы; декоративность и мастерство вторичны. Лица и фигуры персонажей выполнены разными художниками. Роспись склепа отражает обычное для населения Боспора первых веков нашей эры религиозно-философское мировоззрение, их восприятие космоса (в античности это слово соответствовало понятию миропорядка), их отношение к социальной статусности, вопросам жизни и смерти, культовые предпочтения и их традиционность.

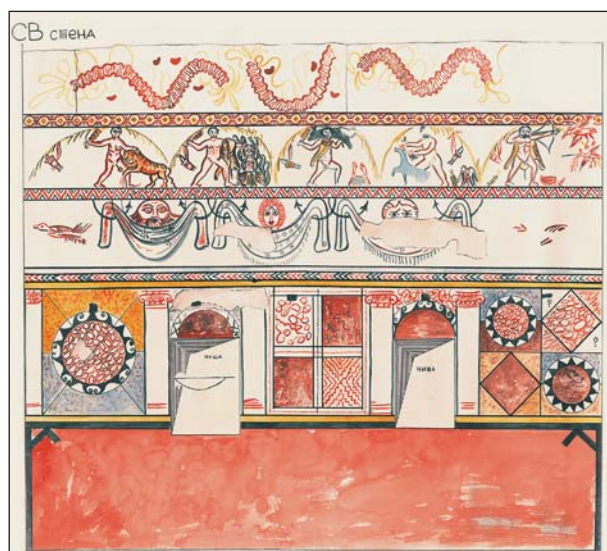
Роспись выполнена в популярном в первые века нашей эры (преимущественно во II в.) смешанном инкрустационно-цветочном стиле: легкий цветочный верх соединен с тяжелым блестящим инкрустационным низом. Роспись низа стен имитирует архитектурное членение кладки и ее инкрустацию плитками пестрого камня. Цоколь — красное поле. Штукатурка на нем стерта до белой основы и смята при установке каменных саркофагов. Мягкое сморщивание штукатурки могло образоваться только на еще не застывшем материале, а это значит, что саркофаги устанавливали спешно, не дав просохнуть росписи, что предполагает поспешное погребение и какую-то трагедию, постигшую семью.



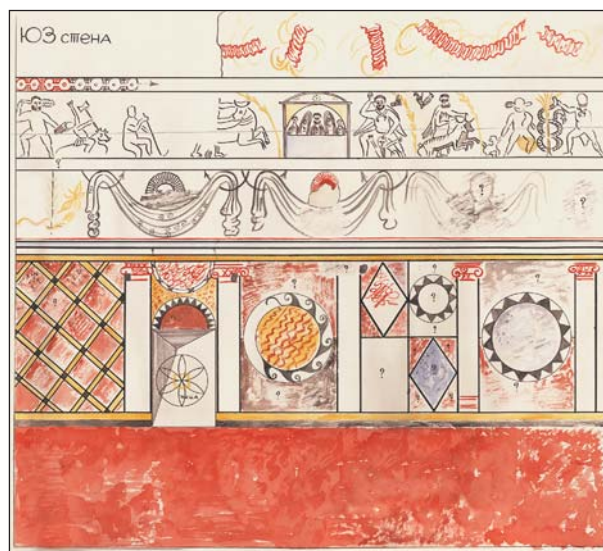
Роспись стены напротив двери.



Роспись стены с дверью в склеп.



Роспись стены слева от входа.



Роспись стены справа от входа.

Над цоколем на месте орфостатной (из больших блоков) квадратной кладки стены размещен пояс, имитирующий облицовку камнем. В богатых домах метрополии ее выполняли из плиток мрамора, яшмы и других пород пестрого камня. Истоки этого стиля ведут в Малую Азию и Грецию (на острова Делос, Феру, в малоазийские центры Пергам, Приену, Магнезию на Менандре). В IV—II вв. до н.э. роспись отличается архитектурной сдержанностью. Затем инкрустационный стиль распространился по Средиземноморью, достигнув в римскую эпоху небывалой роскоши (Александрия, Помпеи).

В Анапском склепе пояс с «мраморировками» разделен на прямоугольники белыми живописными пилястрами с капителями ионийского ордера, украшенными орнаментом ов* и крестов. Прямоугольники расчерчены тонкими линиями по сырой штукатурке на квадраты и ромбы, внутри которых вписаны круги в обрамлении лучей из треугольников и орнамента бегущей волны, круги размечены циркулем по сырой штукатурке. Большая шестилепестковая розетка внутри широкого круга с орнаментом мраморировки венчает центр свода. Еще одна аналогичная розетка, вписанная в круг, прочерчена по белой штукатурке внутри одной из ниш. Всего в стенах склепа на уровне верха крышек саркофагов устроено семь ниш, в которых, вероятно, размещались светильники, курильницы и какие-то предметы погребального инвентаря. В момент открытия склепа ниши были пусты. Маленькие розетки с точечными лепестками украшают живописные полотнища фриза с масками. Все эти лучистые круги и розетки символизируют солярный культ**.

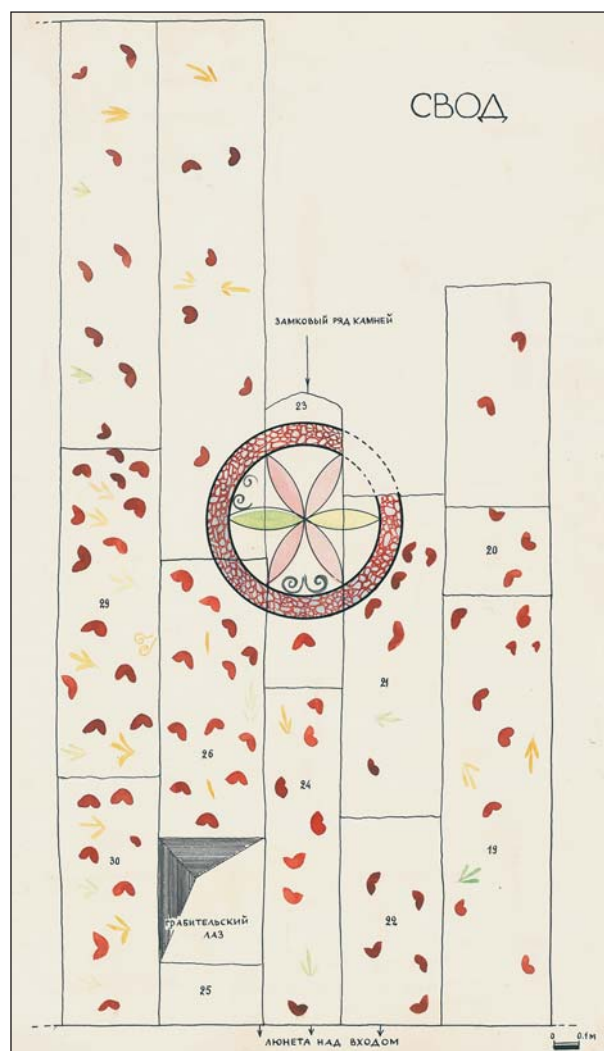
Солярная семантика росписи склепа соответствует культу, официально поддерживаемому правящей династией. Более того, в огромной Римской империи, объединившей земли Востока и Запада, произошло слияние многих близких по содержанию культов, и солярных в первую очередь.

Цветочные мотивы в росписи склепа занимают свод, выполняя орнаментальную роль. Белое поле свода покрыто разбросанными красно-розовыми



Лучистый круг с орнаментом, имитирующим пестрый камень.

лепестками, стилизованными завитками и маленькими желто-зелеными веточками с 3—5 листиками, они традиционны в росписях многих боеспорских склепов первых веков нашей эры. Боковые стены анапского склепа под сводом венчают фриз с красными гирляндами, перевитыми жел-



Роспись свода склепа.

* Овы (от лат. ovum — яйцо) — яйцеобразные орнаментальные мотивы в ионическом и коринфском архитектурных ордерах.

** Солярный культ (от лат. solaris — солнечный) — культ, связанный с почитанием Солнца. Он есть у всех народов. У древних греков богом Солнца был титан Гелиос, одно из древнейших до-олимпийских божеств. С включением в конце II в. до н.э. Северного Причерноморья в Понтийскую державу Митридата VI на Боспоре распространились восточные солярные культы. Митридат возводил свой род к династии древнеперсидских царей, династическая эмблема которых — шести- или восьмилучевая звезда — представляла собой символическое изображение Солнца. Солярные культы были развиты и в соседнем с Боспором ираноязычным сарматском мире. В орнаментике лучистые розетки, штампы и изображения крутящегося солнечного колеса, свастики, львов и коней относятся к солярной семантике.

тыми лентами. По такой же гирлянде размещено перед клювом каждого павлина на люнете напротив входа в склеп. Гирлянды исполнены предельно схематично, они изображают мешочки, наполненные лепестками цветов. Вместе с мелким растительным узором на белом фоне свода они повторяют распространенную в росписях боспорских склепов модель цветочного стиля.

Основную смысловую нагрузку росписи склепа несут фрески двух люнет и фриза с подвигами Геракла. Они раскрывают философию жизни и смерти в представлении людей, живших во II—III вв. н.э. Наиболее насыщена символикой роспись люнеты напротив входа. Ее семантика представляет космологическую структуру мира, трехъярусность которой соответствует представлению о трех мирах индоевропейской мифологии. Люнету обрамляют два стилизованных дерева со стволами и ветками желтого цвета, листва передана зелеными пятнами (верх крон утрачен вместе с камнями склепа). Деревья олицетворяют идею сакрального образа мира, космоса. Еще раз подчеркну, что для людей Античной эпохи понятие «космос» не означало Вселенную, а рассматривалось как всеобщий порядок. Под землей в зоне корней деревьев и стоящих саркофагов лежит нижний ярус космоса, подземный мир и царство Аида (Плутона). На уровне стволов деревьев в средней зоне космоса развивается земная жизнь. В росписи люнеты эти миры связывают плывущие в основании деревьев две черепахи — хтонический символ*. В первые века нашей эры в детские погребения часто помещали апотропеи (обереги) из египетского фаянса в виде черепашек. Черепаха — один из атрибутов Афродиты, связанный с хтонической стороной ее культа. В Дельфах, в святилище Аполлона, находилась статуя Могильной (Тихой, Надгробной) Афродиты, перед которой совершались обряды с возлияниями и мистическими молитвами с обращением к усопшим.

* Хтонический — олицетворяющий собой дикую природную мощь Земли, принадлежащий к подземному миру.

Повествование о подвигах Геракла в анапском склепе начато с левой от входа боковой стены и продолжено на правой, действие развивается по часовой стрелке. Геракл в первом подвиге изображен юным и безбородым; совершая дела, он мужает. Каждая сцена с подвигом обрамлена аркой из желтоватой оливковой лозы (по сказанию, спуск в Аид отмечен растущей на краю расселины оливой). Во всех сценах после первой Геракл представлен в шкуре убитого им Немейского льва, в каждой присутствуют его атрибуты — лук в горите (футляре для лука и стрел у скифов) и палица; горит обычно висит на лозе, палица находится в руках или стоит у ног. На левой от входа стене размещены сцены с Гераклом в следующем порядке: победа над Немейским львом, победа над Лернейской гидрой, усмиренный Эриманфский вепрь, подвиг с Керинейской ланью, стрельба из лука по Стимфалийским птицам. На правой стене повествование начинается борьба с царицей амазонок Ипполитой за пояс бессмертия, далее следует очистка Авгиевых конюшен и победа над Критским быком. В середине правой стены во фриз помещен семейный портрет. За ним еще четыре подвига: Геракл в пути за конями Диомеда, ведет коров Гериона, выводит трехглавого Кербера из царства Аида, добывает яблоки бессмертия.

В зоне земной жизни нарисована семейная пара в одеждах античного образца, торжественно сидящая в высоких креслах. Семейный статус фигур определяют процарапанные по сырой штукатурке граффити: «ПА» (греч. ПАΤΗΡ — отец, глава рода) около головы мужчины и «МН» (греч. ΜΗΤΗΡ — мать) рядом с головой женщины. Бородатое лицо мужчины свидетельствует о его долгом и успешном жизненном пути. Такой прием изображения статусности использовался и на надгробиях. Два свитка в левой руке мужского персонажа, скорее всего, подтверждают его семейный статус как главы рода. На мужских надгробиях персонажи также иногда держат неясно изображаемый цилиндрический предмет в левой руке. Мужчина показан произносящим речь, ее записывает мальчик-писарь (слуги



Спил фрески с правой от входа стены с двумя сценами. На левой Геракл добывает пояс бессмертия в стране амазонок (стягивает за волосы амазонку с гиппокампа, в руке амазонки двулезвийная секира). На правой Геракл сидит с заступом, вода (пестрые пятна) очищает конюшни Авгия.

изображались маленькими фигурками). В руках писаря — диптих (доска для записи, покрытая воском) и стил (стилос — заостренный стержень в функции карандаша). Достойная семейная пара в сюжете росписи олицетворяет вечное развитие всего рода владельцев склепа.

Наконец, кроны деревьев и геральдические позы двух огромных павлинов по обе стороны двойного широкого круга (солярный символ) вместе с уничтоженным строительством центральным изображением определяют зону верхнего яруса космоса — зону обитания бессмертных богов и героев (детей божества, у которых один из родителей был смертным жителем Земли и которые трудами «зарабатывали» право на бессмертие). В центр зоны космоса, в двойной круг, скорее всего, был включен лик-апотропей демона подземелья хтонического характера, символа безначальности и бесконечности времени — горгоны Медузы, что подтверждает уцелевшая в две петли змея. Она могла находиться, судя по аналогиям, под подбородком этого образа. Иконография Медузы эпохи архаики представляла ее оскаленным чудовищем с высунутым языком и змеями вместо волос. В искусстве эпохи классики Медуза превращается в юную деву. В рельефах первых веков нашей эры традиционные змейки остаются в волосах и под горлом вполне человеческого лица этого существа. Лик Медузы на люнете склепа, повернутый к двери, выполнял роль апотропея, ее взгляд должен был преграждать путь силам извне и охранять мир погребенных.

Роспись люнеты над входом в склеп также отражает философию жизни и смерти. Здесь та же символика «мирового дерева» и солярных культов, но примечательна сцена травли пятнистого оленя двумя хищниками (волками, собаками?). Данный сюжет несет сакральную идею «благотерзания» во имя необходимой смены жизни и смерти — это философия искусства кочевых народов южнорусских степей 1-го тысячелетия до н.э., мифологизированная идея умирания как залога новой жизни, привнесенная скифами. Мифологема терзания, широко представленная скифо-сарматским искусством звериного стиля, развивавшимся в степях в соседстве с основанными в Причерноморье греческими полисами, жила и в первые века нашей эры, что подтверждает находка парадного оружия в соседнем с описываемым скальным склепе. В саркофаге с мужским погребением лежал короткий меч в деревянных ножнах, обтянутых золотым листом. И на нем девять раз повторена сцена терзания зайца орлом. Хтонический смысл имеет и геральдическая поза козликов на той же люнете (подобно гербообразной постановке великолепных павлинов по обе стороны символа подземелья — Медузы). В погребальных инвентарях, на надгробиях и в росписях склепов фигуры в геральдических композициях обычно изображены по обе стороны дерева, колонны,



Геракл с амазонкой.



Геракл срывает яблоки бессмертия, охраняемые драконом.

тирса. По мнению ряда исследователей, эта вертикаль — символ космической оси, отражающей «зеркальность» миров живых и мертвых.

С погребальной обрядностью связан фриз вдоль боковых стен склепа с изображением развешенных на крюках больших драпировок, по три на каждой стене. Они исполнены черной краской, часть имеет тяжелые кисти, другие дополнены бахромой, точечными или лучистыми розетками.

В нарисованные изгибы ткани помещены лики, некоторые из них играли роль апотропеев. Одно лицо не реставрировано и еще полностью закрыто высолками, другое, под красными волосами, утрачено вместе со штукатуркой, третье, под копной черных волос, смазано во время росписи и не исправлялось. От четвертой головы сохранилась верхняя часть с отпугивающе большими глазами. Два лица уцелели полностью — лик в окружении красных волос (повторяющий иконографию гипсовых масок-налепов на саркофаги) и широкое бородатое лицо египетского бога Беса. Как и маленькие пронызи-черепашки, фаянсовые фигурки карлика Беса в экстагическом апотропеическом танце кляли в детские могилы преимущественно в I—II вв. н.э.

Картины и символы, столь многообразно представленные в склепе, взаимосвязаны и создают образ свершившегося жизненного цикла, в котором рождение есть смерть, а смерть есть рождение. Последний виток цикла связан с физическою смертью и следующим за ним вечным бытием. В целом роспись склепа — это метафора диалектики бытия, заключающейся в смене одного существования другим.

Общей символике склепа подчинены и полосы орнаментов, разделяющие фризы. Повторяющиеся на них непрерывной чередой узоры символизируют бесконечность циклов жизни. В древности такими орнаментами считались узоры бегущей волны и размещенная горизонтально восьмерка. Одна из орнаментальных полос в склепе содержит элемент, близкий к символу трезубца.

Кому принадлежал склеп?

Погребальный комплекс неординарен в целом — и символика росписи ограбленного в древности склепа с фресками, и установка в погребальных камерах массивных саркофагов из цельного камня, и богатейший погребальный инвентарь скального склепа, и обилие в нем по-настоящему дорогих вещей, значительная часть которых относится к семейным реликвиям. Ни одно из более чем 500 раскопанных в горгиппийском некрополе разновременных погребений не может сравниться с рассматриваемым. Комплекс склепов обнаружен в восточной части горгиппийского некрополя, недалеко от главных городских ворот и вблизи основной торговой дороги, ведущей в город. Именно так располагались привилегированные участки некрополей и в центрах метрополии. Семья, которой принадлежали склепы, имела на таком участке некрополя свое выделенное место. Вблизи рассматриваемых склепов исследовались и другие неординарные погребальные сооружения с каменными саркофагами и золотыми изделиями.

Во все периоды развития государства статус Горгиппии был выше многих его центров, так как это крупный портовый город, лежащий на пло-

родных землях (житнице государства) вблизи всегда беспокойных и отвоеванных у степняков границ. В ранний период (первая половина IV в. до н.э.) с городом была связана деятельность Горгиппа — брата и соправителя царя Боспора Левкона I, давшего городу новое имя. В I в. н.э. царь Аспург поощрил город особыми привилегиями в благодарность за верность. При Митридате Евпаторе (I в. до н.э.) монетный чекан был разрешен только трем боспорским полисам — двум столицам (Пантикапею и Фанагории) и Горгиппии. Попечением царя Савромата I (93—123 гг. н.э.) расширены городские укрепления, а царь Савромат II (174—210 гг. н.э.) пожертвовал причитающийся ему пошлинный сбор в гавани на строительство городского храма Посейдона. Горгиппия была единственным крупным полисом на обширных землях царства от предгорий Кавказа до второй столицы государства — Фанагории. Только Горгиппия и Феодосия (также приграничный полис с крупным портом на плодородных землях) управлялись наместниками, специально назначавшимися царем.

Открытый в Анапе неординарный погребальный комплекс мог принадлежать одному из главных магистратов города, назначаемому центральной властью. Среди таких чиновников эпиграфические документы называют наместника царя и лицо, должность которого переводится как «распорядитель царскими землями». Не исключено, что в таком важном для государства городе чиновники высокого ранга могли состоять в родственных связях с правящей династией.

Можно отметить достаточно деталей в смысловом содержании фресок и среди погребального инвентаря из скального склепа, подтверждающих высокую статусность владельца склепа и всей его семьи. Так, из саркофага с мужским погребением скального склепа происходит золотой венок с тисненой полуфигурой на центральном щитке Афродиты Урании*, покровительницы Боспорского царства, изображенной с навершием скипетра за плечом — символом Владычицы Апатура, главного святилища Боспора. В ранний период

* Литературная традиция приписывает Афродите две генеалогии, которые объясняют ее основные эпитеты (т.е. имена, прозвища, названия). Согласно древнейшей версии в изложении Гесиода [3, с.189—206], Афродита родилась из крови Урана (он утомил Гею, а их союз наплодил чудовищ), оскопленного Кроносом. Попав в море, сперма Урана образовала пену («афрос»). Такое происхождение дает Афродите эпитету Урания (Небесная), относя ее к первому поколению богов — титанам, первичным хтоническим силам, — делая ее старше Зевса и объясняя традицию присутствия ее образа в погребальных инвентарях. В Северное Причерноморье культ Афродиты привнесен первыми колонистами. Малоазийский полис Милет вывел на северные берега Черного моря наибольшее число апоектий (т.е. колоний). В VII—VI вв. до н.э. в Милете, на скалистом холме у моря, располагалось одно из древнейших святилищ Афродиты, ее культ переселенцы распространили и на новые земли.



Золотой венок с изображением на центральной щитке Афродиты Урании Владычицы Апатура, покровительницы Боспорского царства; за плечами богини — эрот и навершие скипетра.



Гемма на итальянском камне никола в золотом перстне с изображением Афины Парфенос и тамгой.

Боспора титул богини — «Владычица Апатура» — подчеркивал сакральный характер колонизационного процесса, который обосновывал права на приобретенные земли. На Боспоре Афродита имела свое сакральное место — святилище Апатур на Таманском п-ове (как полагают, вблизи Фанагории). Этимологию термина «Апатур» исследователи ведут от названия древнейшего общеоинийского праздника Апатурий — праздника фратрий (всех происходящих от одного предка), праздника инициаций для юношества и сакрального поединка за царскую власть. Уже в период колонизации богиня признавалась покровительницей мореходства, так как оно считалось жизнеполагающей сферой государственной деятельности и должно было иметь сакральную защиту. В первые века нашей эры правящая династия дала новую жизнь древнейшему культу. Царь Римитак передал храму богини земли вместе с пелатами (земледельцами); царь Савромат I восстановил уничтоженные временем портики храма Афродиты Апатуриады; на монетах царя Савромата II появляется изображение сидящей на троне Афродиты со скипетром в руке и стоящим рядом эротом (видимо, копия известной статуи). В Горгииппии в 110 г. наместник города воздвиг по обету на собственные средства храм Афродиты Навархиды (Судоначалницы).

К символам власти исследователи относят гривны — в саркофаге с мужским погребением лежала золотая. В центре древней Горгииппии найдена мраморная статуя (выше человеческого роста) наместника города — Неокла, сына Афенодора, поставленная в 186 г. н.э.; Неокл изображен с массивной гривной (с головой быка — букранием в центре) на шее. Гривны, особенно золотые, нередко присутствуют в самых богатых погребениях Боспора и в соседних с ним сарматских степей.

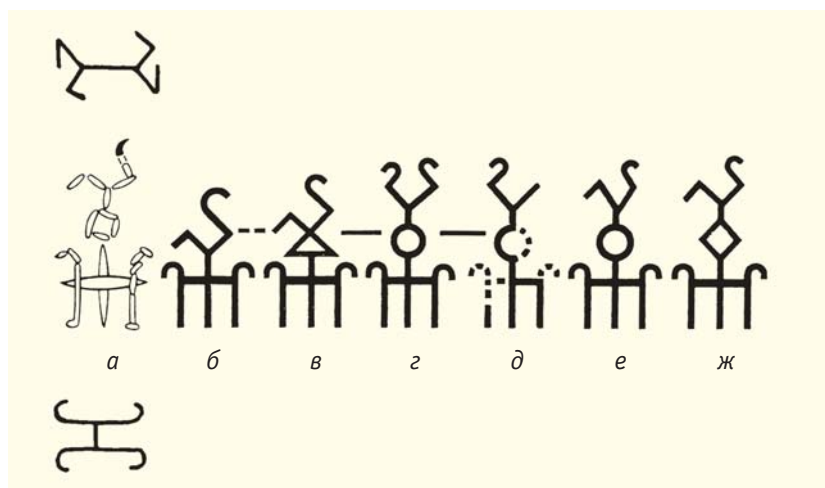
В скальной гробнице найден литой золотой перстень с геммой на итальянском камне никола (это разновидность агата). Сквозь светлый голубоватый слой камня на подстилающем темном слое вырезана Афина в аттическом шлеме с копьем и щитом. Под ее вытянутой рукой дополнительно вырезана (несомненно на Боспоре) тамга. Гравировка знака примитивнее качества основного изображения, при увеличении видны зазубрины. В первые века нашей эры государственным языком Боспора оставался греческий. Местное население письменности не имело, в его среде получили распространение тамгообразные знаки. Каждый царь поздней боспорской династии, корни которой ведут в сарматский мир, имел свой личный знак, видоизменяя мелкими деталями уже использовавшиеся предыдущими правителями. Тамга на перстне входит в ряд шести и более знаков, имеющих одинаковую нижнюю часть в виде



Гривна с геракловым узлом в центре.



Парадное оружие: короткий меч в деревянных ножнах.



Тамгообразные знаки населения Боспорского царства первых веков нашей эры. Для части из них установлена взаимосвязь с именами боспорских царей. Тамга Аспурга (8 г. до н.э. — 38 г. н.э.) — основателя династии с сарматскими корнями в генеалогии (верхний ряд). В среднем ряду: *а* — тамга с геммы на золотом перстне из мужского погребения склепа II; *б*—*д* — именные знаки царей одной династии: *б* — Римиталка (131—153 гг. н.э.), *в* — Евпатора (154—170 гг.), *г* — Савромата II (174—210 гг.), *д* — Рескупорида III/II (210—224 гг.); не идентифицированные: *е* — множественные знаки на камнях и предметах из Керчи; *ж* — знак на пряжке из Одесского музея. Тамгообразный знак царя Ининфимея (234—239 гг.) — основателя новой династии (нижний ряд).

трезубца, варьируют только детали над трезубцем. Высказывалось мнение, что символ трезубца на царских тамгах не случаен, он отражает сакральное покровительство династии, ведущей свой род от Посейдона (трезубец присутствует и на монетах царей этой династии). Все шесть знаков относятся к династии, правившей с I в. по 234 г.; из них только для трех знаков устанавливается связь с конкретным правителем. Скорее всего, тамгу анапского перстня можно отнести ко времени между 227 и 234 гг., когда правили цари Котис III,

од строительства склепа на Боспоре правила династия, которая возводила свой род к Гераклу. Для признания неизбежности власти необходимо основание. Мифологизированное сознание древних проблему сакрализации власти решало с помощью предков-богов. Еще в период становления Боспорского государства в конце V в. до н.э. династия Спартокидов возводила свой род к Посейдону и его сыну Евмолпу, который, в свою очередь, считался родоначальником фракийцев. Исследователи, основываясь на ономастике имен, обосно-

Савромат III, Рескупорид IV. Личный знак Ининфимея, сменившего Рескупорида IV, построено по новой схеме, что отражает смену династии.

Парадное оружие из мужского погребения в скальном склепе — короткий меч с деревянной рукояткой в деревянных ножнах, обтянутых золотым листом и инкрустированных бирюзой и гранатами. Оклад ножен украшен рельефными фигурами трех орлов, павлина и сценами терзания. Рельеф исполнен тиснением. Золоченое оружие указывает на высокий статус их владельца. Находки мечей подобной формы с полихромной инкрустацией и рельефами единичны и происходят из погребений статусных лиц (царей-вождей в донских степях, Грузии, Афганистане). В анапском склепе парадное оружие дополняет конская сбруя, украшенная золотыми накладками и инкрустацией из бирюзы.

Символики росписи

Безусловно высокий социальный статус владельца погребального комплекса помогает объяснить роль подвигов Геракла в росписях склепа. Мы полагаем, что владельцы склепа вели свой род от мифологического предка, от Геракла. Подсчеты современных исследователей показали, что в античном мире Геракл считался основателем более 20 полисов, а около 40 получили названия в его честь, к нему возводила род не одна династия; Геракл упоминается в античных изложениях скифского генеалогического мифа. В пери-

ывают фракийское происхождение ранней боспорской династии Спартокидов, правившей около трех столетий. На клеймах черепиц III в. до н.э., выпускавшихся в принадлежащих царю эргастериях, изображались эмблемы божественных родоначальников Спартокидов — трезубец и дельфин.

В I в. н.э. царь Аспург, положивший начало сарматской династии, женился на представительнице фракийского царского дома, возродив для боспорских царей прерванную при Митридате древнюю ветвь генеалогического древа. Породнившись с фракийским царским домом, он в результате матримониальных контактов вновь получил право считать божественным предком рода Посейдона и его сына Евмолпа. С другой стороны, мать Аспурга — Динамия — была внучкой царя Митридата VI Евпатора, что «добавило» в генеалогию еще одного мифологического предка — Геракла, правнука бога Персея, родоначальника персов. Отсюда у боспорской династии появились зодиакальные символы иранской династии — звезда и полумесяц, соответствующие главным культам иранского мира, богам Митре и Мену. На монетах царей этой боспорской династии (I—III вв. н.э.) соседствуют символы Геракла (палица, шкура убитого им льва) и Посейдона (трезубец). Царь Савромат II на рубеже II—III вв. н.э. выпустил серию монет со своим портретом на лицевой стороне и каноническими подвигами Геракла на реверсе. В Горгиппии найдена монета этой серии — Геракл с Эриманфским вепрем на плечах. Эпиграфические документы с почетными надписями с территории Боспора, в том числе и Горгиппии, называют трех царей сарматской династии происходящими от Посейдона, Евмолпа и Геракла. Поскольку от Геракла вела свой род царствовавшая в то время династия, можно с определенной вероятностью предполагать, что эта знатная семья из Горгиппии находилась в родственных связях с царствующим домом, с чем согласуются как солярная символика фресок, так и тамга царствующего дома на золотом престоле.

Роль Геракла в росписи анапского склепа шире функции мифологического предка, его образ тесно связан с концепцией смерти и представлениями о посмертной судьбе. Всего фрески изображают семь членов семьи, которой принадлежали склепы: пять ликов на семейном портрете и два главных персонажа на люнете напротив входа. В склепе с фресками вдоль стен стояло три саркофага; в скальном склепе в одном саркофаге (наиболее роскошном из всех) был похоронен мужчина, в другом — две девушки; седьмое захоронение содержала скальная могила — в общей сложности в трех погребальных сооружениях было захоронено не менее семи человек. Два бородатых мужских лица на фресках склепа принадлежат разным людям (на люнете напротив входа и в семейном портрете на боковой стене). Бородатый мужчина в центре семейного портрета — очевидно, стар-

ший сын главного персонажа, главы рода, изображенного на люнете напротив входа. Сын на фреске представлен в окружении своей семьи. Изображение главы рода и следующего за ним поколения выражает идею бесконечности развития рода.

В росписи склепа главный персонаж с люнеты отождествлен с Гераклом. Вместе с ним он доблестно прожил земную жизнь и, подобно Гераклу, получил право на посмертную жизнь. Для определения подвигов Геракла древние авторы пользовались термином «труды, дела», в отличие от слова, обозначавшего «побочные дела». Деяния Геракла размещены на фресках склепа в традиционной последовательности: в ранних подвигах он изображен молодым и безбородым, затем — возмужавшим и бородатым, что создает пространственно-временную перспективу совершившейся человеческой жизни. Путь Геракла символизирует путь главного персонажа росписи. Главный герой — глава семейства — выделен из родственной группы. Надо полагать, именно он уподобляет себя Гераклу, но их образы не слиты вместе (он не изображен в облике Геракла, как это делалось, например, на малоазийских саркофагах или как изображали Александра Македонского в облике Геракла с мордой льва на голове). Представленная схема (глава рода — деяния Геракла) предполагает апофеоз для главного персонажа росписи, т.е. превращение смертного в бессмертного*. Это метафора совершенной, в понимании человека Античной эпохи, человеческой жизни. Знаком превращения служит пояс с масками, размещенный именно под фризом с подвигами Геракла. Пояс несет концепцию жизни как игры и постоянных превращений. Эта идея воплощена на одном из пышно оформленных римских саркофагов (из Веллетри) — на нем изображена сцена римского театра. Полотнища, символически развешенные на крюках между масками на фризе анапского склепа, изображают театральные занавесы (некоторые в склепе нарисованы с тяжелыми кистями и бахромой). Эту же идею отражают известные в некрополях Причерноморья раскрашенные гипсовые маски актеров, которыми украшали саркофаги.

* Греческая идея трудами достигнуть апофеоза в римскую эпоху сливается с идеей божества-спасителя. В первые века нашей эры на территории Римской империи на первый план выдвигаются боги-спасители, их функции добавляются к издревле известным культам (например, Зевс получает эпиклезу Сотер — Спаситель). Геракл спасает главного героя фресок, как, согласно мифу, он спас Алкесту — жену Адмета, вернув ее из подземного мира в земной. Согласно мифам, Геракл, спускаясь в царство Аида, спас прикованного у входа Тесея и по заданию Эврипидея вывел из подземного царства трехглавого стража Керберы, а затем вернул его назад. Спасительную функцию Геракл получил нечеловеческими трудами, это его путь к собственному апофеозу: согласно мифу, свершив дела, Геракл стал бессмертным богом, принятым на Олимпе. Каждый отдельный подвиг расценивается как победа его над смертью.

Значимость земных дел главного персонажа в росписи склепа распространяется на всю его семью — во фризе с подвигами Геракла вторгается семейный портрет (бородатый мужчина, две женщины и два юноши). Их лики размещены внутри арки — они удостоены храма (метафора образа неба на земле). Символично завершение фриза с подвигами Геракла апофеотической сценой, подвигом под названием «яблоки Гесперид» — Геракл срывает золотые яблоки бессмертия перед дверью склепа, выводя в новую жизнь погребенных в нем.

На фреске склепа в интерпретации этого подвига экспрессивная фигура Геракла в рыжей львиной шкуре за спиной (лапы льва перекрещены на груди) тянет рукой растение, обвитое большим змеем, вдоль ноги Геракла свисает его палица. Перед сценой с яблоками Гесперид в склепе помещена сцена с трехглавым псом Кербером. Обе эти сцены размещены у самой двери в склеп, символизируя для погребенных возможность выхода из царства мертвых к новой жизни. Фриз с подвигами Геракла несет идею вечного цикла перемен, бесконечного течения и торжества жизни.

Датировка склепа

Подводя итог интерпретации комплекса, необходимо обосновать его датировку. Он относится к последнему строительному периоду Горгииппии, время которого приходится на промежуток между правлением царя Савромата I (93—123 гг. н.э), при котором началась восстановительная строительная деятельность в государстве, и гибелью города в пожаре 238/239 г. н.э. при начавшемся готском передвижении племен. Цветочно-инкрустационный стиль росписи каменного склепа характерен для боспорских склепов II в. Время же бытования предметов погребального инвентаря из скального склепа и могилы по аналогичным находкам определяется широкими рамками — от рубежа тысячелетий до первой половины III в. н.э. Среди найденного выделяются группы как более ранних предметов (их считают семейными реликвиями), так и более поздних. Время совершения захоронения всегда определяет наиболее поздняя находка. Таковой в рассматриваемом комплексе следует считать золотую фибулу из саркофага с мужским погребением в скальном склепе. Ее тип археологическим контекстом множества погребальных комплексов Северного Причерноморья относится к эпохе распространения позднесарматской культуры и датируется в пределах заключительной части II в. и начала III в. до так называемого готского передвижения племен и учиненного ими тотального разгрома большинства центров античной культуры в Причерноморье. Тамга на золотом перстне позволяет условно сузить дату захоронения в комплексе до рубежа 20—30-х годов III в.

Приход к власти в 234 г. нового царя — Инифимея, ставленника аорсов, ознаменовался появлением новой тамги, прервавшей в царских знаках «схему трезубца». Смена династии, очевидно, сопровождалась ожесточенной борьбой за власть, в результате которой могла погибнуть вся семья знатного вельможи из Горгииппии, связанная семейными узами с прекратившейся династией. Штукатурка, смятая невысохшей спешной установкой тяжелых саркофагов и единовременное захоронение трех человек в скальном склепе свидетельствуют в пользу внезапной трагедии, постигшей всю семью. Гибелью семьи можно объяснить и большое количество семейных реликвий в погребальном инвентаре.

В заключение считаю своим долгом сообщить общественности, что с 2000 г. археологических исследований на Горгииппии, памятнике федерального значения, не ведется, несмотря на наличие в нашей стране Министерства культуры, структуры охраны памятников в Краснодарском крае и никем не отмененного Закона об охране



Бронзовая курильница, украшенная выемчатыми эмальями.



Пряжка. Золото, бирюза.



Бронзовый светильник с головой утки.



Браслет из цельного золота, инкрустация бирюзой, вставка — стекло.



Бляха с мордой льва, глаза — агаты. Бронзовая основа, обтянута золотым листом. Украшение конской сбруи.

наследия. Даже участки, непосредственно прилегающие к склепам, открытым в 1975 г. и занимающие, без всякого сомнения, центральную часть горгиппийского некрополя, были поставлены под экскаватор без исследования. Лишь в единичных котлованах под частные мини-гостиницы в эти годы удалось провести наблюдения за земляными работами. Нельзя даже приблизительно оценить масштаб ущерба, нанесенного памятнику, особенно его некрополю, и государству в целом такими методами использования дорогой земли у моря. Когда в Анапе работала экспедиция Академии наук, во всех котлованах в пределах памятника были встречены сохранившиеся в той или иной степени археологические находки. Культурный слой античного памятника помимо дорогих и художественных предметов — достояния страны — содержит огромное число научно

значимых артефактов, воссоздающих его историю. Высокий научный и общественный статус памятника Горгиппии требует систематического исследования его коллективом специалистов, как это принято во всем мире. Археологические исследования стоят дорого. Застройка памятника федеральной категории по существующему законодательству должна финансово обеспечивать его исследование, тем более что все строительство в Анапе ведется частным капиталом с целью получения прибыли в курортном бизнесе. Новгород, Псков, Рязань, Москва и много других развивающихся городов в нашей стране так или иначе справляются с этой проблемой. Анапа при содействии органов охраны наследия полтора десятилетия планомерно уничтожает главное свое достояние, фактически закрыв экспедицию Российской академии наук. ■

Литература

1. Ростовцев М.И. Античная декоративная живопись на юге России. Т.I: Описание и исследование памятников. СПб., 1914.
2. Ростовцев М.И. Античная декоративная живопись на юге России: Атлас. СПб., 1913.
3. Гесиод. Теогония // Эллинские поэты. Сер. «Библиотека античной литературы». М., 1963.

Две жизни В.Ю.Гаврилова

С.Л.Богданова,

кандидат биологических наук,

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

В начале 1960-х годов нас, нескольких выпускников кафедры биохимии растений биофака МГУ, Игорь Степанович Кулаев пригласил на работу в новый радиобиологический отдел Института атомной энергии, сказав, что мы будем заниматься генетическим аминокислотным кодом. Все это звучало очень заманчиво, почти загадочно, и мы, мало что умевшие, были полны энтузиазма. Однако вскоре планы нашего руководителя изменились, и он перешел на работу в МГУ. И вот нас, совсем еще юных «беспризорников», пригласил к себе на беседу директор (физики его называли «начальник») радиобиологического отдела Виктор Юлианович Гаврилов. Ему было тогда только 43 года, но выглядел он намного старше — его возрасту не соответствовали усталость глаз и седина висков.

Нам рассказывали, что до работы в радиобиологическом отделе Гаврилов занимался атомным оружием, но ничего конкретного тогда мы не знали, да и позже об этом не слышали от него ни слова. Думаю, причиной тут была не только подписка о «неразглашении государственной тайны», но и природная скромность Виктора Юлиановича. Что могло заинтересовать его в биологии, мы тогда не знали, но при первой встрече он нам сказал: «Не разбегайтесь, пока мы не подыщем вам хорошего заведующего, а сейчас поработаете в лабораториях замечательных ученых нашего отдела, многому научитесь. Вы будете заниматься молекулярной биологией, а именно, как бы мне хотелось, генетическим аминокислотным кодом. Это сейчас самая важная область биологии. Она бурно развивается в мире, и мы в нашей стране должны здесь что-то сделать». Нас вскоре действительно распределили по разным лабораториям отдела, где мы продуктивно трудились. Однако, уйдя из начальников, Гаврилов пригласил нас в свою лабораторию. Мне посчастливилось работать с этим замечательным и во многом уникальным человеком 10 лет.



Виктор Юлианович Гаврилов. 1963 г.

В истории российской науки было немало прекрасных ученых, имена которых сейчас несправедливо забыты или полужабыты. В силу разных обстоятельств они не снискали высоких академических званий, у них не было времени писать учебники и монографии с громкими названиями, или же, отдав все силы любимому делу, они слишком рано ушли из жизни. В то же время более глубокое знакомство с биографиями этих поборников знания убеждает, что без их энтузиазма и самопожертвования трудно представить себе развитие целых областей нашей науки. К таким ученым, несомненно, относится Виктор Юлианович. Он прожил в науке две жизни: первая была связана с разра-

боткой ядерного и термоядерного оружия; вторая — со становлением отечественной молекулярной биологии и молекулярной генетики. И если о первой участники атомного проекта физики А.Д.Сахаров [1], Ю.Б.Харитон [2], А.П.Александров [3] и В.Б.Адамский [4] оставили хотя и краткие, но яркие воспоминания, то о второй жизни Гаврилова нынешнему научному сообществу известно гораздо меньше. В этой статье хотелось бы в какой-то степени восполнить этот пробел.

Виктор Гаврилов родился в Петрограде в первый день бурного и судьбоносного 1917 г. Его отец, немецкий коммерсант, который вел дела в России, покинул страну вскоре после революционного переворота. Вся тяжесть воспитания сына в трудных условиях того времени легла на плечи матери, фамилию которой он и носил. После окончания школы Виктор поступил на математико-механический факультет Ленинградского университета, на кафедру астрофизики, основанную и руководимую в то время выдающимся астрономом В.А.Амбарцумяном. После отличного окончания университета в 1941 г. Гаврилова оставили сотрудником в лаборатории доцента той же кафедры и сотрудника обсерватории Ленинградского университета А.И.Лебединского. В начале Великой Отечественной войны Виктор Юлианович вступил в ряды народного ополчения, но как спе-

циалист с высшим математическим образованием был направлен на учебу в Ленинградскую военно-авиационную академию им. А.А. Жданова, где после ее окончания некоторое время преподавал математику и физику. Поворотным событием в судьбе Гаврилова стало знакомство в 1946 г. с крупнейшим физиком-теоретиком Я.Б. Зельдовичем, по приглашению которого он вошел в состав теоретической группы в Институте химической физики АН СССР в Москве.

В атомном проекте

Уже через год, в 1947 г., Виктор Юлианович, заслуживший репутацию отличного физика и математика, стал сотрудником КБ-11 (сейчас — Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский научный научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров Нижегородской обл.), в котором начинался крупнейший проект по созданию отечественного ядерного и термоядерного оружия. Там он вместе с физиком Д.А. Франк-Каменецким и талантливым учеником А.Н. Колмогорова математиком А.Н. Дмитриевым занимался нейтронными расчетами. Одновременно с работой в теоретическом отделе Гаврилов и Дмитриев исполняли обязанности научных секретарей руководителя атомного проекта Харитона. Молодые люди организовывали научные встречи Юлия Борисовича с сотрудниками различных отделов, научные семинары, готовили для него необходимые материалы и даже отвечали за его безопасность во время работы на объекте и в поездках в Москву.

Вплоть до 1958 г. Виктор Юлианович участвовал в разработке всех первых образцов ядерных и водородных зарядов, и не только как теоретик. Будучи начальником экспериментальной лаборатории, он руководил работами по изучению воздействия нейтронных пучков на различные материалы (в частности, работой знаменитого ФИКОБЫНа — физического котла на быстрых нейтронах).

В начале 50-х годов Гаврилова командировали в Москву, на работу в Первое управление атомной промышленности (позднее — Министерство среднего машиностроения СССР). Большая административная нагрузка не помешала ему провести расчеты радиоактивного следа (заражения местности), которое могло возникнуть после предстоящего испытания первой водородной бомбы во второй половине июля 1953 г. Его расчеты показали, что радиоактивное загрязнение местности намного превысит размеры полигона и будет представлять серьезную опасность для населения. Коллеги признали его расчеты верными и требование Гаврилова о переносе срока испытания на месяц удовлетворили. За три недели до испытания из окружающих населенных пунктов были эваку-

ированы тысячи людей. Они смогли вернуться в свои дома только через год после успешного испытания первой водородной бомбы 12 сентября 1954 г. Так Гаврилов спас сотни тысяч жизней от запредельных доз облучения.

В 1953 г., незадолго до своей смерти, И.В. Сталин подписал указ об организации за Уралом НИИ-1011 — объекта-дублера Арзамаса-16. Новый ядерный центр формировался по замыслу К.И. Щелкина (заместителя Харитона), ставшего его первым руководителем. Для нового центра из КБ-11 отобрали 19 человек, среди которых был и Гаврилов. На объекте в г. Снежинске (в то время — Челябинск-50, после 1953 г. — Снежинск) Гаврилов был заместителем научного руководителя по экспериментальной физике, а также начальником физического отдела. Он активно участвовал в становлении института, занимаясь подбором научных и инженерно-технических кадров. Этот объект имел научное и стратегическое значение, так как кроме разработки опытных образцов там осваивалось серийное производство наиболее удачных вариантов оружия года. Во времена гонки вооружений и соревнования с США быстрое создание нового ядерного центра (менее чем за три года) было важным достижением СССР. В НИИ-1011 Гаврилов проработал до 1957 г. Теперь это Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина». В 1955 г. на объектах готовились испытания нового варианта заряда: изделие сбрасывалось в виде авиабомбы на большой высоте, что уменьшало радиоактивный след на поверхности земли. Однако расчеты по интенсивности теплового излучения были сделаны неверно, что и обнаружил Гаврилов. Согласно его расчетам, при таком мощном излучении самолет-носитель должен был разрушиться, поскольку бомба при сбросе по инерции продолжала двигаться за самолетом. Испытания отложили, пока не разработали способ торможения бомбы с помощью мощного парашюта. За тщательность и «прецессионность» (любимое слово Гаврилова), коллеги по работе в Сарове и друзья звали его в шутку «злой гений Гаврилов» — Виктор Юлианович буквально хватал их за руку при малейших огрехах в расчетах.

За 15 лет работы в атомной промышленности Гаврилов трижды стал лауреатом Сталинской, а позднее Государственной премии, был награжден орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, его ценили за выдающиеся организаторские способности и высокое чувство ответственности. Моральная сторона работы в создании оружия массового уничтожения, ответственность ученого перед человечеством всегда волновали Виктора Юлиановича. В теоретических отделах велись посвященные этическим проблемам семинары, которые сформировали единое мнение участников о необходимости заключения между-

народного соглашения о запрещении испытаний атомного и водородного оружия в трех средах. Гаврилов был одним из активных участников этих семинаров и подготовки проекта. Так, «Московский договор», заключенный в 1963 г., после ухода Гаврилова из Сарова (он уже возглавлял радиобиологический отдел), готовился при его активном участии.

В радиобиологическом отделе Института атомной энергии

О решении поручить Гаврилову организовать в Институте атомной энергии крупный радиобиологический отдел вспоминает А.П.Александров: «Мы считали, что он (Гаврилов. — С.Б.) будет хорошим организатором этого дела. Он занимался атомным оружием, в этой области проявил себя хорошим организатором и квалифицированным физиком, который способен разобраться в очень трудных ситуациях и организовать дело так, чтобы оно получилось» [3, с. 192].

Виктор Юлианович с радостью принял это предложение, так как уже давно интересовался проблемами экологии и физической сущности биологических процессов. Сахаров в своих «Воспоминаниях» пишет: «В это время я вновь сблизился с Виктором. Мы часто беседовали, когда я приезжал в Москву. Одной из излюбленных «общих» тем было будущее человечества (он говорил, что благодарит судьбу, что не родился в XXI веке). Из этих разговоров, быть может, я и включил в круг своих мыслей экологические, демографические и другие глобальные проблемы» [1, т.1, с.161].

На самом деле И.В.Курчатов и его соратники, организуя в Институте атомной энергии новый отдел, кроме развития работ по радиобиологии преследовали еще одну важную цель. Они понимали, что серьезные радиобиологические исследования возможны только на базе генетики. Поскольку к этому времени классическая отечественная генетика была растоптана Лысенко и его сообщниками, организаторы отдела хотели собрать в нем боеспособных приверженцев истинной генетики, многие годы лишенных любимого дела. Задача осложнялась тем, что стоявший тогда во главе государства Н.С.Хрущев в вопросах биологии и сельского хозяйства все еще полностью доверял Лысенко. И реализовать столь трудную задачу Гаврилову удалось только благодаря огромному авторитету Курчатова в правительственных кругах. Наверное, это был самый эффективный и благородный (хотя и далеко не единственный) шаг физиков-атомщиков в деле возрождения отечественной биологии. Список опальных врагов «лысенковщины», которых Гаврилов пригласил как организаторов лабораторий в отделе, производит сильное впечатление: С.И.Алиханян, Б.Л.Астауров, С.Н.Ардашников, М.Л.Бельговский, Р.Б.Хесин-Лурье, Н.И.Шапиро. Из Института атомной энергии в отдел перешли специалисты по молекулярной физике: Ю.С.Лазуркин и М.А.Мокульский, а также химики К.С.Михайлов и Л.Н.Николенко. Для отдела Гаврилов собрал блестящий коллектив из молодых инженерных кадров института, способный в его лучших традициях справиться с любой проблемой приборостроения.

Итак, в числе главных задач радиобиологического отдела были возрождение генетических исследований и ликвидация серьезнейшего отставания этой науки в нашей стране от мирового уровня, подготовка грамотных молодых исследователей в различных областях генетики и только что зарождающейся молекулярной биологии. Физики и химики должны были научиться понимать биологические проблемы и помогать биологам технически и методологически. К сожалению, радиобиологическое направление как таковое в отделе так и не получило серьезного развития из-за ранней смерти возглавлявшего его генетика-радиобиолога Ардашникова. Другие заведующие лабораториями, наконец-то получившие возможность заниматься серьезной наукой, настолько увлеклись собственными исследованиями, что их вряд ли можно было убедить изме-



Здание радиобиологического отдела Института атомной энергии им.И.В.Курчатова (ныне Институт молекулярной генетики РАН). 1970 г.

нить тематику. Кроме того, в те же годы в г.Обнинске в системе Минздрава СССР возник крупный Институт медицинской радиологии, куда со временем переехал с Урала классик радиационной генетики Н.В.Тимофеев-Ресовский. Так или иначе, радиобиологический отдел Курчатова сосредоточился на проблемах молекулярной биологии и генетики. Как показало время, это было правильное решение.

Виктор Юлианович возглавлял радиобиологический отдел Института атомной энергии всего пять лет — с 1959 по 1964 гг. (затем руководил одним из его секторов) — и за это время либо сам инициировал новые направления, либо способствовал их зарождению. Так, работы Алиханяна по генетике и селекции микроорганизмов в стенах отдела достаточно быстро увенчались получением сверхпродуцентов ряда важных сельскохозяйственных и медицинских препаратов, в частности незаменимой аминокислоты лизина. Инженерная команда Гаврилова сконструировала ферментер ПУЛ (полупромышленную установку для получения лизина), на котором уже к концу 1968 г. получили 200 кг чистого лизина для сельского хозяйства. Лаборатория Гаврилова работала столь успешно, что именно на ее базе в 1968 г. создали первый научный биотехнологический центр в нашей стране — знаменитый Всесоюзный научно-исследовательский институт генетики и селекции промышленных микроорганизмов (ВНИИгенетика) Главмикробиопрома.

Уже в первые годы существования радиобиологического отдела один из основоположников отечественной молекулярной биологии Р.Б.Хесин-Лурье с сотрудниками исследовали механизм регуляции транскрипции генома Т-четных фагов. Логическим продолжением этой работы стало изучение структуры и функции одного из ключевых ферментов клетки — РНК-полимеразы [5]. Эти эксперименты сразу же завоевали мировое признание. Примечательно, что среди специалистов в этой области были и лучшие воспитанники Гаврилова, его бывшие дипломники из Физтеха Ю.Н.Зограф и В.Г.Никифоров. Тогда же было решено, что сотрудник этой лаборатории В.А.Гвоздев должен возглавить самостоятельное направление в области генетики дрозофилы. Сейчас академик В.А.Гвоздев — один из мировых лидеров в области молекулярной генетики зукариот.

В 60-х годах Ю.С.Лазуркин и его ученики Э.Н.Трифонов и М.Д.Франк-Каменецкий иници-



В.Ю.Гаврилов со своими сотрудниками на воскреснике. 1971 г.

ровали в отделе оригинальные и исключительно успешные исследования физики ДНК. Тогда же там сформировалась одна из лучших в стране лабораторий по клеточной биологии во главе с Н.И.Шапино. С первых дней существования отдела, еще до обретения собственного здания, К.С.Михайлов и Л.Н.Тищенко под руководством Гаврилова научились получать меченые тритием физиологически активные соединения — аминокислоты, пептиды и нуклеотиды. В 1964 г. эти эксперименты продолжил, а впоследствии и возглавил приглашенный Гавриловым молодой радиохимик, будущий академик Н.Ф.Мясоедов. На сконструированной в те годы и позднее усовершенствованной установке ОВТ (обмен водорода на тритий) и сейчас получают уникальные препараты, которыми пользуются многие научно-исследовательские лаборатории страны. Сделанный в отделе газопоточный счетчик позволял измерять радиоактивность мишени с двойной меткой, что в те годы было отнюдь не тривиальной задачей.

В 1961 г. в отделе стали развивать направление, связанное с синтезом и выделением нейропептидов. Для этого Виктор Юлианович пригласил специалиста по анализу и синтезу пептидов В.М.Незавибатько, только что прошедшего пятилетнюю стажировку в ГДР. Объектом исследования выбрали адренокортикотропный гормон. Поиском его активного начала, а позднее превращением найденного фрагмента в лекарство Незавибатько занимался с первого дня работы в отделе и до последнего дня своей жизни. К сожалению, исследователь не застал окончания клинических испытаний и лицензирования препарата «Семакс», который и сегодня производится и совер-



Киевский генетик С.М.Гершензон и В.Ю.Гаврилов на второй школе по молекулярной генетике. Дубна. 1966 г.

шенствуется под руководством Н.Ф.Мясоедова. Это лекарство широко используется в современной неврологии.

У Виктора Юлиановича было немало собственных интересов в области молекулярной биологии. Он познакомился с этой наукой на рубеже 50-х и 60-х годов и как математик сразу же увлек-

ся аминокислотным кодом. Он считал, что эту генетическую проблему нельзя решить, пока в руках исследователей не будет индивидуальных матричных РНК. Гаврилов разрабатывал теоретические, намного опережавшие время схемы для получения информационных РНК. По его замыслам, в основе метода должно лежать сравнение профилей плавной термоэлюции РНК из РНК-ДНК-гибридов, иммобилизованных на колонке. При этом РНК нужно выделять из штаммов бактерий с различной активностью выбранного гена. Инженеры из гавриловской группы собрали уникальный прибор для термоэлюции РНК, позволяющий на колонках фиксировать изменения температуры на доли градуса [6]. Виктора Юлиановича занимали также вопросы, связанные с термостабильностью и гибридизацией ДНК. В его экспериментальной биохимической группе изучать механизмы репликации плазмидных ДНК начали задолго до того, как эти молекулы стали излюбленными векторами в генетической инженерии [7–9].

К середине 70-х годов радиобиологический отдел превратился в один из крупнейших центров современной науки, теоретической и прикладной молекулярной генетики. Все это в 1978 г. позволило преобразовать его в самостоятельный Институт молекулярной генетики АН СССР. Сейчас коллектив института пополнился молодежью, новыми лабораториями, но следует помнить, что он развивается в русле направлений, многие из которых были задуманы, начаты и поддержаны Гавриловым.

Нельзя не вспомнить и о выдающейся роли Виктора Юлиановича в создании школ по молекулярной биологии. Тогда это было абсолютно уникальное явление не только в нашей, но и в мировой молекулярной биологии. Первые несколько школ проходили в подмосковной Дубне (1965, 1966 гг.). Сейчас это забыто, но именно Виктор Юлианович Гаврилов сумел сделать так, чтобы эти школы проходили в тогда еще «закрытом» городе физиков. Там было все для проведения подобных школ: аудитории, гостиница, общежития для студентов, ресторан с вкусной и недорогой едой и (что немаловажно) изолированность от Москвы. Гаврилов при составлении программ школ разумно опирался на мнения своих друзей физиков С.Е.Бреслера, Л.А.Блюменфельда, М.В.Волькенштейна, его ученика О.Б.Птицына. К организации школ Гаврилов привлек Р.Б.Хесина и ленинградского биолога В.Я.Александрова.



На юбилее Р.Б.Хесина. Слева В.Ю.Гаврилов и Т.С.Ильина, справа — Н.И.Шапиро. Март 1972 г.

В то время в молекулярную биологию и молекулярную генетику пришли многие молодые ученые из пограничных областей науки — физики и химии. И Виктор Юлианович считал, что такие школы должны носить регулярный характер, просвещать молодую (и не очень) аудиторию в области новых исследований. Он уговорил Бреслера читать в конце каждой школы итоговую лекцию о последних принципиально новых открытиях года. Таким образом, школы объединили биологическое сообщество ученых, были местом для совместных обсуждений, жарких дискуссий и веселых «капустников». Достаточно вспомнить основной лозунг школы: «От ложных знаний к истинному незнанию!» Это был очень живучий (школы просуществовали с 1965-го по 1982 г.) и исключительно полезный источник научных знаний, идей и контактов. Культурная программа школ знакомила участников с новыми веяниями в литературе, философии и других областях знаний. В школе с удовольствием выступали популярные в те времена барды. После Дубны, начиная с 1973 г., школы проводились в Мозжин-

ке под Звенигородом уже под неусыпным вниманием и контролем Хесина.

Виктор Юлианович любил людей, животных, природу, живопись и музыку. Он ушел из жизни 22 сентября 1973 г., ему исполнилось только 54 года. Вот что написал в своих воспоминаниях Андрей Дмитриевич Сахаров: «В трудные дни... Виктор Юлианович был одним из тех, кто оказал мне наибольшую поддержку. Сам он умер (от болезни сердца) в начале 70-х годов; я узнал об этом через несколько месяцев после его смерти, и мне до сих пор грустно, что я не был на его похоронах» [1].

Оглядываясь назад, понимаешь, что 10 лет мы были рядом с безукоризненно честным, порядочным и интеллигентным человеком. Все наши жизненные проблемы он воспринимал как свои. Услышав о них краем уха, зачастую даже без наших прямых просьб о помощи, он надевал все свои награды и шел в нужные инстанции. В ответ на благодарности он отвечал: «А как же иначе. Вы мои подопечные, вы мои помощники! Мы должны вместе работать, жить и преодолевать жизненные трудности». ■

Литература

1. Сахаров А.Д. Воспоминания: В 2 т. / Ред.-сост. Е.Холмогорова, Ю.Шахнович. М., 2011.
2. Юлий Борисович Харитон. Путь длиною в век. М., 2005.
3. Александров П.А. Академик Анатолий Петрович Александров. Прямая речь. М., 2002.
4. Адамский В.Б. Из поколения победителей. Избранные труды и воспоминания. Саров, 2008.
5. Хесин Р.Б., Шемякин М.Ф., Горленко М.В. и др. РНК-полимераза в клеточном цикле *E.coli*, инфицированных фагом T2 // Биохимия. 1962. Т.27. С.1092—1105.
6. Богданова С.Л., Полонский Ю.С., Гаврилов В.Ю. Влияние температуры на биологическую активность информационной РНК // Молекулярная биология. 1969. Т.3. С.276—281.
7. Богданова С.Л., Фетисова И.В., Гаврилов В.Ю. Индукция колицина E1 брунеомицином и N-метил-N-нитрозогуанидином // Микробиология. 1970. Т.39. С.622—625.
8. Воробьева И.П., Хмель И.А., Богданова С.Л., Гаврилов В.Ю. Репликация ДНК колициногенного фактора в клеточном цикле *Escherichia coli* // ДАН СССР. 1973. Т.211. С.226—229.
9. Богданова С.Л., Гаврилов В.Ю. Репликация ДНК колициногенного фактора E1 при индукции ДНК-тропными агентами в клетках *Escherichia coli* K12SE // Биохимия. 1974. Т.39. С.1257—1263.

Морские исследования у берегов Абхазии

Академик Г.Г.Матишов,
О.В.Степаньян,
кандидат биологических наук
Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону)
Мурманский морской биологический институт
Кольского научного центра РАН





Чайки летят «по следу» корабля.
Фото В.Л.Семина

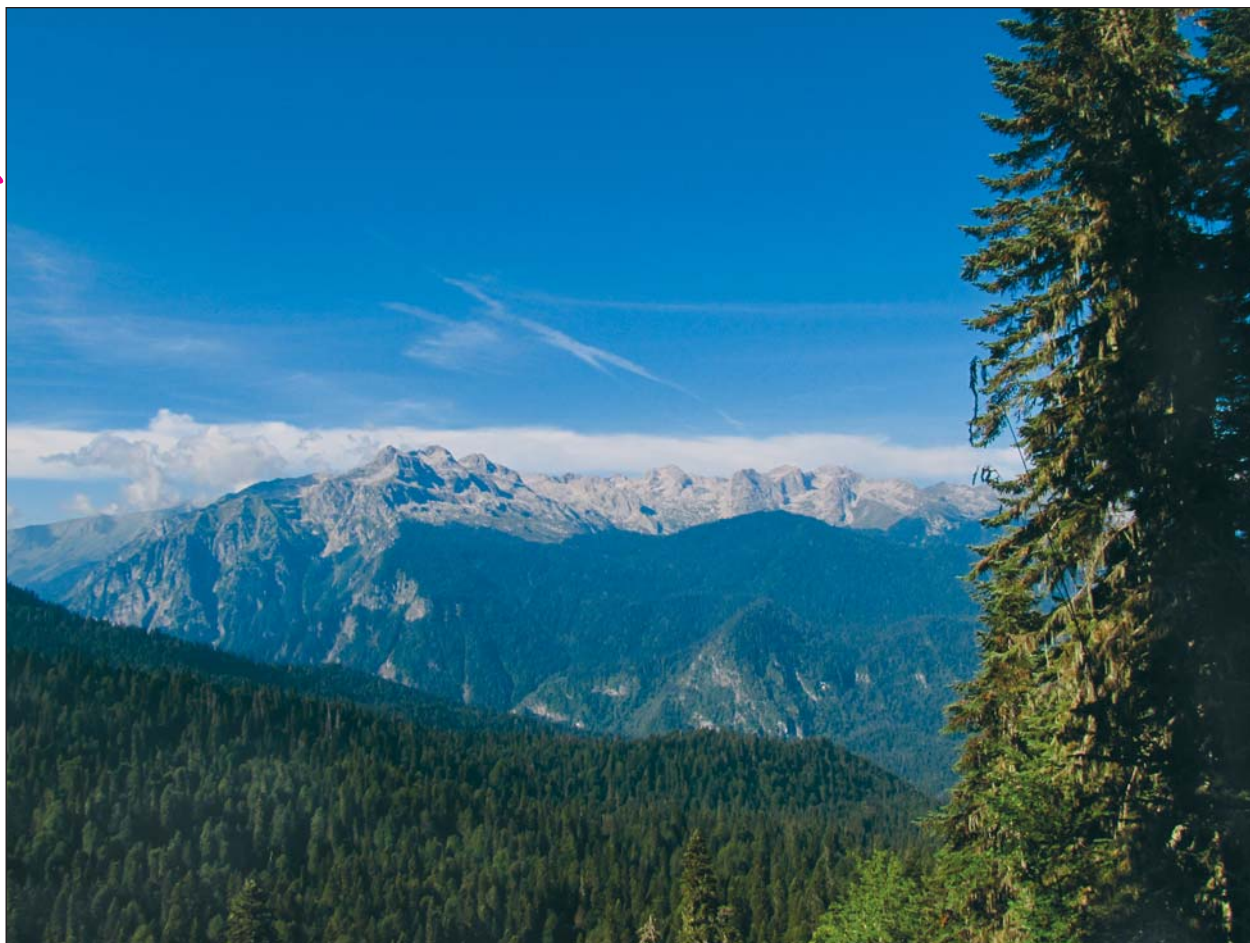
Абхазия. При ее упоминании перед глазами встают древние седые горы, быстрые реки, тенистые реликтовые леса и, конечно, огромное Черное море. Ласковое и теплое для большинства, оно способно показать и свой суровый нрав: здесь нередко штормовые многометровые волны со срывающейся с вершин пеной и характерным протяжным печальным свистом. Вероятно, именно таким представилось Черное море первым греческим мореплавателям, которые называли его Понт Аксинский, что означает «негостеприимное море». Позже, основывая многочисленные колонии, трудясь и богатея на его берегах, греки изменили название на Понт Эвксинский, или «гостеприимное море». Множество народов и племен прошло по черноморским берегам, некоторые с миром и торговлей, многие с мечом и огнем, но один народ уже тысячелетия живет здесь, в горах и на берегу, — это абхазы, люди со сложившимся укладом и древними традициями. В суровой борьбе они столетиями отстаивают свою независимость.

Особенно тяжелые испытания выпали абхазам в конце XX — начале XXI в., когда не только было поставлено под сомнение право этого народа жить на его исконных землях, но и сам он оказался под угрозой тотального уничтожения. В 1990-х годах абхазы все же смогли дать отпор вооруженному нападению грузинских националистов и создать молодую республику, которая 15 лет была непризнанной. И только в 2008 г., после агрессии Грузии на территорию Южной Осетии и вмешательства России, и Абхазия, и Южная Осетия стали независимыми государствами. Многолетняя война прекратилась.

У жителей Республики Абхазия появилась возможность восстанавливать мирную жизнь, развивать туризм, сельское хозяйство, промышленность — в первую очередь нефтяную и газовую. С помощью российской компании ОАО «Роснефть» с 2010 г. начато масштабное исследование абхазского шельфа, были озвучены обнадеживающие результаты по запасам нефти и газа. На первый план вышли вопросы экологической безопасности в регионе, который до этой поры был лишь «всесоюзной здравницей» и «рыбным клондайком».

Несмотря на то что экосистема Черного моря считалась достаточно изученной [1—6], детальные исследования в абхазских водах проводились только до середины 1980-х годов и были полностью прекращены в 1991 г. в связи с распадом СССР и военным конфликтом между Абхазией и Грузией. В 2010 г. по предложению руководства Республики Абхазия и ОАО «Роснефть» впервые за 20-летний период были осуществлены комплексные экосистемные исследования и выполнена фоновая оценка современного экологического состояния абхазских вод на так называемом Гудаут-

Вести из экосистем



Горы и леса Абхазии всегда великолепны.

Фото В.Л.Семина



Научно-исследовательское судно «Денеб» в водах Абхазии.

Фото С.С.Акимова

ском лицензионном участке, который охватывает большую часть территориальных вод и исключительную экономическую зону Абхазии. Исследования велись с борта современного научно-исследовательского судна «Денеб»*.

Проведение морских научных исследований в южных морях России — приоритетная задача Южного научного центра (ЮНЦ) РАН. В течение пяти последних лет организованы более 30 экспедиций в Черное море [7, 8], из них 11 — в воды Абхазии. Особенно памятной как

* Судно получило название в честь самой яркой звезды в созвездии Лебедя, образующей совместно с другими звездами хорошо видимый треугольник на ночном небе в летне-осенний период в Северном полушарии.

для участников, так и для всей молодой республики стала первая экспедиция. Она открыла новый вектор в научном сотрудничестве между Россией и Абхазией. Исследования специалистов были широко освещены в прессе — российской, абхазской и международной. НИС «Денеб» посетили руководство Республики Абхазия и ОАО «Роснефть».

В полевых работах и обработке материала принимали участие специалисты ЮНЦ РАН и Мурманского морского биологического института Кольского научного центра (ММБИ КНЦ) РАН. Возможность проведения исследований в Республике Абхазия помогли обеспечить В.В.Минасян, Д.А.Шахин, А.З.Гюльназарян (ООО «Фрэком»), В.Ю.Иванцов (ООО «РН-Шельф Абхазии») и Р.С.Дбар (Государственный комитет Республики Абхазия по экологии и природопользованию), за что мы выражаем им искреннюю благодарность.

Полевые исследования осуществлялись в соответствии с положениями действующего законодательства и международными обязательствами России и Республики Абхазия в сфере экологии и безопасного природопользования бассейна Черного моря.

Надо сказать, что морская экспедиция проходила в сложной обстановке. Ожидались провокации грузинских военных, и к тому же акватории в районе портов Сухум и Очамчира были только недавно очищены от донных мин и расстрелянных, затопленных судов.

Экспедиционные работы в пределах Гудаутского лицензионного участка предусматривали выполнение гидробиологических работ (изучение гипонейстона, зоо-, бактерио-, фито-, ихтиопланктона, зоо- и фитобентоса), ихтиологических исследований и наблюдений за птицами и морскими млекопитающими в соответствии с общепринятыми методическими руководствами. Основной задачей исследований была оценка основных биологических показателей водной среды и разнообразия живых организмов, обитающих как на шельфе, так и в пелагиали.

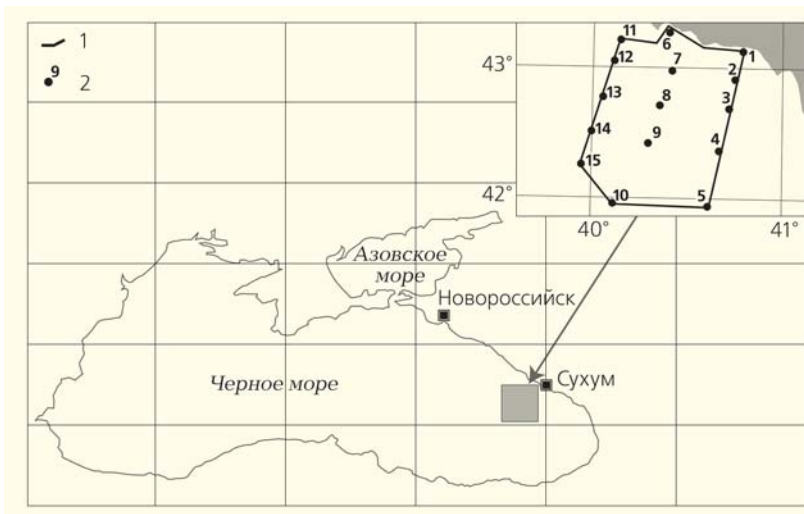
Работы велись на 15 станциях, исследуемый участок Черного моря разделили на три зоны [9]: шельф (станции 1, 2, 6 и 7), свал глубин (станции 3, 4, 8, 9, 11, 13) и глубоководный район (станции 5, 10, 14, 15) с глубинами до 200, 200–1500 и более 1500 м. Были заложены три разреза (от берега к морю): гагринский (станции 11–15), пцундинский (станции 6–10) и гудаутский (станции 1–5).

Приведем основные результаты, полученные в экспедиции 2010 г.

Бактериопланктон однообразен и представлен одиночными кокковидными и палочковидными бактериями. Максимальные значения численности и биомассы бактериопланктона отмечены на прибрежных станциях. Количественные показатели (128–391 тыс. кл./мл) соответствуют ранее опубликованным данным для абхазских вод [10].

В фитопланктоне идентифицирован 91 таксон (рангом ниже рода) микроводорослей из восьми отделов. В исследуемый период наибольшим видовым разнообразием отличались динофитовые и диатомовые водоросли, насчитывавшие соответственно 49 и 17 видов. Видовое разнообразие увеличивалось с севера на юг. Основной вклад в формирование численности фитопланктона вносили мелкоклеточные зеленые и динофитовые водоросли. Значения численности фитопланктона изменялись в диапазоне от 0.001 (на глубинах около 200 м) до 663.7 млн кл./м³ (в приповерхностном горизонте). Биомасса фитопланктона формировалась преимущественно за счет развития двух групп фитопланктона: динофитовых и диатомовых водорослей, что типично для летнего периода развития альгоценоза Черного моря [5]. Распределение биомассы фитопланктона изменялось от практически нулевых значений на глубине 200 м до 1.7 г/м³ в приповерхностном горизонте. Максимальная биомасса фитопланктона наблюдалась только на двух станциях, расположенных вблизи берега. В планктоне выявлены токсичные виды диатомовых и динофитовых водорослей, которые при «цветении», особенно в прибрежной зоне, могут нанести вред биотическим компонентам экосистемы и человеку.

Первичную продукцию измеряли скляночным методом с экспозицией склянок в проточной системе на борту судна. Для этого показателя в по-



Карта-схема морских работ в водах Абхазии в июле 2010 г. (1 — границы участка работ, 2 — комплексные станции).



Рабочие моменты абхазских экспедиций 2010—2013 гг.

Фото В.В.Саяпина, В.В.Клещенкова, К.С.Григоренко, В.В.Поважного

верхностном горизонте характерна та же закономерность, что и для фитопланктона — уменьшение по направлению от шельфа к глубоководным районам. В шельфовой зоне первичная продукция за сутки составляла в среднем 95.7 ± 30.4 мгС/м³, в районе свала глубин — 50.0 ± 20.0 мгС/м³, в глубоководной части — 31.9 ± 18.3 мгС/м³. Полученные значения в поверхностном слое (за исключением района больших глубин) находились в пределах значений, отмечаемых для летнего периода в северо-западном районе Черного моря [11]: 6—27 мгС/м³ для глубоководных районов, от 13 до 100 мгС/м³ для свала глубин, 19—451 мгС/м³ на шельфе.

В гипонейстоне обнаружено 14 таксономических групп зоопланктона. Средние численность

и биомасса нейстона составляла 9800 экз./м³ и 0.5 г/м³ соответственно. Оба показателя были ниже по сравнению с максимальными величинами, характерными для летнего сезона. В структуре нейстона по численности преобладали клadoцеры, среди которых доминирующее положение занимал *Pleopis polyphemoides*, по биомассе превалировала икра рыб. Нейстон прибрежной части характеризовался невысокими показателями биологического разнообразия. Видовой состав, распределение численности и биомассы гипонейстона позволяет оценить современное его состояние как типичное для исследованной акватории [5].

В зоопланктоне отмечено 29 форм, преобладали веслоногие ракообразные каляноиды, ветвистоусые ракообразные были представлены тремя видами. В среднем биомасса зоопланктона составила 478.76 мг/м³, при этом доля кормового планктона превышала 80%. Наибольшее видовое разнообразие меропланктона отмечено на мелководных станциях. Среди веслоногих ракообразных доминировали виды рода акарция. Максимальные значения биомассы зоопланктона, особенно *S.setosa* и *C.euxinus*, отмечены на пицундинском разрезе, где средняя биомасса составила 902.4 мг/м³; на гагринском разрезе показатели были несколько ниже — 292.2 мг/м³; на гудаутском средние значения биомассы оказались наименьшими — 214.7 мг/м³.

Сравнение с опубликованными данными показало, что средняя величина биомассы мезопланктона была в 1.5—2 раза выше, чем в предшествующие годы [2], и это может быть связано с межгодовыми колебаниями биомассы.

Донные сообщества характеризовались невысокими количественными показателями (средняя численность — 1901 экз./м², биомасса — 88.15 г/м²) и видовым разнообразием. Связано это с тем, что пик развития биомассы черноморского бентоса приходится на начало осени [1, 12]. Высокая биомасса отмечена в сообществах, где доминируют двустворчатые моллюски, рапаны и оболочники. Всего отмечено 44 вида донных беспозвоночных, при этом лидирующее положение по числу видов

занимают двустворчатые моллюски. Проведенные исследования показали, что с середины 1980-х годов сообщества макрозообентоса абхазского шельфа Черного моря претерпели существенные изменения. Нижняя граница распространения сообществ с доминированием *Chamelea gallina* поднялась выше 30 м. На глубинах до 40 м преобладают сообщества вида вселенца *Anadara inaequalis* с низким видовым богатством. На глубинах 50–120 м, как и ранее, руководящую роль в формировании сообществ играет *Modiolula phaseolina*. Ряд сообществ — *Upogebia pusilla*, *Terebellides stroemi* и видов *Lucinella divaricata* и *Gouldia minima*, ранее типичных для района исследований [1, 12], не были обнаружены. Недостаток подходящих твердых грунтов негативно сказывается на развитии макроводорослей и трав на большей части абхазского шельфа, но их отдельные сообщества встречаются до глубины 40 м. Среди водорослей преобладают представители красных и бурых. Зеленые водоросли на глубинах 10–50 м не обнаружены. Их отсутствие свидетельствует о незначительном пресноводном стоке и низком бытовом загрязнении. Отметим, что ранее на абхазском шельфе водоросли рода *Cystosira* не отмечались [13]. Находка *C. crinita* свидетельствует о расселении вида в юго-восточной части моря в современный период.

В ихтиофауне восточной части Черного моря отмечено 104 вида и подвида рыб [14]: постоянно обитающие в Черном море пелагические и прибрежно-донные (черноморская хамса, шпрот, ставрида, камбала-калкан, барабуля и др.) и мигрирующие для зимовки (азовская хамса, черноморско-азовская проходная, черноморско-азовская мор-

ская сельдь) или нагула (пелагида, скумбрия). В связи с наличием в Черном море сероводородной зоны донные организмы обитают только на 20% его площади. Этот фактор определяет невысокие показатели в водах Абхазии запасов рыб прибрежно-донного комплекса (камбалы-калкана, барабули, мерланга, кефали: сингиля и лобана), поэтому наибольшее распространение получили пелагические виды, обитающие в поверхностных слоях воды (шпрот, хамса, скумбрия, пелагида, ставрида, луфарь). В связи с тем что подавляющее большинство станций мониторинга располагалось над глубинами более 400 м (за пределами обитаемого шельфа моря), траления производились в пелагиали в горизонте около 70 м от поверхности на переходах между станциями. Основу уловов в этой части лицензионного участка составляла медуза *Aurelia aurita* в массе в улове от 10 до 150 кг, также присутствовали единичные экземпляры трехиглой колюшки, молоди черноморского шпрота, мерланга, а также черноморской шиповатой иглы. Траления в пределах обитаемого шельфа выполнялись в придонном режиме и характеризовались большим видовым разнообразием уловов и их массовыми показателями. Из промысловых видов рыб основу уловов составил черноморский шпрот (от 28 до 700 кг). Также присутствовали единичные экземпляры ставриды, мерланга и хамсы. Сроки проведения экспедиционных исследований не совпали с пиком размножения (май — первая половина июня) большинства обитающих в абхазском секторе Черного моря рыб, поэтому видовой и количественный состав ихтиопланктона оказался значительно обедненным. Отмечены икра или личинки лишь 11 ви-



Турецкие суда на рыбном промысле в водах Абхазии (февраль 2011 г.).

Фото В.В.Лужняка



Основные представители морской ихтиофауны Абхазии.

Фото В.В.Лужняка, Д.А.Бухмина

дов рыб, среди которых доминировали черноморский шпрот, хамса и черноморский мерланг.

Промысел рыбы в абхазском секторе Черного моря возможен в узкой прибрежной шельфовой зоне как пассивными орудиями лова (сетями, ярусами, ставными неводами), так и активными (тралами, кошельковыми неводами). Ранее было показано, что площадь абхазской акватории моря, пригодная для обитания живых организмов, составляет около 1530 км², из них для барабули и камбалы подходят 620, а для мерланга — 750 км² [15].

Геоэкологические исследования показали, что количество тяжелых металлов* в черноморском шпроте распределено по мере убывания в последовательности Fe>Zn>Mn>Cu>Ni>Cd>Pb>Hg; концентрации тяжелых металлов 10—100-кратно ниже санитарно-гигиенических нормативов. Выявлены относительно высокие концентрации алифатических углеводородов, но ряд показателей (повышенное содержание пента- и гептадекана, отношение концентраций пристан/фитан более 10 единиц, индекс нечетности CPI более единицы) позволяют достоверно отнести указанные углеводороды к биогенным по происхождению, не связанным с антропогенной деятельностью. Концентрации летучих ароматических углеводородов, полициклических ароматических углеводородов, хлорорганических соединений оказались существенно ниже допустимых значений. Ранее было показано, что уровни органических загрязнителей в рыбах юго-восточной части Черного моря ниже, чем в других частях Черного моря [16], так что наши исследования подтвердили имеющуюся точку зрения на чистоту абхазских вод и ее обитателей.

В летний период обнаружено шесть видов птиц, принадлежащих к трем отрядам. Их число и плотность населения крайне низки — от трех до пяти особей на километр трансекты. Наибольшая численность отмечена у хохотуны и малого буревестника вдоль побережья, что объясняется активным питанием птиц в скоплениях черноморского шпрота. Отсутствие птиц на преобладающей части акватории абхазского участка Черного моря можно объяснить относительно слабой кормовой базой, отсутствием подходящих гнездовых стаий (из-за орографических особенностей побережья) и чистотой пляжей (т.е. небольшим количеством пищевых отходов).

* Определения тяжелых металлов, нефтепродуктов и пестицидов проводили специалисты аналитической лаборатории НПО «Тайфун».



Встреча с дельфинами всегда завораживает.

Фото В.Л.Семина

Отмечены все три вида из обитающих в Черном море морских млекопитающих: белобочка, черноморская афалина и морская свинья — азовка. Наиболее многочисленными в период наблюдений были белобочки, редкими — черноморские афалины и особенно азовки. Большинство дельфинов в июне кормились возле берега из-за скоплений рыбы. Белобочки и афалины постоянно отмечались непосредственно в бухтах приморских городов Абхазии (Сухума, Пицунды, Очамчиры), что свидетельствует о благоприятном экологическом состоянии портовых акваторий.

* * *

Проведенные в водах Республики Абхазия комплексные гидробиологические исследования показали, что состояние основных компонентов биоты морской экосистемы соответствует показателям нормально функционирующей системы в летний период и укладывается в среднееголетнее значения для юго-восточной части Черного моря.

В распределении планктонных организмов, нейстона, показателей первичной продукции выявлена мозаичность, которая определяется гидродинамическими процессами в этом районе.

Общей закономерностью стало снижение количественных и продукционных показателей планктона по направлению от берега к морской границе лицензионного участка, что типично для планктонного сообщества Черного моря и связано с более высоким содержанием органических веществ и биогенных элементов в прибрежной зоне, а также с воздействием речного стока. На вертикальное распределение планктонных организмов оказывает значительное влияние расположение верхней границы сероводородной зоны. Максимальное количество планктона приурочено к поверхностному горизонту (до глубины 50 м).

Донные сообщества характеризуются низкими количественными показателями (мейобентос — до 0.01 г/м², макрозообентос — до 210 г/м²) и обедненным видовым составом, состоящим из 44 видов беспозвоночных. С увеличением глубины и сменой плотных грунтов на рыхлые снижаются качественные и количественные показатели макрозообентоса. Отсутствие зеленых водорослей полисапробной группы свидетельствуют о незначительном пресноводном стоке и загрязнении исследованной акватории.

Основу траловых уловов помимо медузы *A.aurita* составили три основных промысловых черноморских вида: черноморский шпрот, мерланг и ставрида, представленные младшими возрастными группами, преимущественно двух-трехлетками. Отсутствие в уловах в период проведения экспедиции старшевозрастных особей может быть связано с их миграцией для размножения и нагула в другие районы Черного моря.

Приуроченность ихтиофауны к прибрежным участкам обитаемого шельфа обусловило сходное

распределение птиц и морских млекопитающих. Наибольшая численность среди птиц отмечена у хохотуны и малого буревестника, млекопитающих — у дельфина белобочки. Несмотря на значительное сходство видового состава птиц и млекопитающих абхазского и прилегающего российского секторов моря, показатели численности и обилия в пределах вод Республики Абхазия в летний период низкие, что связано со слабой кормовой базой и меньшей антропогенной нагрузкой.

В морской биоте (рыбах, зообентосе) выявлены низкие концентрации тяжелых металлов и углеводородов нефти.

Таким образом, выполнены первые в новейшей истории Республики Абхазия комплексные экологические исследования морской среды. Они заложили основу морского экологического мониторинга и стали фоновыми для последующих работ, связанных с развитием морского транспорта и освоением углеводородов абхазского шельфа. ■

Работа выполнена в рамках проектов базового бюджетного финансирования ЮНЦ РАН «Анализ динамики природных систем на основе мегабаз данных за многолетний (XIX–XX века) период наблюдений для выявления и прогнозирования экстремальных природных феноменов, опасных для социально-экономического развития густонаселенных территорий юга России» (01201450487) и «Оценка современного состояния, анализ процессов формирования водных биоресурсов южных морей России в условиях антропогенного стресса» (01201354245).

Литература

1. Многолетние изменения зообентоса Черного моря / Отв. ред. В.Е.Заика. Киев, 1992.
2. Планктон Черного моря / Отв. ред. А.В.Ковалев, З.З.Финенко. Киев, 1993.
3. Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А. Экосистема Черного моря. М., 1992.
4. Виноградов М.Е. Экосистема Черного моря сегодня // Природа. 1989. №7. С.118–119.
5. Sorokin Yu.I. Black sea ecology and oceanography. Amsterdam, 2002.
6. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А.Г.Зацепин, М.В.Флинт. М., 2003.
7. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Степаньян О.В., Аксёнов Д.С. Комплексные исследования Азовского, Черного и Каспийского морей на НИС «Денеб» в 2007 г. // Океанология. 2009. №2. С.313–319.
8. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Степаньян О.В. Морские экспедиционные исследования Южного научного центра РАН и Института аридных зон на научно-исследовательском судне «Денеб» в 2008–2011 гг. // Океанология. 2013. Т.53. №2. С.276–278.
9. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Степаньян О.В. Оценка современного состояния экосистемы Черного моря (Республика Абхазия) // Доклады Академии наук. 2014. Т.454. №6. С.715–719.
10. Мицкевич И.Н., Кужиновский И.И., Русанов И.И. Микробиологическая активность в воде и донных осадках Черного моря // Экология прибрежной зоны Черного моря. М., 1991. С.174–197.
11. Ведерников В.И. Первичная продукция и хлорофилл в Черном море в летне-осенний период // Структура и продукционные характеристики планктонных сообществ Черного моря. М., 1989. С.65–83.
12. Золотарев П.Н., Терентьев А.С. Изменения в сообществах макробентоса Гудаутской устричной банки // Океанология. 2012. Т.52. №2. С.251–257.
13. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Черного моря. Киев, 1975.
14. Надолинский В.П. Структура и оценка запасов водных биоресурсов в северо-восточной части Черного моря // Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Краснодар, 2004.
15. Дбар Р.С., Джения А.Р. Итоги и перспективы исследования промысловых запасов рыб у берегов Республики Абхазия // Современные основы формирования сырьевых ресурсов Азово-Черноморского бассейна в условиях изменения климата и антропогенного воздействия. Ростов-на-Дону, 2008. С.18–20.
16. Ильин Г.В. Органические загрязнители в рыбах Азово-Черноморского бассейна // Вестник Южного научного центра. 2012. Т.8. №1. С.60–69.

Заповедные уголки Западной Австралии

Заметки и наблюдения

Дж. Анжелетт

Геммологическая ассоциация Великобритании
Лондон

Австралия — страна, удивительная во многих отношениях. Со времени высадки первых европейцев на побережье Западной Австралии в начале XVII в. она знаменита своей «инопланетной», сюрреалистической, красотой пейзажей, своей первозданностью, дарующей богатейший материал для наблюдений, исследований и творчества. Но Западная Австралия — terra incognita даже по австралийским критериям. Она обладает особой, магической красотой гигантского заповедного уголка Земли с неисчерпаемым разнообразием жизни, облеченной в самые удивительные формы, включая наидревнейшую на Земле — невозмутимые строматолиты, дотронуться до которых означает перенестись во времени на миллионы лет назад.

Ярчайшее, не сравнимое ни с чем впечатление Западная Австралия производит своими изумительными с кристально чистым воздухом пустынями. Их Золотые поля — один из ведущих золотодобывающих регионов мира и единственное место на Земле, где как профессиональные золотоискатели, так и люди, «заболевшие» золотоискательским туризмом, и в наши дни находят на красной и гладкой поверхности самородки с различной текстурой, включая «пушистые» — пористые. Встречаются здесь и многочисленные оплавленные кусочки (от 2 до 7 см) железных метеоритов и ярко-зеленые обломки высококачественного хризопраза, жилы которого, беспорядочно разбросанные по пустыне, залегают на глубинах от полуметра и больше. Они разрабатываются местными аборигенами.

Австралия до сих пор знаменита первопроточеским характером своих коренных обитателей. Это люди особого склада, их уважение и признание завоевать весьма непросто. Стать же любимым народным героем всей страны и почитаемым человеком-легендой среди самой несентиментальной публики на свете — австралийских золотоискателей — удавалось очень немногим, а точнее, только одному человеку по имени... Иван. Он появился на золотых приисках Австралии в 80-х годах XIX в. и стал известен под именем Русский Жак. Прославился он тем, что не бросил в беде своего сотоварища-золотоискателя, тяжело заболевшего на прииске в пустыне, а, погрузив его в рабочую тачку, повез по страшной жаре через Великую песчаную пустыню (Great Sandy Desert) до городка Виндхам, расположенного в северной части Западной Австралии. Там товарищ Ивана получил медицинскую помощь и был спасен. Остается упомянуть только об одной небольшой детали — городок этот расположен в 300 км от прииска.



Самородок золота с Золотых полей Западной Австралии.
Здесь и далее фото автора

Бронзовый памятник Русскому Жаку установлен в г.Холс Крике — самом жарком месте Австралии (36–47°C), расположенном в районе Великой песчаной пустыни, которую многие теперь называют Russian Jack Desert.

Перед отъездом из Лондона были намечены основные пункты экспедиции. От Перта (столицы штата Западная Австралия) до Джералдтона мы решили ехать по дороге, параллельной океану, заезжая в такие микроскопические изолированные городки, как Морская Птица и Сервантес. Там кристально чистые, теплые воды восхитительных пляжей неусыпно «патрулируются» большими бе-



Схема маршрута экспедиции. Рисунок автора.

лыми акулами. Нападают на людей они исключительно редко (и то, что мы все опять в Лондоне, тому лучшее доказательство).

Доехав до Джералдтона, свернули на дорогу, ведущую в глубь материка к пустыне Русского Жака, и добрались до кульминационной точки на-

шей экспедиции — месторождения изумрудов Ага-Кхон, расположенного близ г.Пуны.

Добыча пунских изумрудов коммерчески неоправданна из-за большого процента непригодных для огранки, трещиноватых камней, а также из-за исключительной сложности высвобождения хрупких кристаллов, впаянных самой природой в сланцы и кварциты.

Но для коллекционера минералов травянисто-светлые изумруды, вросшие в серебристо-серую породу — настоящая драгоценность. Мне же такой образец был просто необходим. Для платформы к новой художественной работе — настольной скульптурной композиции из палладия — нельзя представить ничего более подходящего по цвету и настроению.

Времени искать самим нужный экземпляр на бесконечном пространстве, усеянном обломками пустого сланца, уже не оставалось. Мы спешили на заказанный рейс до Мельбурна. Там я должна была передать бывшему губернатору Австралии Питеру Холингверсу кольцо моего дизайна с изображением Иисуса Христа, посвященное памяти Русского Жака и предназначенное для коллекции Дома Правительства в столице Австралии Канберре. Несмотря на спешку, нам все же посчастливилось приобрести прекрасный образец у колоритного местного старателя.



Кью — город золотоискателей.

Наш маршрут проходил и через очаровательный золотоискательский городок Кью, стоящий прямо на золотоносных полях, которые разрабатываются как множеством независимых старателей, так и двумя крупными компаниями. Могу с уверенностью засвидетельствовать, что и сейчас суровые лица золотоискателей, услышавших имя Russian Jack, смягчатся, а в местном пабе все встанут и поднимут стаканы в честь своего героя. Кроме того, местные художники-аборигены покажут картины, где символами обозначен долгий путь Ивана, спасавшего жизнь товарища, поставив на кон свою.

Отправляясь в путешествие, мы заранее договорились, что посетим оз.Тетис и мини-пустыню Пинаклс, знаменитую своими «золотыми» скульптурами из известняка. Оба шедевра природы поражают своей красотой и давно стали для меня, как для художника и лекционера минералов, своего рода магнитом. Несомненно, они представляют собой иллюстрацию уникальных геологических процессов, происходивших в этой части нашей планеты в относительно недавнем прошлом.

Удивительное озеро Тетис стало около 5 тыс. лет назад изолированной от океана и совершен-



Золотоносные поля Австралии разрабатываются как независимыми старателями, так и крупными компаниями.

но самостоятельной экологической системой. Оно подпитывается подземными ключами и превратилось в настоящий инкубатор для уникальных живых строматолитов, существующих еще только в нескольких местах на Земле. Постоянно фильтрующаяся вода в озере способствует существованию нескольких видов небольших рыб и амфибий, полностью адаптировавшихся к чрез-



«Скульптурная галерея» пустыни Пинаклс.



Постройки строматолитов на оз.Тетис.



«Лунный кратер» строматолитов.



Побережье Индийского океана.

вычайно соленой и богатой магнием водной среде. Около 3700 лет назад там «поселились» строматолиты, образование которых связано с жизнедеятельностью колоний нитчатых цианобактерий. Состоящие из арагонита (полиморфной модификации кальцита) литифицированные строматолиты формируют похожие на лунные кратеры постройки, выступающие из воды, которая постоянно меняет свой цвет, чутко реагируя на малейшее изменение в освещении. С наступлением темноты оз.Тетис — «хранитель» самой древней жизни на Земле — становится необычайно таинственным под мерцающим светом огромных австралийских звезд.

Еще в Лондоне было решено, что визитная карточка с эмблемой МГУ академика Д.Ю.Пущаровского — известного российского ученого-кристаллохимика, чьи работы в области структурной минералогии получили международное признание, — будет доставлена в Австралию, где он работал в течение длительного времени. Она украсит

один из живых «лунных кратеров» Тетиса. Этот план, к счастью, удалось осуществить.

Расположенная недалеко от прибрежного городка Сервантес и в 150 км от Перта, соседствующая с оз.Тетис пустыня Пинаклс представляет собой часть национального парка «Намбунг». Она поражает своей созданной ветром и дождями скульптурной галереей. Местные аборигены из племени нунгарс имеют по этому поводу собственное мнение и жутковатую легенду, по которой длинные камни, поднимающиеся из песка, — не что иное, как пальцы молодых людей из их племени. Они стараются за что-нибудь ухватиться, чтобы выкарабкаться из плывущего песка, где они утонули, не послушавшись предостережений своих умудренных опытом старших наставников. Как бы там ни было, Пинаклс удивительна еще и своей непосредственной близостью к океанскому берегу с бесконечными пляжами и ослепительно белым песком. Считанные минуты езды на машине, и вы уже любуетесь глубокой синевой океана. ■



X Международный конгресс по экстремофилам

Е.А.Бонч-Осмоловская,
доктор биологических наук
Институт микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН
Москва

Экстремофилы — микроорганизмы, обитающие в экстремальных для остальных форм жизни условиях, — известны с начала прошлого века, но активное и всестороннее их исследование началось лишь три десятилетия назад. Такое внезапное усиление интереса и последовавшие за ним крупные научные открытия связаны, в первую очередь, с желанием определить физико-химические границы жизни (максимально высокая и максимально низкая температура, максимумы и минимум pH, высокая соленость). Усилиями микробиологов эти границы все время отодвигались; одновременно оказалось, что многие экстремофилы представляют собой древние эволюционные линии прокариот и отличаются уникальным метаболизмом.

Открытие экстремофилов повлекло за собой работы по исследованию особенностей их белков

и нуклеиновых кислот, которые сохраняют свою структуру и функции в условиях, разрушающих биополимеры обычных микроорганизмов. (На этом, собственно, построены основные приемы консервирования пищевых продуктов, известные с древности: истинные экстремофилы существуют в особых местообитаниях, и продуктам угрожает лишь «обычная» микрофлора.) И, наконец, еще одним стимулом в изучении экстремофильных микроорганизмов стало их широкое использование в биоиндустрии. В первую очередь речь идет о ферментах, которые у экстремофилов необыкновенно стабильны и потому применяются в самых разных областях: от производства детергентов для стиральных порошков до разнообразных манипуляций с ДНК при молекулярно-биологических исследованиях — как научных, так и прикладных.

Сам термин «экстремофил» до сих пор не совсем устоялся. Некоторые авторы отмечают его ан-

тропоцентричность, поскольку считают некое местообитание экстремальным, беря за норму параметры своей собственной среды обитания (умеренную температуру, нейтральную и лишнюю избыточную солености водную среду). Однако то, что для высших организмов непригодно, для экстремофилов — норма. Иногда экстремальными местообитаниями называют те, которых относительно мало на Земле, — такое определение справедливо для высокотемпературных, кислых, щелочных биотопов. Но как быть с холодными пространствами? Основная масса воды Мирового океана отличается низкой температурой, и живущие в этих условиях психрофилы составляют весьма многочисленную группу. То же самое относится к зоне вечной мерзлоты, занимающей, к примеру, 65% площади России. Другой терминологический вопрос: можно ли отнести к экстремофилам микроорганизмы, которые лишь переживают неблагоприятные условия, например отсутствие воды в пустыне, но, естественно, лучше развиваются при ее наличии? Следует признать, что определение круга микроорганизмов, относимых к экстремофилам, в большой степени определяется индивидуальным мнением ученых, обладающих правом принятия решения, — редакторов журналов, организаторов научных мероприятий. Не обошлось без некоторого волюнтаризма и при составлении научной программы X Международного конгресса по экстремофилам, прошедшего в Санкт-Петербурге 7—11 сентября*.

Международные конгрессы по экстремофилам проводятся каждые два года, начиная с 1996-го, и обычное число их участников — 300—350 человек. Формально главным организатором считается Международное общество по экстремофилам (International Society on Extremophiles, ISE). Российские микробиологи предлагали провести Международный конгресс по экстремофилам в нашей стране еще в 2010 г., однако пришлось уступить очередь Испании. Конгресс 2012 г. успешно прошел в Севилье, где и поддержали заявку России на проведение следующего в Санкт-Петербурге.

Вероятно, ни одна страна не сравнится с Россией по количеству и разнообразию экстремальных местообитаний: горячие источники Камчатки, Байкала, Кавказа, глубинные нефтяные скважи-



Оргкомитет X Международного конгресса. Слева направо: А.И.Слободкин, Н.В.Пименов, Е.А.Бонч-Осмоловская, А.А.Перевалова, О.А.Подосокорская, И.В.Кубланов, М.И.Прокофьева, Т.Г.Соколова.

Здесь и далее фото, предоставленные оргкомитетом

ны Сибири, дающие доступ к высокотемпературной подземной биосфере, содовые озера Забайкалья, гиперсоленые лагуны, кислотные «хвосты» разрабатываемых рудных месторождений, тундровые болота, области вечной мерзлоты. Изучать экстремофилов, и конкретно термофилов, начали еще с 60-х годов прошлого века в Институте микробиологии АН СССР, причем преследовались в основном прикладные цели. Спустя десятилетие одновременно с остальным миром к интенсивным исследованиям экологии и разнообразия экстремофилов подключились советские микробиологи, прежде всего Г.А.Заварзин и его ученики. Многие из их работ были пионерными, не имели аналогов в мировой науке и лишь позднее были подхвачены многочисленными последователями. Часть этих трудов, опубликованных в русскоязычных журналах, до сих пор остается неизвестной широкому кругу ученых (а иногда, будем откровенны, и намеренно замалчивается). В настоящее время помимо Института микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН (ИНМИ), где продолжают работать ученики Заварзина, изучением разнообразия и экологии экстремофильных прокариот занимаются и во многих научных центрах (Институте биохимии и физиологии микроорганизмов им.Г.К.Скрябина в Пущине, Томском государственном университете, Институте общей и экспериментальной биологии СО РАН в Улан-Удэ, Институте цитологии и генетики СО РАН в Новосибирске, Лимнологическом институте СО РАН в Иркутске и др.). Помимо этого ведутся исследования метаболизма экстремофилов, основанные на анализе полных геномов, изучаются структуры и функции их ферментов (Центр «Биоинженерия» РАН, Институт биоорга-

* Научную программу конгресса можно посмотреть на сайте: www.extremophiles2014.ru/pages/programme/schedule.php#anchor.

нической химии им.М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН, Институт биохимии им.А.Н.Баха РАН, Институт белка РАН). В международных конгрессах по экстремофилам ранее участвовали лишь очень немногие ученые (в основном из ИНМИ РАН), да и значительная часть их работ по-прежнему публикуется только в российских научных изданиях. В связи с этим одна из важнейших мотиваций для проведения в России конгресса — знакомство мировой науки с результатами российских исследователей и одновременно введение их в международное научное сообщество.

* * *

На открытии конгресса, после традиционных коротких приветствий организаторов, в том числе представителя Федерации европейских микробиологических обществ (The Federation of European Microbiological Societies, FEMS) Г.Маузера (G.Muzyer, Нидерланды), состоялась лекция А.Я.Мулкиджяна (A.Y.Mulkidjanian, «On the salt of the Earth: habitats of the first cells and evolution of the energy harvesting»). Этот российский ученый в настоящее время работает в Университете Оснабрюка (Германия) и известен своими исследованиями в области эволюции прокариот.

Лекция на открытии — очень важная часть всякого конгресса, определяющая его уровень и задающая тон; тематика такой лекции всегда более общая по сравнению с пленарными докладами самого конгресса. В идеале она должна показать место

исследований экстремофильных прокариот в контексте наук о жизни, а также их связь со смежными науками — теорией эволюции, геологией, астробиологией.

Этим целям идеально отвечала лекция Мулкиджяна, и ее связь с экстремофилами была самой что ни на есть прямой. Речь шла о совместном с московским геологом А.Ю.Бычковым исследованием, доказывающем, что конденсат, образующийся при выпаривании воды камчатских горячих источников, по своему химическому составу, и в первую очередь по концентрации калия, точно соответствует составу цитоплазмы современных клеток. Из этого следует, что местом зарождения жизни был не океан, где концентрация калия значительно ниже, а лужицы переосажденного гидротермального пара.

Традиционно сессии — как пленарные, так и секционные — посвящены не отдельным группам экстремофилов, а различным аспектам их изучения: от экологии до прикладных исследований. На конгрессе две наиболее популярные сессии — «Разнообразие и экология экстремофилов» и «Физиология и геномика экстремофилов» — были расширены по сравнению с остальными («Генетика», «Белки», «Приложение») и представлены четырьмя лекциями вместо двух. Еще одна пленарная сессия — «Полярные исследования» — была посвящена последним достижениям в изучении микробных сообществ Арктики и Антарктики. Такое внимание к холодным местообитаниям и живущим там псих-



Е.А.Бонч-Осмоловская открывает конгресс.



Лекцию читает А.Я.Мулкиджяна.

рофильным микроорганизмам связано с активными исследованиями в этой области, которые проводят и российские, и зарубежные научные коллективы. Те же тематические направления были представлены на параллельных сессиях — каждая из них состояла из шести устных докладов, которые отбирались на основании тезисов, присланных участниками конгресса.

Новшествами нашего конгресса стала сессия устных докладов молодых ученых, а также шесть круглых столов по актуальным в настоящий момент направлениям: «Вирусы экстремофилов», «Полиэкстремофилы», «Новые экстремофилы и таксономия», «Глубинная биосфера», «Некультивируемые экстремофилы и геномы единичных клеток», «Эволюция экстремофилов».

Две самые популярные сессии — «Разнообразие и экология» и «Физиология и геномика» — объединили по два, казалось бы, независимых направления микробиологических исследований. Причина тому — молекулярно-биологические подходы, в корне изменившие облик современной микробиологии. Удешевление процесса секвенирования сделало его рутинным методом в изучении отдельных генов, полных геномов организмов и метабеномов природных микробных сообществ. Создание колоссальных по объему и все время пополняемых баз данных позволяет не только идентифицировать отдельные гены, но и выявлять их принадлежность к каким-либо таксонам как культивируемых микроорганизмов, так и некультивируемых. Таким образом, исследование разнообразия тесно переплетается с экологией, изучение физиологии сейчас невозможно без геномных исследований. Однако выделение в чистую культуру новой метаболической или филогенетической группы микроорганизмов по-прежнему считается «высшим пилотажем».

В качестве почетных гостей и председателей сессий на конгрессе присутствовали два выдающихся микробиолога. Они авторы многих таксонов экстремофилов: К.Штеттер (K.Stetter, Германия) открыл группу гипертермофилов — микроорганизмов, растущих при температуре 80–110°C, и Ю.Вигель (J.Wiegel, США) — открыватель термоалкалофилов, которые развиваются при высоких значениях и температуры, и pH. Оба ученых уже оставили активную научную работу, но по-прежнему готовы делиться опытом и воспоминаниями с более молодыми коллегами. И Штеттер, и Вигель высоко ценят работы российских микробиологов, неоднократно участвовали в совместных экспедициях и охотно согласились участвовать в конгрессе.



К.Штеттер (слева) и Н.А.Черных (ИНМИ им.С.Н.Виноградского РАН).

Первая пленарная сессия, посвященная разнообразию и экологии экстремофилов, открылась лекцией С.Н.Дедыш из ИНМИ РАН (S.Dedysh, «Northern wetlands: A world of unique microbes with difficult characters»). Обычно Дедыш не участвовала в прежних конгрессах по экстремофилам: она изучает тундровые болота, занимающие огромную площадь, которые, согласно упомянутой в начале статьи терминологии, вряд ли можно считать экстремальными. Тем не менее мы уговорили Светлану Николаевну представить свои результаты на конгрессе, поскольку они позволили ликвидировать значительное белое пятно в познании микробного мира. В возглавляемой ею лаборатории сначала были определены с помощью молекулярных методов, а затем культивированы новые микроорганизмы, входящие в состав сообществ тундровых болот. Оказалось, что для выделения чистых культур необходимы не только повышенная кислотность используемых сред и пониженная температура инкубации, но и крайне низкая минерализация воды. В развитии этих исследований большое участие принимал Г.А.Заварзин, который предложил называть эту группу организмов — омброфилами. Однако сам Георгий Александрович не признавал омброфилов экстремофилами именно из-за их широкой распространенности. В то же время понятие омброфилии прекрасно укладывается в существующую матрицу типов экстремофилии как противоположность галофилии. Заварзину и его вкладу в исследование практически всех групп экстремофилов были посвящены первый слайд презентации Дедыш и специальный постер, подготовленный автором этих строк. Исследования, начатые с участием Заварзина, были представлены Т.Н.Жилиной и Д.Г.Заварзиной.

Лекции по разнообразию и экологии экстремофилов в галофильных и алкалофильных сообществах прочли А.Вентоза (A.Ventosa, «Prokaryotic

diversity in hypersaline environments based on metagenomic approach») и Г.Маузер (G.Muyzer, «Ecogenomics of microbial communities from soda lakes»). К сожалению, четвертую пленарную лекцию по экологии и разнообразию экстремофилов пришлось отменить: Т.Онстотт (T.Onstott, США), который должен был прочесть лекцию о микробных сообществах высокотемпературной подземной биоты, не смог участвовать в конгрессе из-за ошибки консульства, не выдавшего ему вовремя въездную визу.

Пленарную сессию по физиологии и геномике экстремофилов посвятили памяти недавно умершего В.Конингса (W.Konings, Нидерланды), внесшего значительный вклад в исследование их метаболизма. Первую лекцию прочел Д.Ю.Сорокин (ИМНИ) — автор многочисленных новых таксонов галофильных и алкалофильных прокариот, тонко понимающий метаболизм прокариот и их экологию, владеющий одновременно и методами классической микробиологии, и современными молекулярными подходами. Сорокин рассказал о новой группе галоалкалофилов — архей, способных к серному дыханию. Эта лекция (D.Sorokin, «Sulfur respiration in halo(alkalo)archaea») не померкла даже на фоне следующей, образца микробиологического HighTech. Прочел ее М.Адамс (M.Adams, «Engineering the hyperthermophilic archaeon *Pyrococcus furiosus* to produce biofuels») — известный американский специалист в области энзимологии гипертермофильных архей, поведавший о генно-инже-

нерном преобразовании этой археи в продуцента биотоплива.

Актуальность такой тематики подтвердилась и в пленарной лекции на сессии «Белки экстремофилов». М.Дансон (M.Danson, «The molecular enzymology of biofuel production in a thermophilic *Geobacillus*») представил работу, также направленную на получение биотоплива. Однако этот английский ученый больше известен работами по изучению механизмов стабильности белков термофильных микроорганизмов, что стало темой лекции итальянской исследовательницы М.Сиарамеллы (M.Ciaramella, «Genome caretakers in hyperthermophilic crenarchaea»).

Здесь, вероятно, следует упомянуть о том, что термофильные микроорганизмы — первая группа экстремофилов, которую начали активно изучать в последней четверти XX в. Сегодняшняя популярность термофилов объясняется их принадлежностью к наиболее глубоким филогенетическим линиям, а также термостабильностью их ферментов, что вызывает особый интерес у прикладной науки. Связан он и с отсутствием риска контаминации при проведении технологических процессов в условиях повышенной температуры. Хотя по термофилам проводятся специальные международные конференции в нечетные годы (следующая пройдет в 2015 г. в Чили), работы по этим микроорганизмам составляют абсолютное большинство и на конгрессах по экстремофилам. И если в сессиях по разнообразию/экологии и физиологии/геномике нам еще как-то

удавалось сохранять паритет между группами экстремофилов, то на остальных царили лишь термофилы. Их генетике были посвящены доклады соответствующей сессии «Генетика экстремофилов», прочитанные М.Томмом (M.Thomm, Германия) и Т.Аллерсом (T.Allers, Великобритания). Лекции об использовании экстремофилов в биотехнологии, хотя были и очень разными, также были посвящены термофилам. О применении ферментов из экстремофилов, в первую очередь термостабильных гидролаз, в различных областях биоиндустрии рассказал Г.Антраниян (G.Antranikian, «Extremozymes: key tools for sustainable industrial biotechnology»). Захватывающую историю о том, как термостабильная вирусная ДНК-полимераза, ген которой был найден в метагеноме из горячего источника Йеллоустонского национального парка, послужила основой для нового



Выступление М.Адамса на сессии по физиологии и геномике.

продукта фирмы «Lucigen», создающей ферментные препараты для молекулярно-биологических исследований, нам поведал Т.Шонфельд (T.Shoenfeld, «Metagenomic discovery and engineering of thermostable viral DNA polymerase for detection and analysis of RNA and DNA targets»).

Доминирование термофилов было прервано сессией, освещающей вопросы полярных исследований и психрофильных прокариот. Одна лекция посвящалась микробиологии Антарктики, другая — Арктики: о микробных сообществах холодоустойчивых прокариот, развивающихся под многометровыми слоями льда в антарктических озерах, рассказал Б.Кристнер (B.Christner, «Microbial ecosystems in subglacial aquatic environments»), о микробиологических процессах, происходящих в арктической вечной мерзлоте в условиях минусовых температур и гиперсоленых рассолов, — Л.Уайт (L.Whyte, «Cryobiology: some like it really, really cold, cold... and salty»).

Завершила конгресс часовая лекция молекулярного биолога из Японии Х.Атоми (H.Atomi, «Novel



Экс-президент Международного общества по экстремофилам Г.Антрикян.

metabolic networks in archaea»), посвященная метаболизму гипертермофильных архей порядка Thermococcales, реконструированному по результатам анализа их полных геномов.

Всего на конгрессе было сделано 92 устных выступления: 25 пленарных лекций и 67 секционных докладов (включая устные сообщения моло-



Японский биолог Х.Атоми.



А.И.Слободкин и С.Н.Дедыш открывают сессию молодых ученых.

дых ученых), часть из них состоялась в рамках круглых столов. Чем же они отличались от параллельных сессий секционных докладов? Более сфокусированной тематикой и свободным обсуждением, так как уже не нужно было строго следить за временем. Судя по количеству участников, круглые столы пользовались большим успехом,

хотя сделать выбор между ними иногда было очень трудно.

Удачной оказалась идея проведения молодежной сессии устных докладов. Было выбрано восемь сообщений, различных и по тематике, и по странам, где проводилась работа. Молодым ученым выделялось всего четверть часа, зато выступали они в конгресс-зале, при большом стечении народа. Успех превзошел все ожидания: доклады отличались оригинальностью и новизной материала, высоким уровнем самих научных результатов, а докладчики — артистизмом и прекрасным владением английским языком. Председатель этой сессии С.Н.Дедыш сказала: «Мы можем не беспокоиться — будущее исследований экстремофилов в надежных руках».

Для молодых ученых, участвующих в постерных сессиях, был проведен конкурс. В жюри вошли представители разных стран и разных научных специальностей. Пять молодых ученых получили медали и дипломы ISE, а также денежные вознаграждения.

Еще одним важным событием, произошедшим в рамках



Молодые участники постерной сессии: А.Новиков (Институт нефти и газа им.И.М.Губкина) и аспиранты лаборатории гипертермофильных микробных сообществ ИНМИ РАН Е.Фролов и Е.Таранов.

X конгресса по экстремофилам, была встреча русской диаспоры, успешно изучающей экстремофилов в университетах других стран или работающих в биотехнологических компаниях. Такие встречи происходили и на предыдущих конгрессах, но на российской почве она казалась особенно значимой. На нашем конгрессе выступили П.Голышин и О.Голышина (Университет Бангора, Великобритания), М.Якимов (Университет Мессины, Италия), Алексей Слесарев («Fidelity Systems», США). Все они уехали за границу в 90-х годах молодыми постдоками, а сейчас руководят сильными группами в своих университетах или компаниях, активно участвуют в совместных с Россией проектах и готовы развивать сотрудничество.

Всего в X Международном конгрессе по экстремофилам участвовало около 415 человек из 40 стран, причем много молодежи: 165 ученых были не старше 36 лет, 93 — студентами, аспирантами или постдоками, защитившимися не более года назад; 15 волонтеров из Санкт-Петербургского университета помогали организаторам, а взамен получили право посещать лекции. В конгрессе участвовало 110 российских ученых из Москвы, Санкт-Петербурга, Пущина, Томска, Иркутска, Новосибирска, Улан-Удэ, Читы, Владивостока. Многие россияне впервые участвовали в международном конгрессе такого уровня, что дало им возможность поделиться результатами своих исследований и почувствовать себя полноправными членами дружного научного сообщества.

Институт микробиологии им.С.Н.Виноградского РАН был главным организатором конгресса. В его подготовке и проведении принимала непосредственное участие компания «СТО Events», взявшая на себя визовую поддержку зарубежных участников, создание и обслуживание сайта конгресса, верстку программы и сборника тезисов, регистрацию участников и многое другое. Соорганизаторами и спонсорами конгресса были ISE, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет и Министерство образования и науки РФ (МОН). Финансовую поддержку



В виде постерных презентаций представили свои научные работы около 200 участников конгресса.

также оказали российские и зарубежные компании: «ДиаМ», «Хеликон», «Novozymes», «ThermoFisher Scientific», «Eppendorf», «Brucker». Мы очень надеемся, что вложенные средства окупятся — повышением уровня исследований, притоком молодежи в науку, новыми исследовательскими проектами, новыми продуктами для биотехнологии. Оргкомитет конгресса пользуется возможностью еще раз поблагодарить все перечисленные организации за помощь, а российских и зарубежных ученых — за участие и создание той замечательной атмосферы творчества, поиска и сотрудничества, которую до сих пор с удовольствием вспоминают и участники, и организаторы. ■

Физика

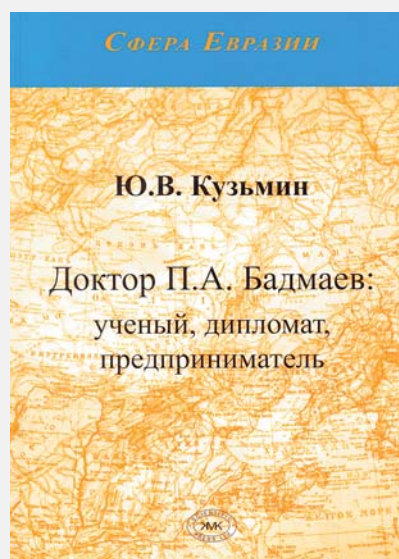
В.Е.Фортов. УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА: ОТ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА ДО КВАРК-ГЛЮОННОЙ ПЛАЗМЫ. М.: Физматлит, 2013. 492 с.

Уравнения состояния осуществляют в компактной математической форме отображение конкретных данных многих научных дисциплин на строгий математический язык. Наряду с фундаментальными исследованиями постоянно расширяется круг технических проблем, для решения которых необходимы совершенные уравнения состояния. Эти состояния вещества определяют работу импульсных термоядерных реакторов с инерционным удержанием горячей плазмы, мощных взрывомагнитных и магнетогидродинамических генераторов, энергоустановок и ракетных двигателей с газовой-фазовыми ядерными реакторами, плазмохимических и СВЧ-реакторов, плазмотронов и мощных источников оптического и рентгеновского излучения. В монографии дан сравнительный анализ различных термодинамических моделей уравнения состояния. Основное внимание уделено описанию состояний, представляющих наибольший интерес для физики высоких плотностей энергии, которые либо уже получены, либо в обозримом будущем могут быть получены в контролируемых условиях на Земле, либо реализуются в астрофизических объектах на разных этапах их эволюции. Даны также ультраэкстремальные астрофизические и ядернофизические приложения, где на термодинамику вещества существенное влияние оказывают релятивизм, мощные гравитационные и магнитные поля, тепловое излучение, превращение ядерных частиц, нейтронизация нуклонов и деконфайнмент кварков.



История

Ю.В.Кузьмин. ДОКТОР П.А.БАДМАЕВ: УЧЕНЫЙ, ДИПЛОМАТ, ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬ. Серия «Сфера Евразии». М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 183 с.



Петр Александрович (Жамсаран) Бадмаев (1851—1920) относится к плеяде выдающихся бурятских ученых и общественных деятелей. Он получил в Санкт-Петербурге два высших образования (по востоковедению и военной медицине), стал доктором тибетской медицины, много сделал как дипломат (дослужившись в Министерстве иностранных дел до звания действительного статского советника) и как предприниматель. Особое внимание в книге — первом опыте его научной биографии — уделено выявленным автором «белым пятнам»: выявлению той роли, которую сыграл Бадмаев в определении направлений внешней политики Российской империи в Восточной Азии в 1893—1916 гг., а также его издательской и предпринимательской деятельности. Невероятный проект присоединения к империи таких стран, как Монголия, Китай и Тибет, предложенный Бадмаевым, получил серьезное финансирование, началась его реализация, но в 1896 г. работы резко оборвались. В каждом разделе книги опубликованы оригинальные исторические источники (архивные документы и материалы, мемуары и газетные публикации), позволяющие читателям лично познакомиться с первоисточниками и лучше понять подтекст широкой палитры оценок и мнений о Бадмаеве.

Астрофизика

А.М.Черепашук. ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ. В 2-х кн. М.: Физматлит, 2013. 560 с.



В Галактике насчитывается около 100 млрд звезд, свыше половины из них — двойные и кратные. Изучение движения и взаимодействия двойных звезд позволяет определять важнейшие их характеристики, прежде всего — массы и радиусы. Поскольку приливное взаимодействие компонент ограничивает эволюционные изменения их радиусов, развитие звезд в двойных системах может резко отличаться от эволюции одиночных. Вот уже свыше полувек проблема тесных двойных звездных систем находится на переднем крае современной фундаментальной науки. Но она столь многогранна, что в большинстве специальных монографий отражены лишь отдельные ее аспекты. Автор взял за основу структуру известной книги З.Копала «Close Binary Systems» (1959) и отразил современные и наиболее актуальные достижения в области исследования таких звездных систем, а также методы исследований, которые в настоящее время быстро совершенствуются благодаря возможности использования мощных компьютерных средств. При описании результатов моделирования приведен богатый наблюдательный материал по тесным двойным звездным системам разных типов и дана его эволюционная интерпретация, что придает монографии энциклопедический характер. Особое внимание уделено современным методам оценки ошибок параметров и проверки адекватности моделей, поскольку в этом вопросе до последнего времени было много путаницы. Книга написана на основе курса «Тесные двойные звезды», читаемого автором на протяжении более четверти века на физическом факультете Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова.

Издание разделено на две части (отдельные тома). Первая посвящена методам и результатам исследований тесных двойных систем, образованных звездами с тонкими атмосферами. Автором использован концентрический стиль изложения материала: рассказ начинается с простых моделей, а затем (после описания современных методов решения обратных параметрических задач) переходит к методам исследования, основанным на модели Роша. Во второй части представлены методы и результаты изучения тесных двойных систем, образованных звездами с протяженными атмосферами. Отдельная глава посвящена новым методам исследования (определения масс релятивистских объектов, поляриметрическим и доплеровской томографии). Далее представлен краткий обзор современных представлений об эволюции тесных двойных систем, включая материал по современным методам трехмерного газодинамического моделирования. Предпоследняя глава касается проблемы тесных двойных звездных систем на поздних стадиях эволюции — систем с нейтронными звездами и черными дырами. Завершает книгу глава, в которой приведены результаты статистических исследований, включая сведения о тройных и кратных системах. Нумерация формул, таблиц и рисунков в обеих частях книги сквозная.

Опасные дыры Земли

А.М.Портнов,

доктор геолого-минералогических наук

Российский государственный геологоразведочный университет

им.С.Орджоникидзе

Москва

Недавно СМИ распространили ошеломляющую новость: на п-ове Ямал, известном огромными запасами метана, вертолетчики с воздуха увидели в тундре среди стелющегося березняка... огромную круглую дыру диаметром не менее 50 м. Провал уходил вниз метров на сто и был окружен невысоким валом выброшенной породы. Потрясенные летчики тут же сообщили о своем открытии, а наука принялась искать объяснение удивительному феномену.

Пилоты предложили свою версию: в тундру упал метеорит. Однако прибывшие на место исследователи не заметили обломков метеорита, но зато обратили внимание на насыпной кольцевой вал вокруг дыры, состоящий из местных осадочных пород. Услышали они и доносившийся из глубины шум бурной речки. Эти данные определенно указывали на подземную пустоту и выброс из недр. Но какова его причина? Нужно взорвать сотни тонн тротила, чтобы пробить в земле такую воронку.

Некоторые специалисты предположили, что таяние вечной мерзлоты активизирует замерзшие углекислый газ и метан. Глобальное потепление способствует плавлению подземного льда, и освобожденные газы могут пробить мягкие осадочные породы. Но тогда дыр в тундре должно быть сотни или тысячи. А на Ямале пока обнаружен «штучный товар», какое-то редкое явление, стечение необычных обстоятельств.

Судя по фотографии, здесь действительно произошел выброс глинисто-песчаного осадочного грунта, сопровождавшийся активизацией примерно полумиллиона тонн породы. Поскольку масса выброшенного наружу материала невелика, похоже, что часть грунта провалилась вниз, в подземный провал. Какие же силы создали эту геологическую структуру?

Прежде всего, на ум приходят ледяные подпочвенные бугры, которые могут достигать 100—150 м в поперечнике и 60 м в высоту. В Якутии их называют «булгуняхи». Они возникают в зонах вечной мерзлоты, когда напорные подземные воды зимой замерзают и накапливаются, поднимая почву или пласты горных пород. Внутри таких бугров всегда присутствуют крупные ледяные ядра.

Внизу образовавшегося провала, в вечномерзлых породах, мощность которых на севере Ямала достигает 400 м, течет подземная река. Не исключено, что речные воды, превращаясь в ледяной массив, подняли глинистый покров и образовали большой бугор. Летом лед рухнул в промытую водой пропасть, а дыра от ледяного ядра осталась.

Но ямальская дыра также похожа и на типичную эксплозию — мощный выброс газа. Но не замороженного во льдах, а глубинного, буквально пропитывающего нижнемеловые глины и пески этой богатейшей газоносной провинции. Мы не задумываемся над тем, что запасы газа на Ямале оцениваются в 14 тыс. км³. Это в 40 раз превышает объем Азовского моря! Газ, залегающий на глубине около 2 км, сжат под чудовищным давлением около 500 атм (как на дне океана).

Поблизости от дыры расположено огромное Вобаненковское месторождение газа. Его запасы оцениваются в 5 тыс. км³. Примерно такой же объем имеет Белое море. В 2013 г. из этого месторождения получено 46 км³ метана, или 46 млрд м³. Извлечение таких чудовищных объемов полезного ископаемого не проходит бесследно.

Еще академик В.И.Вернадский отмечал, что человек становится самой мощной геологической силой на Земле. Наша цивилизация в своем неуклонном техническом развитии выгрызает каменные недра планеты, обезжизняет их и еще, как бы деликатнее сказать, обезгаживает. Человечество выкачивает 4 тыс. км³ газа только за год! Метан сжигается, а содержание углекислоты в атмосфере неуклонно повышается. В прошлом году концентрация CO₂ в атмосфере достигла 0.04%. За столетие его содержание увеличилось в 1.6 раза. Происходит заражение планеты радиоактивными изотопами, свинцом, ртутью.

Но помимо чисто экологических проблем нередко происходят катастрофы техногенные. Возникают землетрясения в зоне водохранилищ, гигантские провалы грунта в затопленных месторождениях калийных солей на Урале.

По объемам добываемого сырья газ занимает первое место в мире. По подвижности в недрах ему нет равных. Огромное давление заставляет его заполнять любые пустоты, щели, трещины разломов. На Ямале пробурены тысячи километров скважин. В них залиты озера глинистого рас-

твора. Выкачаны тысячи кубических километров метана. Нарушено равновесие водоносных горизонтов, изменен режим вечной мерзлоты. Почему бы газу не рвануть к поверхности по ослабленному техникой глубинному разлому?

В таком случае близким аналогом необычного явления будут хорошо знакомые геологам грязевые вулканы, где газ пробивается по разломам в земной коре сквозь водоносные горизонты и превращенные в жидкую грязь горные породы. На Ямале геологическая обстановка иная, здесь важную роль играет вечная мерзлота. Но подъемная сила сжатого газа в недрах остается потенциальной угрозой и для буровиков, и для окружающей среды, и для современного строительства.

Вспоминается незаслуженно забытая история, произошедшая в центре европейской части России, в районе Курской атомной электростанции. 4 марта 1999 г. несколько старичков из деревни Ушаково Фатяжского р-на Курской обл. ловили рыбу в пруду. Вдруг поблизости раздался взрыв. Земля поднялась метров на пять, полетели камни, взвился к небу огненный столб, а потом из образовавшейся воронки размером 13×8 м и глубиной около 5 м потекла вода и все затянуло паром. Рыбаки бросились бежать и сообщили в деревне о начавшемся конце света.

Вскоре взрыв повторился в том же месте. Через день произошел третий. Из воронки хлынул поток жидкой грязи. Рыба в пруду исчезла. 18 марта серия из семи взрывов прошла по прямой линии с интервалом 5—7 км в направлении Курской атомной станции. Последняя огромная воронка диаметром 40 м и глубиной 8 м находилась всего в 20 км от АЭС. В ней вполне поместился бы атомный реактор со всем своим содержимым.

Собрались специалисты, стали думать, что это за чудо. Знатоки из Министерства обороны пришли к простому выводу: упал метеорит и рассыпался. Почвоведы думали о воздействии грунтовых вод. «Эксперт» Ю.Шитиков объяснил проделки подземного Змея Горыныча тем, что трехголовое чудовище изрыгало «плазмоиды» — загадоч-



Гигантская дыра на Ямале.

ную энергетическую субстанцию, сходную с шаровой молнией.

Поиски не показали обломков металла, но были найдены оплавленные кусочки грунта, свидетельствующие об очень высокой температуре горящего газа — водорода. Ближе всех к истине, на мой взгляд, был В.Чернобров — руководитель проходившей в этом районе 63-й экспедиции «Космопоиска». Он обнаружил повышение радиоактивности вдвое, связался с геофизиками и стал искать причины взрывов в недрах. Но сейсмографы не отметили землетрясений. Загадка осталась.

Скорее всего, под Курском произошло редкое для платформенных структур событие. На глазах свидетелей по линейному разлому произошел выброс горючей водородно-метановой смеси с примесью радиоактивного радона. Проектировщики заложили атомную станцию прямо в створе глубинной дегазирующей водородом структуры.

Возможность взрывных газовых эксплозий за счет глубинного газа даже на устойчивых блоках земной коры (платформах и щитах) заслуживает более детального геологического изучения при проведении инженерно-строительных работ. ■

Правила для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Поскольку статьи адресуются неспециалистам, желающим знать, что происходит в смежных областях науки, суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Без предварительной апробации научным сообществом статьи не принимаются, а принятые к публикации в «Природе» рецензируют-

ся и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию статьи можно прислать по электронной почте прикрепленными файлами или на любом из следующих носителей: компакт-дисках CD-R или CD-RW; дисках DVD+R или DVD+RW; дисках Zip 100 Mb; на устройствах, поддерживающих USB. Для сжатых файлов необходимо представить свой архиватор. Самораспаковывающиеся архивированные файлы не принимаются.

Текст статьи, внутри которого библиографические ссылки нумеруются по мере цитирования, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате MS с расширением doc, txt или rtf. Иллюстрации присылаются отдельными файлами. Если пере-

сылаемый материал велик по объему, следует архивировать его в формат ZIP или RAR.

Принимаются растровые изображения в форматах: EPS или TIFF — без LZW-компрессии. Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (B/W, Bitmap) — не менее 800 dpi. Принимаются векторные изображения в формате COREL DRAW CDR (версии 9.0—11.0) и Adobe Illustrator EPS (версий 5.0—8.0).

Редакция высылает автору статью для согласования только в виде корректуры. Все авторские исправления необходимо выделять цветом, курсивом, полужирным шрифтом и т.д. и не трогать формулы и специальные символы (греческие буквы, математические знаки и т.п.), в которых ошибки не допущены.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала.

Над номером работали

Ответственный секретарь

Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы

О.О.АСТАХОВА

М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

О.И.ШУТОВА

А.О.ЯКИМЕНКО

Выпускающий редактор

Л.П.БЕЛЯНОВА

Литературный редактор

Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор

Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией

И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:

С.В.ЧУДОВ

Корректоры:

М.В.КУТКИНА

Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:

А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 22.10.2014
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать
Заказ 701
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.