

# ПРИРОДА

10 14



**В НОМЕРЕ:****3 Чугунов А.О., Ефремов Р.Г.****Поверхность молекулы – источник биологической информации**

Концепция молекулярных поверхностей представляет молекулу в виде твердого тела с распределенными на нем физико-химическими свойствами. Рассматриваются три наглядных примера того, как расчеты с молекулярными поверхностями позволяют извлечь из компьютерного моделирования осмысленную биологическую информацию.

**11 Исмаил-Заде А.Д.****Уникальные рудные геологические объекты Дашкесанского прогиба**

В юрском периоде (176.5–150.7 млн лет назад) в районе известного на весь мир Дашкесанского интрузива в Азербайджане наравне с силикатным вулканическим материалом изливались магнетитовые лавы, магнетит-гематитовые лапилли и гематитовые туфы.

**18 Свистов П.Ф., Павлова М.Т.****Арктическая дымка и атмосферные осадки**

Наблюдения за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков велись одновременно на дрейфующих льдинах и станциях российского Заполярья. Удалось выявить наиболее вероятные источники загрязнения атмосферы над Северным Ледовитым океаном и изучить особенности арктической дымки – явления, известного еще самым первым полярным исследователям.

**27 Беднова О.В.****Реинтродукция, репатриация, реставрация... и урбанизация**

В настоящее время все больше и больше природных и природно-антропогенных территорий нуждается в экологической реабилитации, т.е. в возвращении видовой полноценности обедненным сообществам. Особенно важно решить такую задачу на урбанизированных территориях, где зачастую исчезают даже типичные обитатели.

**36 Алексева Е.М.****Античные древности Анапы****История Горгииппии**

Горгиппия – античный город, археологические раскопки которого велись в черте Анапы с 1950 по 2000 г. Полис, основанный ионийскими греками в VI в. до н.э., вошел на рубеже V–IV вв. до н.э. в состав Боспорского царства, а в конце II в. до н.э. – в состав Понтийской державы Митридата VI. Город жил в противостоянии с воинственными соседями-кочевниками.

**47 Сафарова С.А.****Спорово-пыльцевой анализ: применение****52 МАГИЯ КРИСТАЛЛОВ**

К 150-летию со дня рождения Г.В.Вульфа

**Вульф Г.В.****Как растут кристаллы (53)****Волошин А.Э., Рашкович Л.Н., Руднева Е.Б., Маноменова В.Л.****Выращиваем кристаллы (62)****Маслов А.А., Чернова Е.В., Щербаков В.М.****Георгий Викторович Вульф (73)****Рецензии****80 Боринская С.А.****Эволюция сквозь призму геномики**

(на кн.: Е.В. Кунин. Логика случая.

О природе и происхождении биологической эволюции)

**90****Новые книги****В конце номера****93 Портнов А.М.****Ртуть – грозный убийца**

**CONTENTS:****3 Chugunov A.O., Efremov R.G.****Molecular Surface –  
a Source of Biological Information**

*According to concept of molecular surfaces, molecule is a solid body with distributed physico-chemical properties. As illustration, we provide three examples showing how calculations of molecular surfaces can retrieve meaningful biological information from computer modeling.*

**11 Ismail-Zade A.D.****Unique Ore Geological Objects  
of Dushkesan Deflection**

*In the Jurassic period (176.5–150.7 million years ago) in the region of the world-famous Dashbkesan intrusion in Azerbaijan on a par with the silicate volcanic material poured lava magnetite, magnetite-bematite lapilli and hematite tuffs.*

**18 Svistov P.F., Pavlova M.T.****Arctic Haze and Atmospheric  
Precipitation**

*Observations of acidity and chemical composition of atmospheric precipitation were carried out simultaneously at drifting floes and land stations of Russian Arctic. The most probable sources of pollution of the air basin of Arctic ocean were discovered and the properties of the Arctic haze, a phenomenon known to the very first Arctic explorers, were studied.*

**27 Bednova O.V.****Reintroduction, Repatriation,  
Restoration... and Urbanization**

*Today more and more natural or naturally-anthropogenic territories need ecological rehabilitation, that is the recovery of fullness of specific composition in depleted associations. It is of a special importance to solve this problem for urbanized territories where often even typical inhabitants disappear.*

**36 Alekseeva E.M.****Antique Antiquities of Anapa  
History of Horhippia**

*Horhippia is an antique town. Excavations at the site were conducted within the boundaries of Anapa from 1950 up to 2000. The policy, founded by Ionian Greeks in VI century BC, was included into Bosporan Kingdom at the turn of the V–VI century BC and in the Pontic Kingdom of Mitridates VI at the end of II century BC. The town lived in the confrontation with militant nomadic neighbors.*

**47 Safarova S.A.****Spore-pollen Analysis: Practical  
Application****52 MAGIC OF CRYSTALS**

To 150th Anniversary of G.V.Vulf

**Vulf G.V.****How Crystals Grow (53)**

**Voloshin A.E., Rashkovich L.N.,  
Rudneva E.B., Manomenova V.L.**

**We Grow Crystals (62)**

**Maslov A.A., Chernova E.V.,  
Shcherbakov V.M.**

**Georgiy Viktorovich Vulf (73)****Book Reviews****80 Borinskaya S.A.****Evolution Viewed  
through Optics of Genomics**

(on book: E.V.Koonin. The Logic of Chance.  
The Nature and Origin of Biological Evolution)

**90****New Books****In the End of the Issue****93 Portnov A.M.****Mercury: A Terrible Murderer**

# Поверхность молекулы — источник биологической информации

А.О.Чугунов, Р.Г.Ефремов

**М**ногочисленные процессы, происходящие в каждой отдельно взятой клетке живого организма, основаны на избирательном контакте одних молекул с другими: ферментам удается найти нужные субстраты, лиганды «узнают» свои мишени. На этой поразительно четкой системе зиждется вся молекулярная биология, а значит, и жизнь вообще. Генетическая программа реализуется в форме замысловатых многоклеточных организмов за счет распознавания биомолекулами друг друга, к тому же оно определяет саму возможность существования такой программы. Удивительная сложность живых организмов не «записана» в ДНК буквально (ведь там не заданы, например, координаты всех атомов тела), а получается как бы сама собой, благодаря самоорганизации и «сознательному выбору» одними молекулами других.

Так, ДНК- и РНК-полимеразы с очень высокой точностью распознают матрицу — молекулу нуклеиновой кислоты, которая на первый взгляд одинакова во всех местах и похожа на моток однородной проволоки, однако отличается последовательностью нуклеотидов. Матричная РНК, посредством которой закодированная в ДНК информация превращается, допустим, в бе-



**Антон Олегович Чугунов**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования биомолекулярных систем Института биоорганической химии им. академиков М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН. Автор научно-популярного сайта «Биомолекула»\*. Занимается формированием пространственной структуры (фолдингом) белков и компьютерным моделированием структуры рецепторов.



**Роман Гербертович Ефремов**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий той же лабораторией, заместитель директора того же института. Область научных исследований — биологические мембраны, теоретическое моделирование структуры и динамики мембранных белков.

лок-рецептор, безошибочно узнается рибосомой и многочисленными факторами инициации, элонгации и терминации трансляции. Удлинение синтезируемой полипептидной цепочки на каждый новый аминокислотный остаток происходит вследствие распознавания триплета молекулой транспортной РНК. Если белку суждено стать секретрируемым или мембранным (т.е. ему нужно попасть из цитоплазмы, где работает синтезирующая его рибосома, в другое место), он содержит специальную сигнальную последовательность, благодаря которой его направляют по нужному «адресу». Подобных взаимодействий в каждой клетке бесчисленное множество.

Процесс распознавания неотделим от понятия молекулярной поверхности. Именно она, представляя собой своеобразную зону ком-



муникации, определяет, «подойдут» ли участники контакта друг другу. Мерой такого распознавания служит свободная энергия взаимодействия, а вызываемая им передача сигнала происходит из-за электронно-конформационных переходов, приводящих после образования комплекса к изменению пространственного расположения атомов и/или свойств молекул. Очевидно, что их поверхность — абстракция, так как обычные физические поверхности (например, воды или металла) перестают существовать при переходе к атомарному масштабу. Однако молекулярная поверхность, представленная в виде совокупности сфер, изображающих отдельные атомы, или каким-то схожим образом, — очень удобный инструмент для описания соответствующих взаимодействий. Компьютерное моделирование биологических молекул часто основано не на квантовой механике, описывающей строение вещества максимально корректно, а на наборе приближений, уводящих от физических «источков», но позволяющих с помощью ЭВМ решать важные практические задачи: искать новые лекарства или изучать механизмы развития заболеваний. Одно из таких упрощений — концепция молекулярных поверхностей, представляющая молекулу в виде твердого тела с распределенными на нем физико-химическими свойствами.

### Типы и применение молекулярной поверхности

Образующие молекулу атомы, строго говоря, нельзя представлять в виде шариков — они не имеют отчетливо выраженной внешней границы и более чем на 99% состоят из «пустоты» (вспомним характерные размеры протона, нейтрона и электрона и сравним с размерами образованных ими структур). Впрочем, в практических целях считать атомы твердыми сферами оказалось удобно. Впервые это сделал голландский ученый Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс, и с тех пор именно его имя носит средний эффективный радиус атома, изменяющийся в пределах 1–2 Å для разных химических элементов. По сути, это половина минимального расстояния, на которое можно сблизить (без образования химической связи) два одинаковых атома, принадлежащих разным молекулам. Ван-дерваальсова поверхность состоит из точек, которые лежат на воображаемых сферах (атомах), не попадая внутрь соседних (рис.1). Она составляет основу распространенного «молекулярного конструктора» Кори—Полинга—Колтуна, использующего известное всем со школы цветное обозначение атомов различных химических элементов (рис.2). Ван-дерваальсова модель молекулы внутри изобилует пустотами и может содержать сквозные просветы. В ней много свободного места, как в мешке с елочными шарами, в который, однако, еще один уже не добавишь. Молеку-

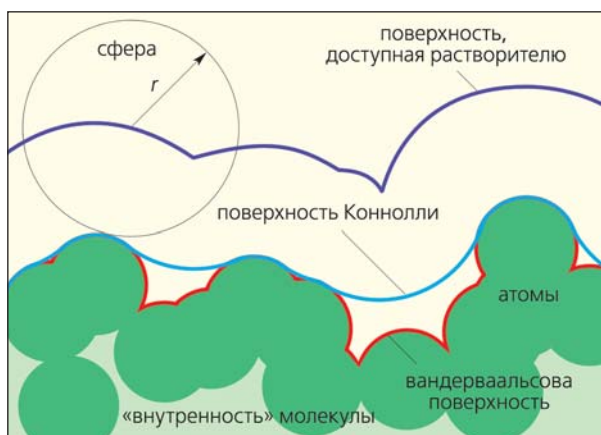


Рис.1. Схематическое изображение трех типов молекулярной поверхности — ван-дерваальсовой (проходящей по «контуру» атомов), доступной растворителю и Коннолли (которые получают с помощью алгоритма «катящейся сферы» радиусом  $r$ ).

лы растворителя (чаще всего воды) не могут проникнуть в эти небольшие полости. Это привело ученых к концепции поверхности, доступной растворителю. Предложенная в 1971 г. Б.Ли и Ф.М.Ричардсом, она рассчитывается математически как множество точек, равноудаленных от ван-дерваальсовой поверхности молекулы. Доступная растворителю поверхность описана центром сферической молекулы воды (эффективный радиус 1.4 Å), «прокатанной» вокруг атомов (см. рис.1).



Рис.2. Поверхность Ван-дер-Ваальса знакома нам по масштабным макетам молекул в виде разноцветных сфер. На фотографии прославленный молекулярный биолог Джеймс Уотсон с моделями двойной спирали ДНК [1].

А вот нижние границы шариков воды, находящихся в контакте с целевой молекулой, составляют поверхность Коннолли (см. рис.1). Она получается исключением из объема точек, в которые может попасть растворитель. Именно этот тип поверхности преимущественно используется для визуализации молекул и для расчета их физико-химических свойств (рис.3, 4).

Чаще всего к молекулярной поверхности прибегают, чтобы вычислить полярную и неполярную составляющие ее площади. Их соотношение определяет свободную энергию переноса из одной фазы (например, неполярной) в другую (полярную) данной молекулы и, соответственно, степень ее гидрофобности или гидрофильности. Так называемый гидрофобный эффект участвует в сворачивании биополимеров, стремящихся экранировать свои «водобоязненные» фрагменты от полярного растворителя (или наоборот, если речь идет о мембранных белках), так как контакт воды с неполярными веществами термодинамически невыгоден\*.

Процесс формирования пространственной структуры (фолдинг) напрямую связан с поверхностными явлениями и минимизацией площади контакта некоторых фрагментов гибкой белковой цепочки с окружающей средой. Как и географическую карту, двумерное изображение поверхности молекулы можно сделать информативным, нанеся на него различные физико-химические характеристики и/или особенности структуры. Например, часто проводят расчет и цветовую визуализацию электростатического потенциала, определяющего зарядовые взаимодействия. Или картируют молекулярный «рельеф» поверхности — расположение «ущелий», «холмов» и «равнин», наглядно показывающих гладкость или шероховатость на том или ином участке. Вместе с локализацией на «карте» позиций доноров и акцепторов водородной связи это определяет нахождение сайтов связанной воды — мест, где растворитель задерживается особенно долго. Безусловно, форма поверхности и ее свойства меняются вместе с конформацией молекулы (из-за тепловых колебаний атомов или межмолекулярных взаимодействий). Поэтому поверхность молекулы — ее своеобразный динамический «портрет», к которому можно добавить еще и временную компоненту. Собрав большую коллекцию таких «портретов» (например, в результате расчета молекулярной динамики), можно создать усредненную карту поверхности, а также выявить на ней наиболее статичные и подвижные области. Так можно наглядно изобразить, насколько гибкими или жесткими могут быть в данных условиях отдельные участки молекулы. Одно из самых актуальных применений концепции молекулярных поверхностей в современной компьютерной биологии — докинг (стыковка), метод, пред-

\* Подробнее см.: Чугунов А.О., Полянский А.А., Ефремов Р.Г. Физическая водобоязнь // Природа. 2013. №1. С.24—34.

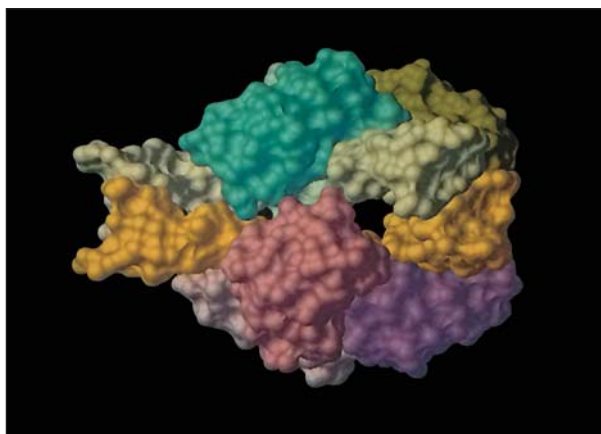


Рис.3. Фермент аспартаткарбамоилтрансфераза из оригинальной статьи М.Коннолли [2].

сказывающий наиболее выгодную для образования устойчивого комплекса ориентацию и положение одной молекулы по отношению к другой. С позиций молекулярной биологии это позволяет реконструировать часть эстафеты распознавания и передачи сигналов. Для практики же наибольшее значение имеет область рационального дизайна лекарственных средств и биологически активных веществ, специфически взаимодействующих с выбранными мишенями и корректирующих работу того или иного молекулярного пути.

Молекула — квантово-механический объект. Поэтому редукция ее описания от многоэтажных

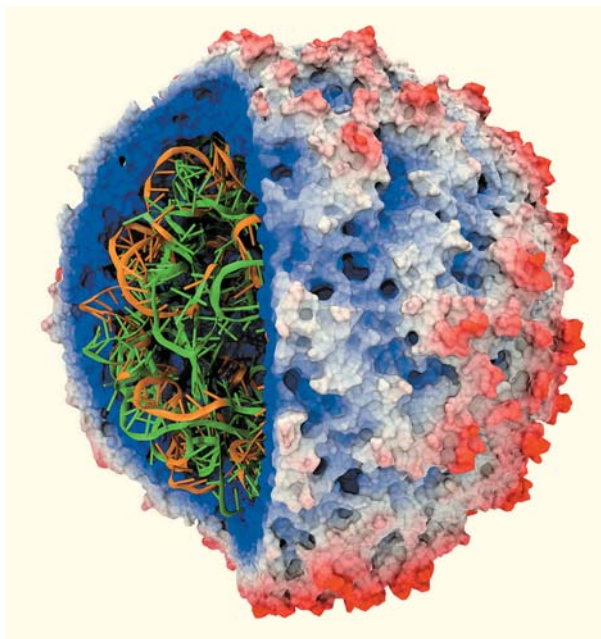


Рис.4. Трехмерная модель капсида ВИЧ. Поверхность вируса раскрашена в зависимости от значения электростатического потенциала.

<http://www.ks.uiuc.edu/Research/gpu/>



гамильтонианов до простой геометрии (что происходит при использовании понятия поверхности) — несомненное и намеренное упрощение. На аналогичных допущениях, кстати, строится все молекулярное моделирование, базирующееся на концепции эмпирических силовых полей\*.

Из практических соображений корректная и неподъемная квантовая механика заменяется на ньютоновскую физику, простую, но тем не менее способную достаточно адекватно описать динамические свойства биополимеров (хотя и оставляя «за бортом» химические превращения или спектроскопические эффекты). Однако молекулярная поверхность и сама по себе — сложный объект как чисто геометрически, так и с позиций вычислительных алгоритмов: компьютерные файлы с рассчитанными поверхностями и значениями различных физико-химических параметров очень громоздки (особенно в случае больших биополимеров и при выборе высокой плотности точек на поверхности). Иногда можно пойти в упрощениях еще дальше. Если поверхность молекулы или ее часть без существенных потерь можно представить в виде какой-либо простой геометрической формы — плоскости, цилиндра или сферы, анализ сложного трехмерного объекта сведется к (квази)двумерному случаю. Рассмотрим три наглядных примера того, как расчеты с молекулярными поверхностями позволяют извлечь из компьютерного моделирования осмысленную биологическую информацию.

\* Подробнее см.: Чугунов А.О., Ефремов Р.Г. Компьютерные игры в молекулярную биофизику // Природа. 2010. №12. С.36–43.

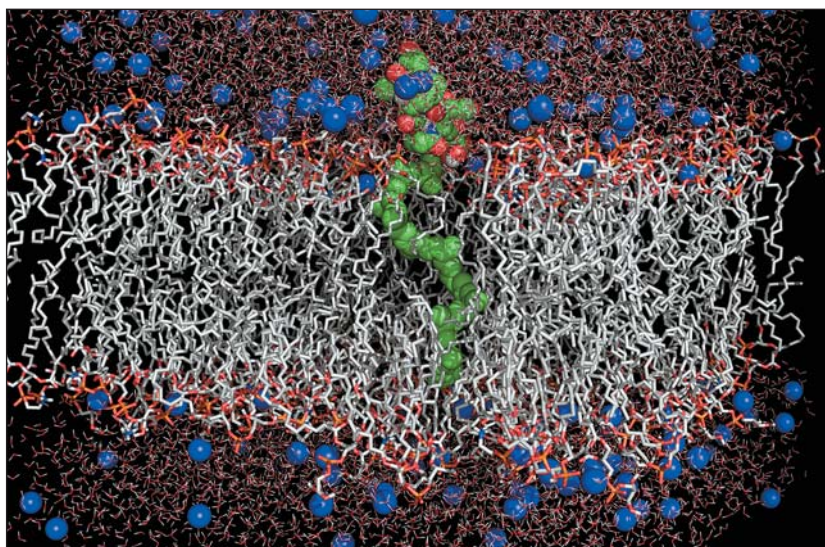


Рис.5. Компьютерная модель «ахиллесовой пяты» бактериальной мембраны — липида-II. Серым показаны «хвосты» липидов мембраны, красно-оранжевым — их «головки», зеленым — липид-II, синим — ионы натрия в растворе (воде).

## Плоскость и уязвимость бактериальной мембраны

Мембрана — принципиально важный клеточный компонент, ее строение весьма консервативно и имеет свои отличительные черты для каждого из трех доменов живых организмов. Так, бактериальная мембрана отличается от эукариотической, в целом электронейтральной, отрицательным зарядом, а также наличием особой молекулы с длинным гидрофобным изопреноидным «хвостом» и гидрофильной «головкой» пептидогликановой природы — липида-II (рис.5) [3]. Он служит челночным переносчиком этого муреинового фрагмента — жизненно необходимого «строительного блока» бактериальной стенки. Эта уникальная молекула встречается только в бактериальной мембране и, не будучи биополимером, последовательность которого легко мутирует с участием генетических механизмов, обладает консервативной химической структурой. Именно поэтому на липид-II направлены атаки множества природных антибиотиков, специфически его распознающих и имеющих бактериостатическое или бактерицидное действие.

Когда установили пространственную структуру комплекса липида-II с одним из узнающих его антибиотиков — низином [4], оказалось, что главный структурный фрагмент, «выдающий» липид-II и делающий его «ахиллесовой пятой» бактериальной мембраны, — пирофосфат, химическая группировка, которая не встречается в окружающих липидах. Однако объяснить четкое распознавание этим антибиотиком липида-II очень непросто: на достаточно большой (по сравнению с размером липида) поверхности бактериальной мембраны расположено очень мало (около 2000) молекул липида-II, а действующие концентрации низина крайне низки. Каким образом в этих условиях происходит первичная встреча антибиотика и его «жертвы»?

В результате компьютерного анализа поверхности бактериальной мембраны в окрестностях липида-II мы выяснили, что последний, в силу гибкости своего длинного «хвоста», вносит существенные изменения в структуру окружающих его фосфолипидов и в распределение гидрофобных свойств на мембране [5]. Для ее фрагмента мы провели расчет методом молекулярной динамики, а в качестве контроля приняли равный по размеру фрагмент мембраны эукариот. На проекционных «картах», изо-

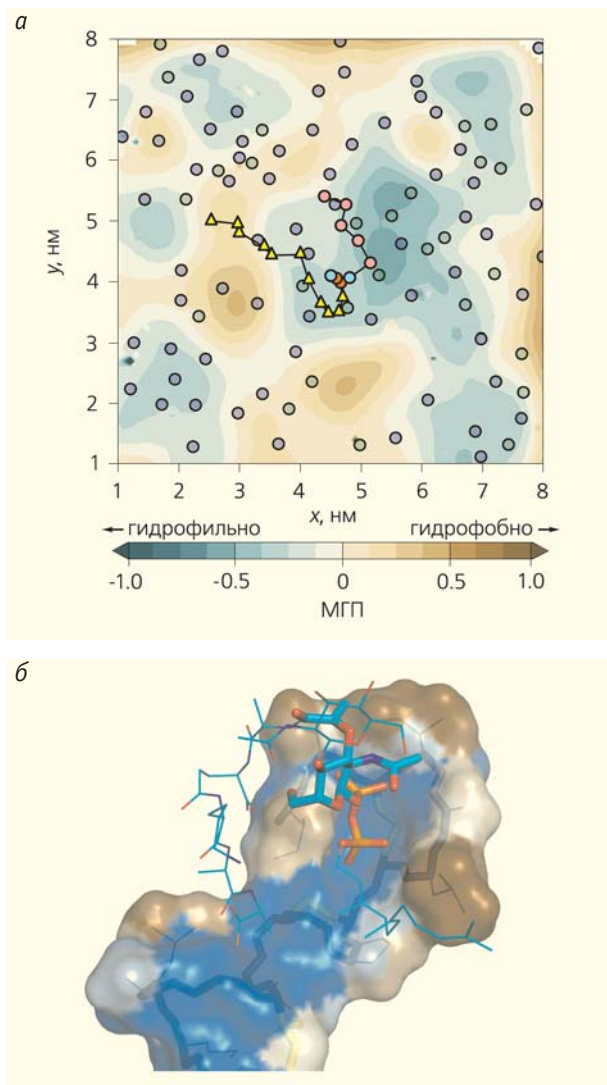


Рис.6. Липид-II на карте молекулярного гидрофобного потенциала (МГП) участка бактериальной мембраны (а) и в комплексе с низином (б). На карте МГП кружками изображены молекулы фосфолипидов, ломаной линией, соединяющей цветные геометрические фигуры, — липид-II. В присутствии его гибкой молекулы возникает долгоживущий амфифильный участок, напоминающий океанский атолл: подковообразная гидрофобная область и гидрофильная «лагуна» в центре. В комплексе липида-II и низина гидрофобная поверхность молекулы антибиотика показана коричневым, гидрофильная — голубым, а «скелет» — палочками внутри поверхности; фрагмент молекулы липида-II изображен снаружи. Толстые палочки обозначают те области, которые, по-видимому, играют решающую роль во взаимном распознавании этих молекул. Структура, возникающая, когда нисин «вцепляется» в липид-II, — «пирофосфатная клетка». Видно, что пространственные гидрофобные свойства антибиотика повторяют таковые для «атолла», образующегося на бактериальной мембране вокруг молекулы липида-II: в середине гидрофильная область, а по краям — гидрофобная. Такое соответствие объясняет, как низину удается обнаружить столь редкую молекулу липида-II на мембране.

бражающих динамическое распределение гидрофобности, липид-II оказался в центре гидрофобного «атолла» достаточно большого размера и характерного времени жизни (рис.6). Видимо, существование этого амфифильного участка, отсутствующего в мембране эукариот даже при расчете с липидом-II, — уникальная особенность, привносимая на поверхность мембраны бактерий длинной и гибкой молекулой липида-II. Сделанные расчеты позволяют предположить, что распознавание антибиотиком своей мишени происходит в два этапа. Второй, более специфичный, — захват пирофосфатной группы липида-II в «клетку» водородных связей, образуемых макроциклами в структуре низина (см. рис.6, б). В нахождении им амфифильной области, «выдающей» липид-II, скрывающийся в мембране, возможно, заключается первая стадия. Учет этого гипотетического механизма поможет создать новое поколение мембранных антибиотиков, безопасных для человека и свободных от бремени резистентности, нависшего над большинством классических аналогов.

### Цилиндр и димеризация трансмембранных доменов

Рецепторные тирозинкиназы (РТК) — важные молекулы, участвующие в регуляции клеточного цикла и деления. Они воспринимают многочисленные факторы роста, цитокины и гормоны (в том числе инсулин и гормон роста). В геноме человека закодировано 58 таких рецепторов, подразделяемых на 20 семейств. Нарушение работы многих из этих белков приводит к развитию онкологических заболеваний, поэтому ее изучение — не только фундаментальная, но и медицинская задача. Эти рецепторы состоят из трех доменов. Два из них большие — внеклеточный, распознающий лиганды, и внутриклеточный, в котором осуществляется фосфорилирование и который передает сигнал на различные биохимические каскады. Соединяющий их трансмембранный домен, пронизывающий мембрану клетки, состоит из единственной  $\alpha$ -спирали. Механизм активации рецепторных тирозинкиназ при связывании лиганда (например, фактора роста фибробластов) заключается в димеризации двух молекул рецептора именно в этом домене (рис.7).

В последние годы в экспериментальном определении пространственной структуры таких димеров был достигнут значительный прогресс [6]. Однако методы компьютерного моделирования также играют существенную роль в решении этой биологической задачи. В ряде случаев они позволяют решить проблему предсказания структуры димера с меньшими затратами, а главное, предложить сразу несколько вероятных вариантов упаковки (т.е. создать ансамбль возможных конформаций), каждый из которых может реализоваться



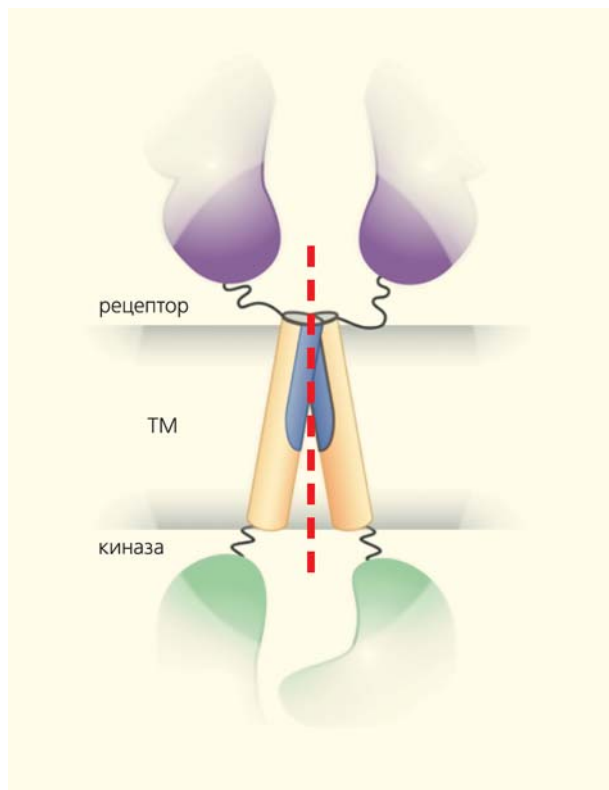


Рис.7. Схема строения и димеризации рецепторных тирозинкиназ (рисунок А.А.Полянского). Рецепторный, трансмембранный (ТМ) и киназный домены показаны фиолетовым, бежевым и зеленым цветами, соответственно; пунктирная красная линия разделяет мономеры; синим изображена область димеризации.

при определенных условиях. В нашей лаборатории подошли к решению этой задачи не «в лоб» (поместив два трансмембранных фрагмента рецептора в мембрану и запустив длительный расчет методом молекулярной динамики), а приняв во внимание во многом геометрическую суть задачи — установить возможный мотив скрещивания двух примерно цилиндрических тел. При этом помимо пространственной комплементарности трансмембранных спиралей учитывалось и соответствие их физико-химических свойств (гидрофобности). Все вычисления производили на уровне цилиндрических карт-разверток, сравнивать которые намного проще, нежели трехмерные тела сложной формы (рис.8) [7]. Соответствующий алгоритм был реализован на веб-сервере PREDDIMER [8], который позволяет реконструировать набор димерных структур для заданных трансмембранных последовательностей, а также визуализировать полученные конформации в виде 3D-моделей и 2D-карт поверхностной гидрофобности  $\alpha$ -спиралей с отмеченной областью димеризации. Тестирование сервера на 11 трансмембранных последовательностях, для которых ра-

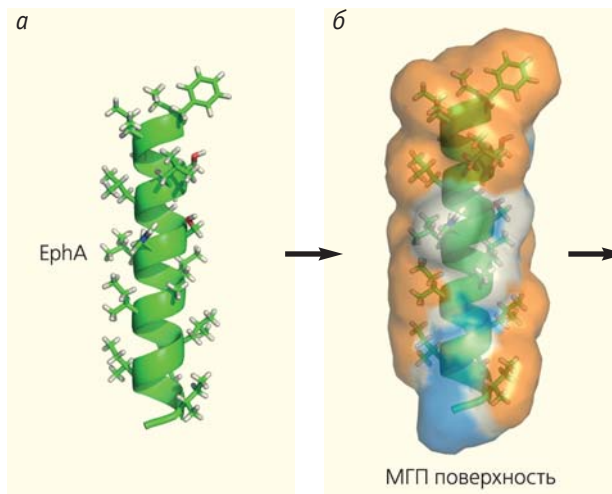
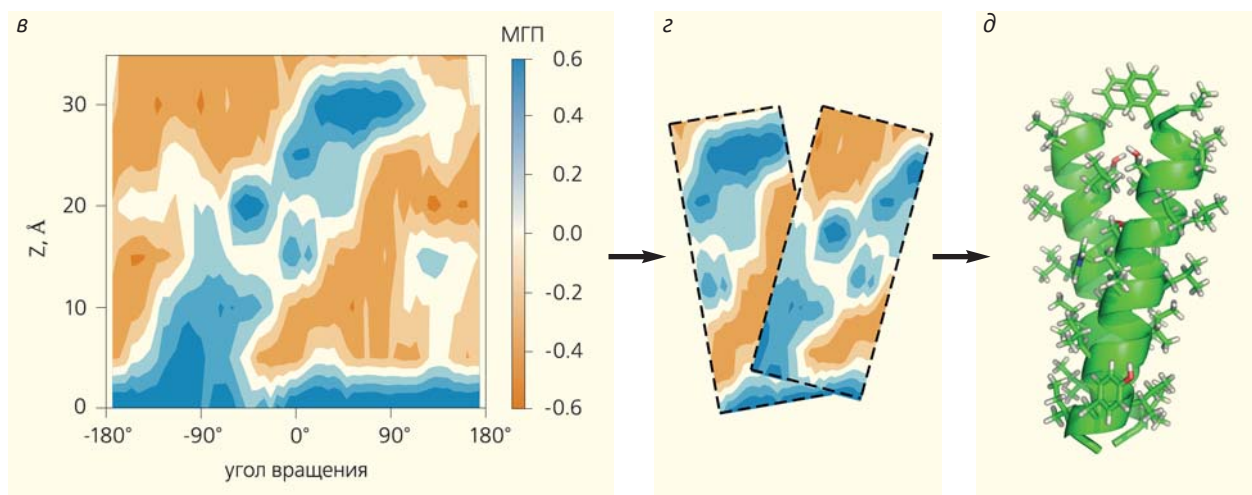


Рис.8. Предсказание механизма димеризации трансмембранных доменов рецепторных тирозинкиназ (рисунок А.А.Полянского). Схема работы алгоритма PREDDIMER на примере сегмента эфринового рецептора (EphA), который участвует в эмбриогенезе. Сначала конструируется идеальная  $\alpha$ -спираль на основе аминокислотной последовательности трансмембранного домена (а). Затем производится расчет гидрофобных/гидрофильных свойств на молекулярной поверхности (МГП — молекулярный гидрофобный потенциал), которые изображены коричневым и синим (б). Далее строятся двумерные цилиндрические карты-развертки ( $z$  — координата вдоль оси цилиндра) поверхности, показывающие одновременно гидрофобность и «рельеф» (в). Наконец, ищется оптимальное совмещение двух карт с наилучшим соответствием поверхностей ( $z$ ) и реконструируется структура спирального димера (д).

нее методом ЯМР-спектроскопии были получены 3D-конформации, показало, что алгоритм делает предсказания с довольно высокой точностью. Понимание механизма димеризации рецепторных тирозинкиназ позволит с помощью компьютерного дизайна создать вещества, корректирующие ее нарушение и исправляющие повышенную активность этих рецепторов, которая часто приводит к раковому перерождению клеток.

### Сфера и яд скорпионов

В природных ядах часто содержатся нейротоксины, мишень которых — ионные каналы и рецепторы в мембранах клеток нервной системы или мышц. Изучение этих молекул помогает понять работу нейрорецепторов и научиться ее регулировать, что важно как для фундаментальных задач, так и для медицинских приложений, заключающихся в коррекции нарушений работы нервной системы. Например, в яде скорпионов обнаружены так называемые  $\alpha$ -нейротоксины, специфически воздействующие на ионные каналы насекомых



или млекопитающих: первые можно назвать инсекто-, а вторые — млекотоксинами. В чем причина их специфического действия? Детально изучив атомное строение и свойства молекул двух групп  $\alpha$ -токсинов, мы должны были найти значимые структурные отличия, определяющие селективность этих веществ. Сравнив структуры инсекто- и млекотоксинов, мы действительно выявили заметные различия между ними. Для этого был создан алгоритм «белковой топографии» [9], назва-

ние которого отражает его отчетливое сходство с картированием земной поверхности, так как форма нейропептидов была практически идеально приближена к сфере (рис.9,а). Используя метод молекулярной динамики, расчет поверхности с распределением на ней гидрофобных свойств и построение сферических проекций, мы искали на двумерных картах токсинов общие закономерности и специфические участки, а затем сопоставляли эти данные с известными активностью и из-

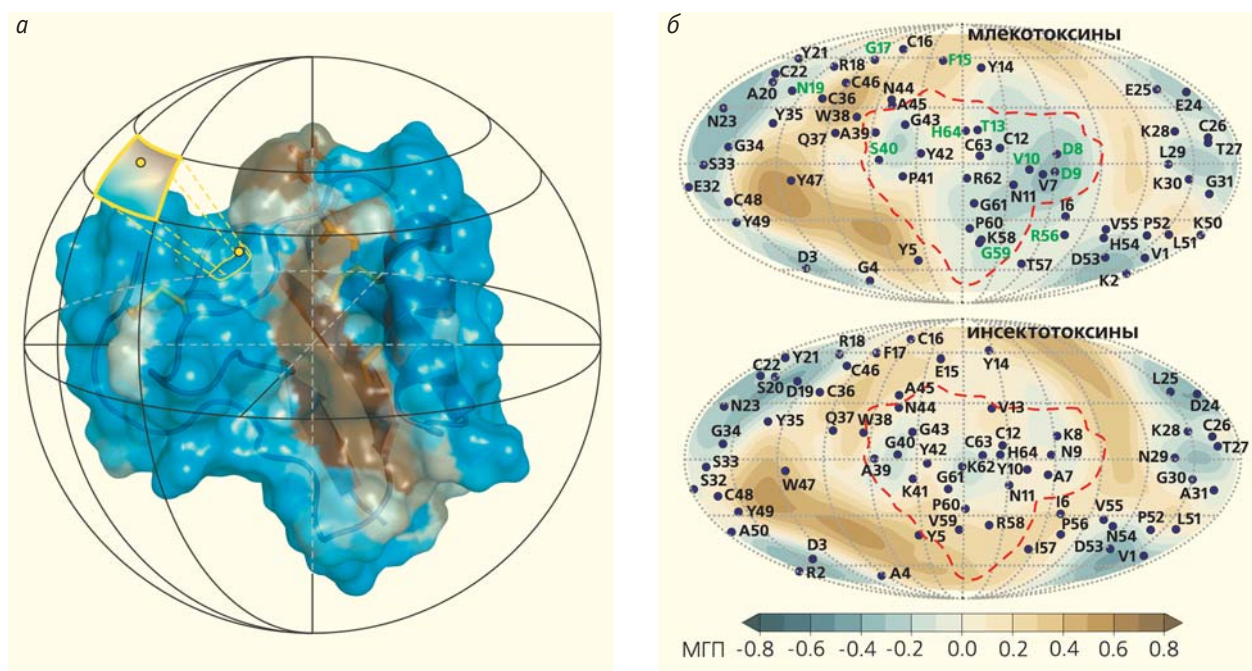


Рис.9. Структурные отличия млеко- и инсектотоксинов, определяющие специфичность их действия. Карта-развертка, полученная методом белковой топографии, который основан на картировании свойств, распределенных на поверхности сферы (а). В результате на карте можно «разглядеть» молекулу целиком со всех сторон. Карты гидрофобных/гидрофильных свойств (МГП — молекулярный гидрофобный потенциал) для млеко- и инсектотоксинов (б). Наибольшее различие двух карт наблюдается в районе модуля специфичности, очерченного красным контуром. Синие точки соответствуют проекциям аминокислотных остатков, среди последних зеленым выделены те, которые характеризуются повышенной эволюционной вариабельностью.

бирательностью действия таких белков. Мы выявили в исследованных молекулах функциональные «модули», которые отличаются по своим свойствам и, предположительно, отвечают за специфическое действие инсекто- и млекотоксинов (рис.9,б). Чтобы проверить эту гипотезу, мы синтезировали токсин с заранее неизвестной специфичностью, на основании наших расчетов предсказали его избирательность (насекомые или млекопитающие) и затем экспериментально измерили его биологическую активность. Результат полностью подтвердил сделанное предсказание [10]. Алгоритм белковой топографии, основанный на работе с молекулярными поверхностями и расчетах молекулярной динамики, поможет в поиске структурно-функциональных зависимостей в биоактивных пептидах и небольших белках. Биоинженерный подход, требующий знания этих зависимостей, можно применять к созданию специфических аналогов природных нейропептидов и нейромодуляторов. А это откроет новые перспективы для медицины и сельского хозяйства.

Итак, сравнительно несложные манипуляции с молекулярными поверхностями позволяют из-

влекать из компьютерных расчетов биополимеров по-настоящему уникальную информацию. Помимо наглядного представления это дает возможность напрямую сравнивать физико-химические характеристики поверхностей разных молекул, количественно оценивать изменения их свойств, происходящие в результате связывания или конформационных переходов, и т.д. Применяя вычислительные технологии для расчета свойств молекулярных поверхностей, можно выявить детали, недоступные традиционным структурным методам. Это открывает новые пути в таких практически важных областях, как создание новых антибиотиков, лечение раковых и неврологических заболеваний, разработка безопасных для человека инсектицидов. «Механистический» подход к квантовым объектам (молекулам), безусловно, не претендует на абсолютную физическую корректность, поскольку не моделирует статистические ансамбли и не рассчитывает термодинамические константы. Зато он позволяет по-новому взглянуть на хорошо зарекомендовавшую себя концепцию молекулярных поверхностей и раскрыть их смысл для биологии. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-24-00118).**

## Литература

1. *Wagstaff A.* Jim Watson: DNA revealed the causes, it may never reveal a cure // *Cancer World*. 2013. V.56. P.4—11.
2. *Connolly M.L.* Solvent-accessible surfaces of proteins and nucleic acids // *Science*. 1983. V.221. P.709—713.
3. *Breukink E., Kruijff B. de.* Lipid II as a target for antibiotics // *Nat. Rev. Drug Discov*. 2006. V.5. P.321—332.
4. *Hsu S.T., Breukink E., Tischenko E. et al.* The nisin-lipid II complex reveals a pyrophosphate cage that provides a blueprint for novel antibiotics // *Nat. Struct. Mol. Biol*. 2004. V.11. P.963—967.
5. *Chugunov A.O., Pyrkova D.V., Nolde D.E. et al.* Lipid-II forms potential «landing terrain» for antibiotics in simulated bacterial membrane // *Sci. Rep*. 2013. V.3. P.1678.
6. *Bocharov E.V., Volynsky P.E., Pavlov K.V. et al.* Structure elucidation of dimeric transmembrane domains of bitopic proteins // *Cell Adh. Migr*. 2010. V.4. P.284—298.
7. *Polyansky A.A., Volynsky P.E., Efremov R.G.* Multistate organization of transmembrane helical protein dimers governed by the host membrane // *J. Am. Chem. Soc*. 2012. V.134. P.14390—14400.
8. *Polyansky A.A., Chugunov A.O., Volynsky P.E. et al.* PREDDIMER: a web server for prediction of transmembrane helical dimers // *Bioinformatics*. 2014. V.30. P.889—890.
9. *Koromylova A.D., Chugunov A.O., Efremov R.G.* Deciphering fine molecular details of proteins' structure and function with a Protein Surface Topography (PST) method // *J. Chem. Inf. Model*. 2014. V.54. P.1189—1199.
10. *Chugunov A.O., Koromylova A.D., Berkut A.A. et al.* Modular organization of  $\alpha$ -toxins from scorpion venom mirrors domain structure of their targets — sodium channels // *J. Biol. Chem*. 2013. V.288. P.19014—19027.



# Уникальные рудные геологические объекты Дашкесанского прогиба

А.Д.Исмаил-Заде

Азербайджан издревле славится как страна нефти и огня. Огненные факелы, считающиеся символом божественного дарования Земле, послужили культом созданного на Апшероне еще в XIII в. храма огнепоклонников. Все это продолжает оставаться достоянием республики и привлекает внимание как ученых-исследователей, так и широкой аудитории, интересующейся феноменальными явлениями природы.

Исследования последних лет установили уникальное по своей геологической природе явление — соответствие знаменитого Дашкесанского интрузива крупному вулканическому центру, который активизировался в юрском периоде (176.5—150.7 млн лет назад). Тогда наравне с силикатными вулканидами, вулканокластами и кварцевыми порфиритами изливался и рудный материал — магнетитовые лавы, магнетит-гематитовые лапилли и гематитовые туфы.

## Дашкесанское железорудное месторождение

Известное на весь мир железорудное месторождение располагается на северо-восточном склоне Малого Кавказа, богатом различными полезными ископаемыми медно-колчедан-



*Ариф Джафар оглу Исмаил-Заде, доктор геолого-минералогических наук, академик НАН Азербайджана, руководитель секции «Петрология и металлогения» Института геологии НАНА. Кавалер ордена «Шохрат» («Слава») Азербайджана, заслуженный геолог и заслуженный деятель наук Азербайджана. Область научных интересов — региональная геология, петрология, магматизм, геодинамика.*

но-полиметаллического, медно-порфирового и золоторудного профиля. В Дашкесанском же районе кроме железорудного разрабатываются также месторождения кобальта (Северное), алунита (Заглигское), алунита-пирофиллита, каолинита, мраморов и золота (Човдарское), а также марганца (Молла-Джалил, Эльворское). В районе Заглигского месторождения (которое по запасам алунита занимает одно из первых мест в мире) в г.Гяндже был создан завод для получения глинозема, калиевых удобрений, серной кислоты, соды, а возможно, и специального цемента и некоторых редких элементов.

Дашкесанское железорудное месторождение (рис.1) известно еще с древних времен. Археологические находки украшений, орудий и предметов быта указывают на железный век.

Немецкий геолог Г.В.Абих, которого называют отцом геологии Кавказа, в 1865 г. опубликовал первые сведения о Дашкесанском железорудном месторождении, в 1867 г. А.Берноули упоминает о наличии здесь кобальтового минерала. В 1868 г. Г.Розе на собрании Геологического общества Германии продемонстрировал кобальтовые минералы и охарактеризовал геологическое положение месторождения. А в 1869 г. было добыто 187.5 пудов кобальтовой руды для получения синей краски.

На протяжении второй половины XX в. большой группой иностранных (преимущественно немецких), русских и азербайджанских геологов здесь проводились нерегулярные исследования с большим

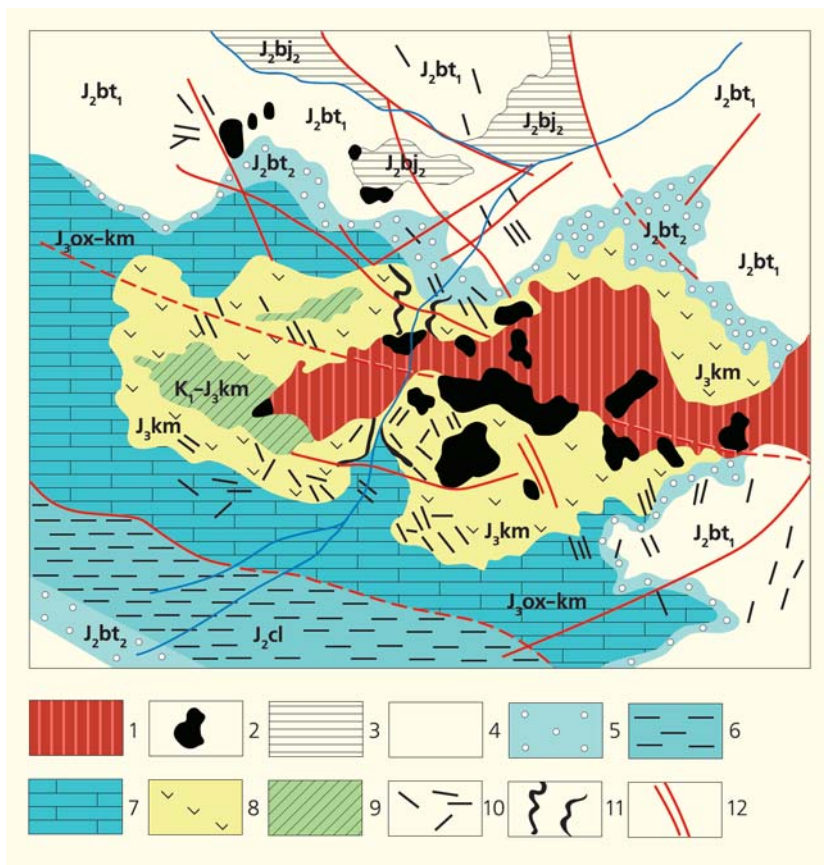


Рис. 1. Геологическая карта Дашкесанского железорудного месторождения [1]: 1 — гранитоиды; 2 — габброиды; 3 —  $J_2bj_2$ , туфопесчаники, кварцевые порфиры и их туфы; 4 —  $J_2bt_1$ , туффиты, туфобрекчи, диабазовые порфиры; 5 —  $J_2bt_2$ , лапиллиевые магнетитовые туфы, туффиты; 6 —  $J_2cl$ , аргиллиты; 7 —  $J_3luz$ , мраморизованные известняки; 8 —  $J_3km$ , туфы, туффиты, роговики, скарны; 9 —  $K_1J_3$ , диабазовые порфиры; 10 — дайки основного состава; 11 — магнетитовые руды; 12 — разрывы.

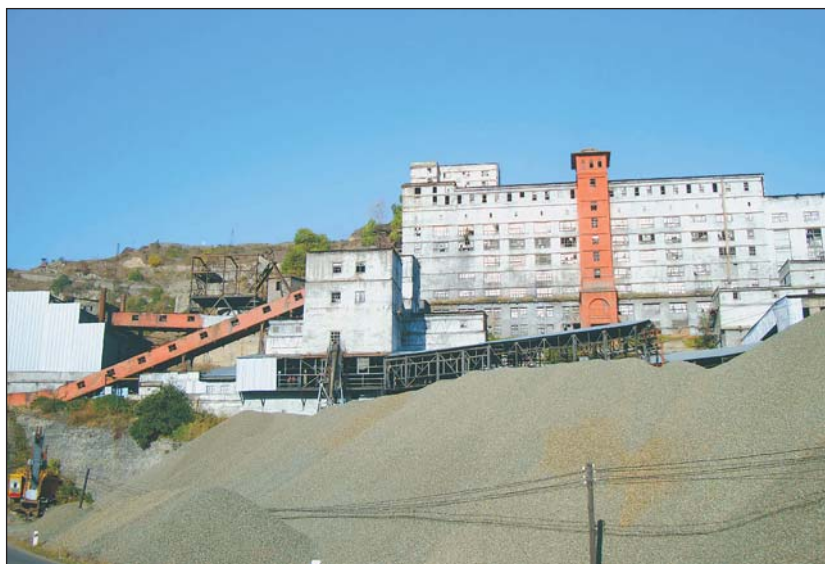


Рис.2. Дашкесанская рудообогатительная фабрика.

упором на кобальтовое оруденение. В процессе этих работ создавалась школа азербайджанских геологов, возглавляемая М.А.Кашкаем.

Промышленная разработка Дашкесанского месторождения началась в 1954 г. Были выявлены значительные запасы железных руд, что послужило надежной основой для их освоения. В крае началось строительство шоссейных и железнодорожных дорог, вновь выстроили г.Дашкесан, расположенный на высоте 1700 м над ур.м., создавались рудные и строительные управления, обогатительная фабрика (рис.2), пути транспортировки руды (в том числе подвесная канатная дорога) (рис.3). В Грузии в г.Рустави в период существования СССР действовал Закавказский металлургический завод, который работал на дашкесанском концентрате железной руды и обеспечивался углем из Донбасса.

На протяжении длительного периода Дашкесанское железорудное месторождение служило объектом многочисленных исследований, в особенности в связи с приуроченностью к нему кобальтового оруденения на северо-востоке и крупного алунитового месторождения на северо-западе. Его описание приводится во многих научных публикациях, но более полно и детально оно изложено в монографии Кашкая «Петрология и металлогения Дашкесана» [1].

### Геология Дашкесанского месторождения

Железорудные залежи Дашкесана М.А.Кашкай и все последующие исследователи относили к контактово-метасоматическому скарново-магнетитовому типу, связанному с формированием интрузива [1—5].

Мы же попытаемся показать связь Дашкесанского интрузива с мезозойским палеовулканом, действие которого проходило



в три стадии: батскую, когда образовались гематитовые туфы; байос-батскую — с лапиллиевыми туфами и гематит-магнетитовыми туффитами и в оксфорд-кимериджскую, в которой формировались магнетитовые залежи.

**С первой стадией** связано Алабашлинское гематитовое проявление. Оно расположено в 18–20 км севернее Дашкесанского вулкана и приурочено к среднеюрской (батской) вулканогенной толще мощностью 200–250 м, подвергшейся интенсивным метасоматическим изменениям — каолинизации, алунитизации и эпидотизации.

В составе вулканогенной толщи, представленной туфопесчаниками, туфобрекчиями и туфоконгломератами (рис.4), отмечаются два железорудных гематитовых пласта. Они залегают согласно с вмещающими породами. Верхний — мощностью 1.1–2.2 м и протяженностью 500 м, а нижний — мощностью 0.6–2.5 м и протяженностью 3.1 км. Разделены они толщей туффитов мощностью 15–20 м.

Обогащенные гематитом участки рудного пласта образуют линзовидные скопления и пропластки размером от нескольких сантиметров до 1–2 м в поперечнике и протяженностью от нескольких метров до 10–20 м.

Железные руды в основном представлены гематитом (железным блеском), гетитом, гидрогетитом, гаусманнитом, а также в их состав входят пирит, халькопирит и др.

В генетическом отношении Алабашлинское железорудное гематитовое месторождение по В.В.Веберу (1899) и К.Н.Паффенгольцу (1928) — осадочное, а по Ш.А.Азизбекову и А.Д.Керимову (1940) и по М.А.Кашкаю (1965) — гидротермальное-метасоматическое [1].

Необходимо отметить, что активное участие метасоматических процессов в стадийном замещении вулканогенных пород, вмещающих рудные тела, не вызывает сомнений.

Исследователи Дашкесанского рудного поля выделяют следующие последовательности минералообразования: кварц-сульфидная → марганцевая → мощная кварцево-железорудная → слабо



Рис.3. Канатные дороги от рудника.



Рис.4. Гематитовые туфы и туфобрекчии батского возраста.

выраженная карбонатная [1]. Однако формирование двух железорудных пластов с гематитовой рудой мощностью 1–2.5 м с промежуточной толщей рассланцованных и хлоритизированных туффитов и туфобрекчий мощностью 15–20 м в непосредственной связи с кварцево-железорудной стадией в реалии не доказывает связь интенсивных гидротермальных процессов именно с этими двумя узкими рудными зонами. Между тем «более высокое содержание кремнезема, низкое... железа, а также ноздреватость и слабая пористость верхнего рудного пласта», в противовес «не-



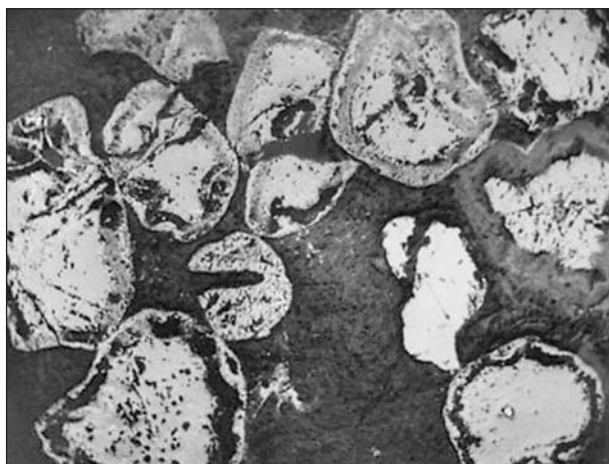


Рис.5. Магнетит-гематитовые лапиллиевые туфы батского возраста.

большому содержанию кремнезема» при «богатом оруденении (железа)... в плотных рудах нижнего рудного пласта» [1] отражают не одновременность их формирования на «кварцево-железорудной стадии», а скорее разубоживание ранее сформированных рудных (гематитовых) пластов более поздними кварцсодержащими гидротермальными растворами. Все это свидетельствует о независимости генезиса железорудных (гематитовых) пластов и линз от метасоматических процессов и позволяет предположить соответствие данного гематитового проявления вулканическим выбросам, т.е. магнетитовым туфам, которые в водном бассейне подверглись окислению с образованием гематита, гетита, гидрогетита и лимонита. А позднее проявились метасоматические процессы, охватившие весь комплекс, включая рудные пласты и линзы. В связи с этим руды Алабашлинского железорудного месторождения можно считать вулканоогенно-осадочными.

**Во вторую стадию** активизации Дашкесанского палеовулкана сформировалось вулканоогенно-осадочное Дашкесан-Шакирское проявление, которое кольцеобразно опоясывает Дашкесанский интрузив. В составе комплекса наравне с песчаниками и туфопесчаниками мы обнаружили прослой и линзы магнетитовых и титанмагнетитовых лапиллиевых туфов мощностью 1–4 м и протяженностью более 1 км, известные в литературе как магнетитовые песчаники и туфопесчаники. Их формирование увязывалось с разрушением различных вулканоогенных и интрузивных пород, содержащих магнетит, а также с предполагаемыми выходами магнетитовых руд в прибрежной зоне батского моря. Тем не менее роль подводных вулканов локального типа, центры которых находились далеко от места образования указанных песчаников, не отрицалась.

Петрографические исследования последних лет доказали присутствие в магнетитовых и ти-

таномангнетитовых лапиллях и туфах кучно расположенных мелких (до 1 мм) фрагментов магнетита округло-эллипсоидальной формы с характерной зональной инфраструктурой и с незначительным количеством цементирующей захороненной массы. Эти признаки свидетельствуют о связи таких кусочков магнетита не с терригенными продуктами разрушения магнетитовых пород и руд, а с вулканическими образованиями, т.е. с магнетит-гематитовыми лапиллиевыми туфами (рис.5).

Другими словами, окатанные фрагменты магнетитов, характеризующиеся единой размерностью до 1 мм, округло-эллипсоидной формой и напоминающие мелкую железистую «шрапнель», представляют собой вулканический материал чуть крупнее вулканического пепла.

Под микроскопом видно, что лапилли изотропны, зерна магнетита обрамлены тонкой оторочкой магнетита, гидрогетита и мартита, а темное кольцо между ними — измененная основная масса. Возможно, в процессе быстрого остывания горошин в водном бассейне произошло окисление внешней корочки магнетита до магнетита и мартита, а в появившемся между слоями микрокольцевом пространстве возникли их гидроокислы. Встречались и магнетитовые лапилли удлиненно-округлой формы с тонкой гематитовой коркой. В центральных частях они содержали нерудную фракцию, представленную хлоритизированной и эпидотизированной массой. Возможно, это пемзовые лапилли с газовой полостью внутри, которые впоследствии заполнились нерудным веществом.

Наличие в туфогенной толще батского возраста лапиллиевых магнетит-гематитовых туфов и туффитов свидетельствует об их вулканоогенном генезисе. Они подобны вулканическим пеплам или бомбам, образованным из жидкой лавы железистого состава. При полевых работах в батской вулканоогенной толще мы обнаружили единичные вулканические бляшки и бомбы магнетит-гематитового состава размером 2–2.5 и 5–7 см соответственно.

Найденные в туффитах магнетит-гематитовые лапилли представляют собой уникальные геологические образования, редко встречающиеся в природе. Особенно важно их временное и вещественное соответствие Дашкесанскому железорудному месторождению. Кольцеобразное обрамление Дашкесанского интрузива батским вулканоогенно-осадочным комплексом с лапиллиевыми магнетитовыми туфами подчеркивает единство их формирования, связанное с деятельностью вулканического центра.

**В третью стадию** проходило формирование железорудных залежей Дашкесанского месторождения, которое системой близмеридиональных и близширотных разломов подразделяется на северные (северо-западный и северо-восточный)

и южные (юго-западный и юго-восточный) участки (табл.). Они представляют собой единое рудное поле, прорванное кварцдиоритовым интрузивом. С дайковым комплексом также связано проявление кобальтового оруденения.

Северные участки служили основным поставщиком железной руды для Закавказского металлургического завода. Разработка здесь велась карьерным методом. Руды мощностью 12—18 м представлены магнетитом и в меньшей степени гематитом.

Южные участки отдельными выходами залежи прослеживаются вдоль склонов долины р. Кошгарчай. Мощность магнетитовой руды 10—25 м при протяженности до 2 км.

Продуктивные залежи в виде пластовых тел согласно располагаются в средне- и позднеюрских вулканитах, измененных в условиях контактового метаморфизма (рис.6). В большинстве случаев в лежачем боку железорудной залежи присутствуют ороговикованные туфы и туффиты, также частично скарнированные. В полосе контакта Дашкесанского интрузива с известняками наблюдается их мраморизация (рис.7), а с вмещающими вулканитами — ороговикование последних.

Дашкесанское месторождение большинство исследователей относят к контакт-метасоматическому скарново-железорудному генетическому типу [2]. Однако существуют и другие мнения. Так, Г.С.Дзоценидзе, отмечая пластовый характер рудных слоев, широкое развитие гематита в рудах и наложение более позднего скарново-железорудного оруденения, считал данное месторождение вулканогенно-осадочным [3]. О вулканогенно-осадочном происхождении говорит и Г.В.Мустафаев, хотя пластовый характер залежей он объясняет наличием горизонтальных зон растяжений [4].

Мы не отрицаем роль скарнового процесса в формирова-

Таблица

**Средний химический состав (масс. %) групповых проб железных руд Северного и Южного участков на Дашкесанском месторождении [4]**

Компоненты	Северные участки		Южные участки	
	СЗ	СВ	ЮЗ	ЮВ
SiO <sub>2</sub>	20.46	18.84	11.15	10.96
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.15	—	0.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.95	7.88	4.0	3.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.3	38.36	48.18	45.9
FeO	15.8	16.96	20.5	20.64
MnO	0.90	0.32	—	0.41
MgO	1.20	2.19	1.07	1.1
CaO	14.72	8.76	9.92	10.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.11	0.08	0.07
FeS <sub>2</sub>	0.67	0.23	S = 1.88	S = 0.5
п п п	3.58	6.13	—	4.94
Cu	0.04	0.065	0.2	0.13
Co	—	0.005	—	—
Σ	100	100	96.98	99.06
В том числе:				
Fe	37.35	40.20	50	47.12
S	0.36	0.12	1.87	0.5
P	0.08	0.05	0.035	0.03

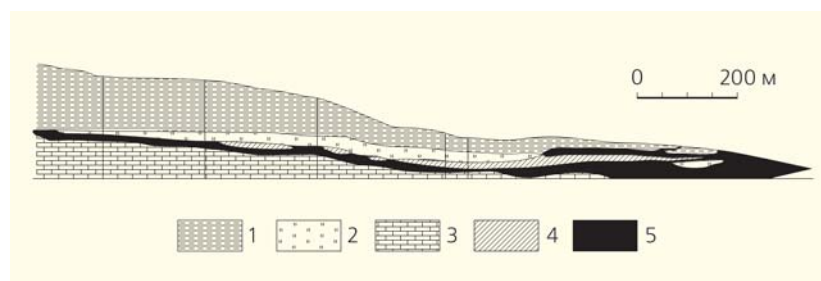


Рис.6. Геологический разрез Северо-Западного участка: 1 — туфопесчаники и туфы; 2 — роговики; 3 — известняки; 4 — скарны эпидот-пироксеновые и пироксен-эпидотовые; 5 — магнетитовые руды.



Рис.7. Мраморизация известняков на контакте с интрузией.





Рис.8. Брекчированная околоинтрузивная полоса с ксенолитами роговиков, сцементированная магнетитом.



Рис.9. Железорудная залежь размером 1×20 см в роговиках Дашкесанского поля.

нии железных руд в ореоле Дашкесанского интрузива [4]. Однако ограниченное (170—200 м) проявление метасоматоза в околоинтрузивной зоне при значительном развитии железорудных залежей далеко (в более чем 2 км) за пределами скарновой зоны; морфологическая разнотипность руд; присутствие скарнов в экзо- и эндоконтакте интрузива; наличие в околоинтрузивном ореоле брекчированных зон с ксенолитами роговиков, сцементированных магнетитом (рис.8), и, наконец, пластовая морфология железорудных залежей свидетельствуют об их самостоятельном формировании и наложении скарново-рудного метасоматоза на уже возникшие рудные тела. Послойный же характер железорудных залежей, затухающих по мощности от 15—20 м до 20—30 см и далее до 1 см (рис.9), подтверждает их вулканогенный генезис.

\* \* \*

Таким образом, все приведенные факты позволяют нам считать железорудные залежи лавами с высоким содержанием магнетита.

Дашкесанское железорудное месторождение продолжает эксплуатироваться и ныне. Но, к сожалению, все околоинтрузивное пространство разработано карьерным способом, что затрудняет изучение зоны контакта. Единственный сохранившийся объект, где возможно установить лавовый характер железорудной залежи, — обнажения в районе села Загала, на левом борту р.Кошкарчай, напротив Дашкесанского интрузива.

Анализ соотношений оксидов железа и титана ( $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ ) и оксидов породообразующей ассоциации ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{MnO}$ ) в магнетит-гематитах всех трех рудных комплексов Дашкесанского поля позволил установить следующую закономерность. При относительной однотипности составов в ряду «магнетитовая залежь → магнетит-гематитовые лапиллиевые туфы → гематитовые туфы» наблюдаются рост концентрации  $\text{SiO}_2$

и относительное обогащение магнетитов окислами породообразующей ассоциации (рис.10). Подобное соотношение можно объяснить возникновением этих образований на различных уровнях расплава в очаге магмогенерации.

На основе полевых исследований на северо-восточном борту Малого Кавказа мы предположили наличие там, между доальпийским фундаментом и мезозойским вулканогенно-осадочным ком-

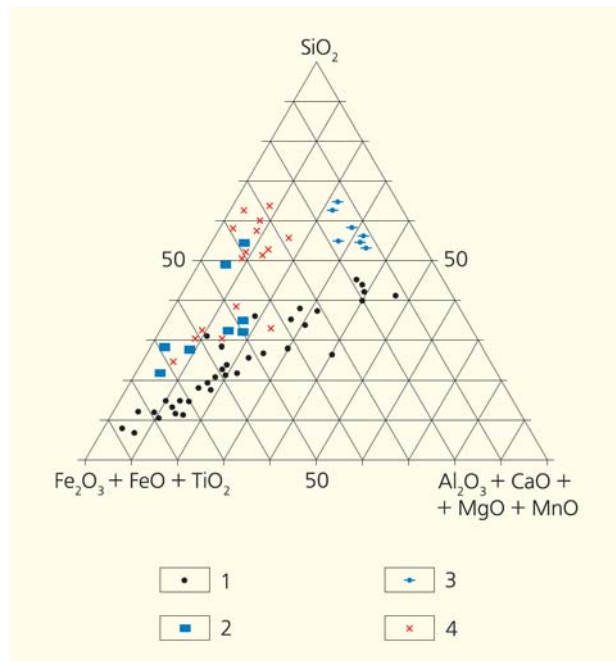


Рис.10. Диаграмма соотношения составов магнетитов и гематитов в мезозойских комплексах Дашкесанского прогиба: 1 — магнетитовые руды Дашкесана; 2 — лапиллиевые титано-магнетитовые туфы и туфопесчаники Дашкесана, Дадафюра, Шамкира; 3 — туфы и туфопесчаники Дашкесана (бат), вмещающие титано-магнетиты; 4 — гематитовые руды Алабашлы.



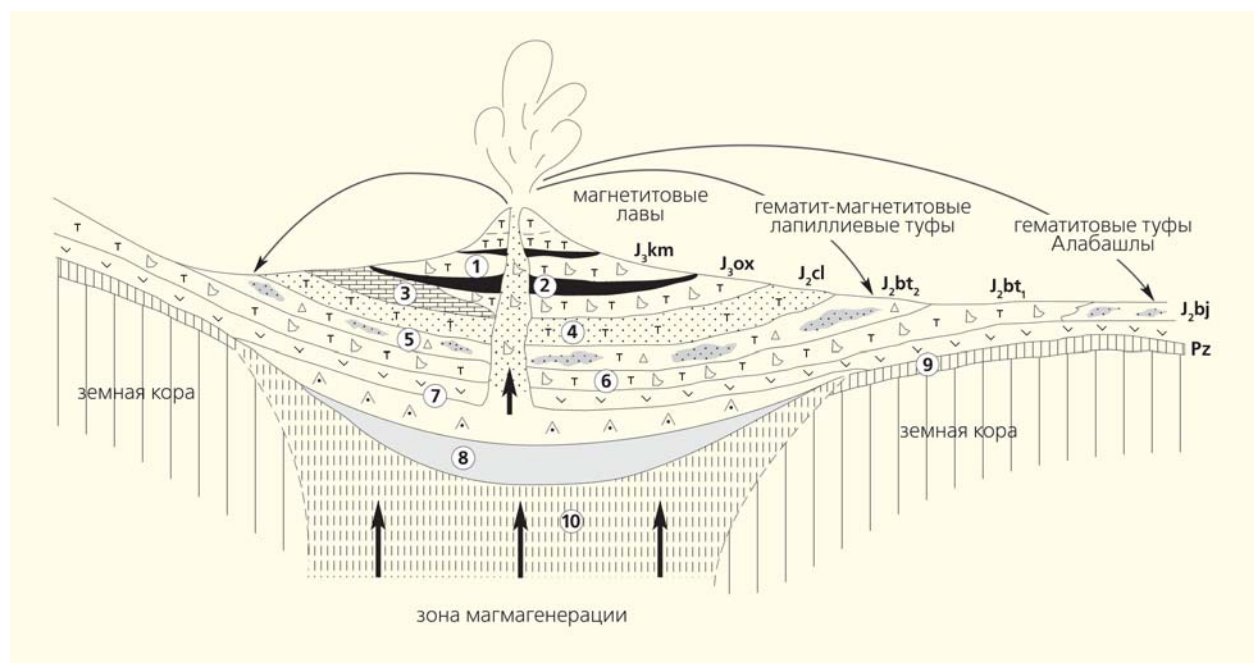


Рис.11. Схема проявления Дашкесанского палеовулкана в мезозое: 1 — туфы и туфобрекчии,  $J_3km$ ; 2 — магнетитовые лавы; 3 — известняки,  $J_3ox$ ; 4 — аргиллиты и песчаники,  $J_2cl$ ; 5 — кварцевые туфопесчаники с линзами гематит-магнетитовых лапиллиевых туфов,  $J_2bt_2$ ; 6 — псаммитовые туфы и туфобрекчии; гематитовые туфы,  $J_2bt_1$ ; 7 — кварцевые порфиры и их туфы,  $J_2bj$ ; 8 — предполагаемая раннемезозойская аллохтонная пластина; 9 — терригенно-карбонатный комплекс, Pz; 10 — флюиды.

плексом, погребенной раннепалеозойской аллохтонной (перенесенной) гипербазитовой пластины [6]. Максимально она должна быть сосредоточена в Дашкесанском прогибе — в противовес сопряженным с ним поднятиям (Шамкирским на западе и Агдамском на востоке). Наползание этой пластины на доальпийский субстрат сопровождалось погружением последнего в мантию и выплавлением палингенной гранитоидной магмы. Последующий ее подъем и взаимодействие с гипербазитовой пластиной привели к образованию гибридного (диоритового) расплава с высоким содержанием железа (в гипербазитовой пластине содержание суммарного железа более 10%). В магматическом очаге при ликвации этот расплав расщепился на сили-

катную и рудную фракции. Последняя и стала источником металлов в железорудных месторождениях Дашкесанского прогиба (рис.11). Повышенная концентрация кобальта, характерная для ультраосновных тел, свидетельствует о связи магматического расплава с мантийным веществом.

В процессе раскристаллизации магмы при избыточном содержании в ней рудных компонентов также может происходить ликвационное расщепление расплава на две несмешивающиеся жидкости — силикатную и рудную. В дальнейшем магмы, богатые газом, могут бурно изливаться из жерла вулкана в виде магнетитовых расплавов. Подобное явление зафиксировано при извержении вулкана Эль-Лако в Чили. ■

## Литература

1. Каишай М.А. Петрология и металлогения Дашкесана. М., 1965.
2. Азадалиев Д.А. Основные черты скарно-рудообразования в Дашкесанском рудном поле // Изв. АН Азерб.ССР. Сер. Науки о Земле. 1969. №5. С.31—43.
3. Дзоценидзе Г.С. Роль вулканизма в образовании осадочных пород и руд. М., 1969.
4. Мустафаев Г.В. Дашкесанское железорудное месторождение // Геология Азербайджана. Т. VI. Баку, 2005. С.31—48.
5. Исмаил-Заде А.Д. Новый взгляд на формирование железорудных месторождений Дашкесанского прогиба Малого Кавказа // Изв. НАНА. Сер. Науки о Земле. 2012. №4. С.33—44.
6. Исмаил-Заде А.Д. Петрологическая интерпретация процесса гибридизма в мезозойских гранитоидных интрузивах Малого Кавказа // Изв. НАНА. Сер. Науки о Земле. 2006. №2. С.9—19.

# Арктическая дымка и атмосферные осадки

П.Ф.Свистов, М.Т.Павлова

**В**лияние человеческой деятельности заметно сказывается на природных условиях не только урбанизированных и густонаселенных территорий, но даже ледяного плато Северного Ледовитого океана. Климат Арктики особенно чувствителен к наличию загрязнений в воздухе. В 2007—2008 г. полярники собрали здесь осадки с необычным химическим составом. В единичных пробах были обнаружены одновременно фоновые концентрации основных компонентов, повышенное количество хлорида натрия при наличии сплошного ледяного покрова и сверхвысокое содержание микроэлементов.

С июня по август 2007 г. наблюдения проводились на Ледовой базе (ЛБ-35) — льдине с небольшим дрейфом. В октябре их перенесли на российскую научно-исследовательскую дрейфующую станцию Северный полюс-35 (СП-35). Траектория дрейфа льдины проходила в пределах абиссальной равнины Баренца (котловина Нансена), от точки с координатами 81°27' с.ш., 115°19' в.д. до точки 81°15' с.ш., 29°15' в.д. Станция начинала свой путь от северо-восточного побережья Северной Земли и двигалась сначала в северо-западном, затем в западном направлении в сторону Земли Франца-Иосифа. За 284 дня (21.09.2007—30.06.2008) в ав-



**Петр Филиппович Свистов**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела мониторинга и исследований химического состава атмосферы Главной геофизической обсерватории им.А.И.Воейкова (Санкт-Петербург), химик-аналитик. Многие годы занимается химической географией атмосферных вод.



**Маргарита Тихоновна Павлова**, ведущий химик-аналитик того же отдела. Область научных интересов — разработка и совершенствование методов химического анализа природных вод.

тономном режиме она прошла 2422 км со средней скоростью 8.5 км/сут.

Атмосферные осадки собирались в ведро из химически стойкого белого полиэтилена объемом 10 л. Во время отсутствия осадков ведро закрывалось крышкой. Пробы осадков отбирали до марта 2008 г., и все они получены на ледяной поверхности Северного Ледовитого океана.

В статье также использованы данные о химическом составе осадков, полученные со станций российского Заполярья. Всего их 19, и некоторые ведут наблюдения за осадками уже в течение 30 лет.

Известно, что Северный Ледовитый океан, в отличие от других, не поставляет влагу в атмосферу. Напротив, он ежегодно забирает из мирового круговорота более 2 тыс. км<sup>3</sup> воды. Циклоны и антициклоны образуются над океаном редко, чаще всего они приходят со стороны [1—4]. Так называемые арктические атмосферные фронты, проходя вдоль азиатского побережья летом, зимой опускаются до 60° с.ш.

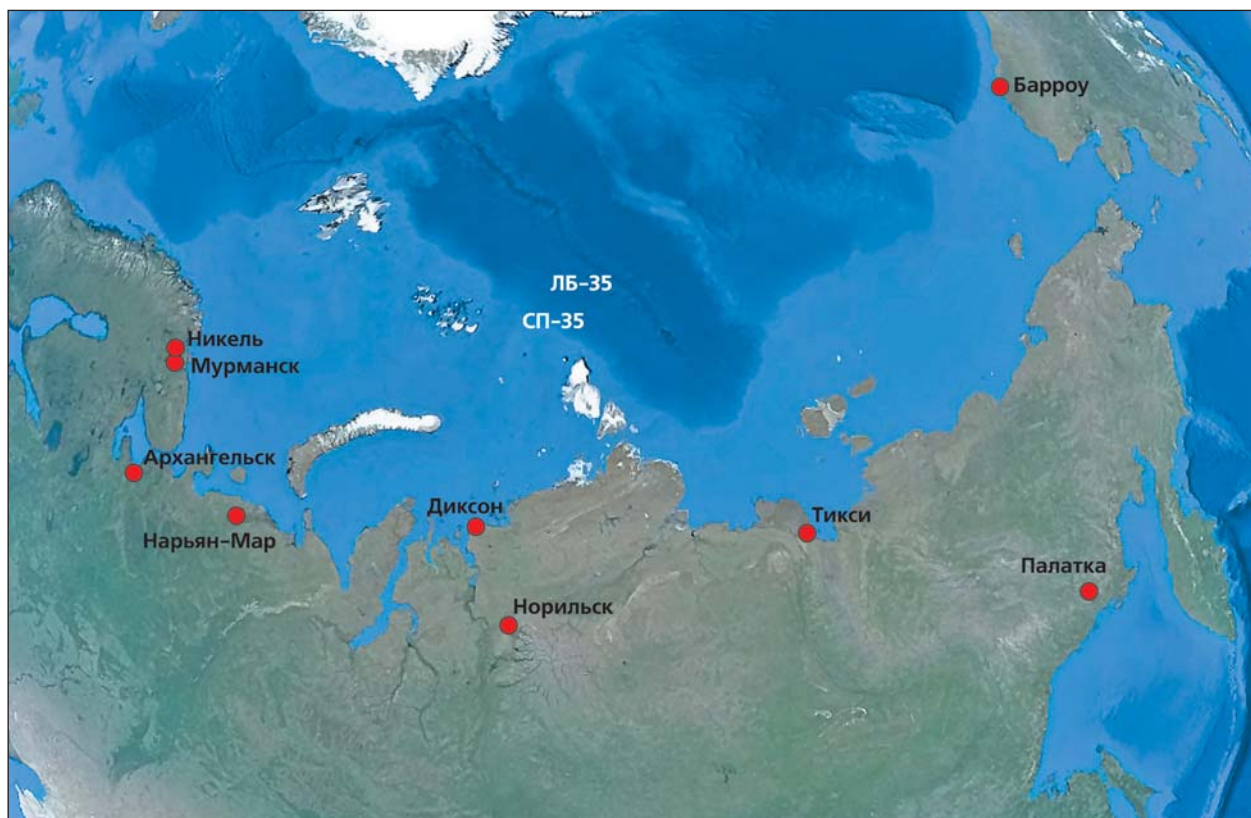
Арктика не имеет собственных техногенных источников загрязнения воздуха. Особенности выпадения осадков, в том числе загрязненных, над этим регионом определяются тремя основными факторами: характером атмосферной циркуляции, закономерностями прихода и расхода тепла, а также воздействием подстилающей поверхности [1, 2]. Полярные день и ночь, большие площади дрейфующих льдов и встречающиеся в них разводья создают специфические условия для увлажнения воздуха и формирования химического состава осадков.

В холодный период года, когда наиболее развита циклоническая деятельность, осадки выпадают часто, но сумма их оказывается меньше, чем летом. Это объясняется заметным уменьшением влагосодержания воздушных масс в связи с понижением температуры воздуха по мере их удаления от Исландского и Але-



Российская научно-исследовательская дрейфующая станция Северный полюс-35. На переднем плане — устройство для сбора осадков на химический анализ.

Фото А.А.Висневского



Некоторые из российских станций, собирающих атмосферные осадки на химический анализ, а также международная станция фонового мониторинга Барроу на Аляске (США).



утского циклонических центров действия атмосферы в глубь Арктики. В летнее время повторяемость осадков уменьшается, а их интенсивность возрастает. В среднем для Арктики она составляет осенью 0.15, зимой — 0.12, весной — 0.09, а летом — 0.35 мм/ч на 1 м<sup>2</sup> (или л/ч).

В Арктике чаще, чем где либо, выпадают мелкие фронтальные осадки из слоистых и слоисто-кучевых облаков. Внутримассовые осадки составляют небольшую долю от общей суммы, и очень редко бывают грозы. Средняя за год сумма осадков в районе дрейфа льдины со станцией СП-35 составила примерно 200 мм с колебаниями от 100 до 280 мм. Чаще всего шел снег, а дождь или дождь со снегом наблюдались только в летние месяцы. Были случаи выпадения ледяного дождя, что говорило о присутствии в свободной атмосфере переохлажденных облаков.

### Состав осадков в Центральной Арктике

Наблюдения за аэрозолями в Арктике позволили выявить наиболее вероятные источники загрязнения ее атмосферы: локальные, региональные и попавшие сюда в результате дальнего переноса [3, 5, 6].

Местные (локальные) загрязнения проявляются в осадках, как это ни странно при сплошном ледяном покрове, через преобладающее содержание хлорида натрия (его основным источником обычно считают открытые водные поверхности и прибрежные зоны Мирового океана). При размахе значений концентрации ионов хлора от 0.2 до 30 мг/л во всех единичных и месячных осадках отношение хлора к натрию остается близким к 1.8 (морская вода). При движении в глубь континента концентрация хлора в осадках обычно резко па-

дает до 0.2—1.0 мг/л и появляется натрий терригенного происхождения.

Следующие компоненты — сульфаты (0.1—3.2 мг/л) и гидрокарбонаты (0.4—1.7 мг/л) — даже в сумме уступают хлоридам. Их присутствие в осадках связывают с наличием в воздухе диоксида серы и почвенной пыли соответственно. Но возможно и попадание в осадки сульфата магния из морской воды, а карбонаты могут образовываться при растворении углекислого газа из воздуха. При температуре чуть выше 0°C и концентрации диоксида углерода в воздухе 360 ppm образуется 1—2 мг/л гидрокарбонатов, что сопоставимо с обнаруженным содержанием.

В подтверждение роли региональных источников загрязнения в северо-восточном секторе Арктики сбор и химический анализ осадков проводили параллельно на двух станциях: СП-35 и в Норильске. Коэффициент корреляции между количественным содержанием основных компонентов на этих станциях в среднем за весь рассматриваемый период составляет 0.4, а в январе, феврале и марте приближается к 1.

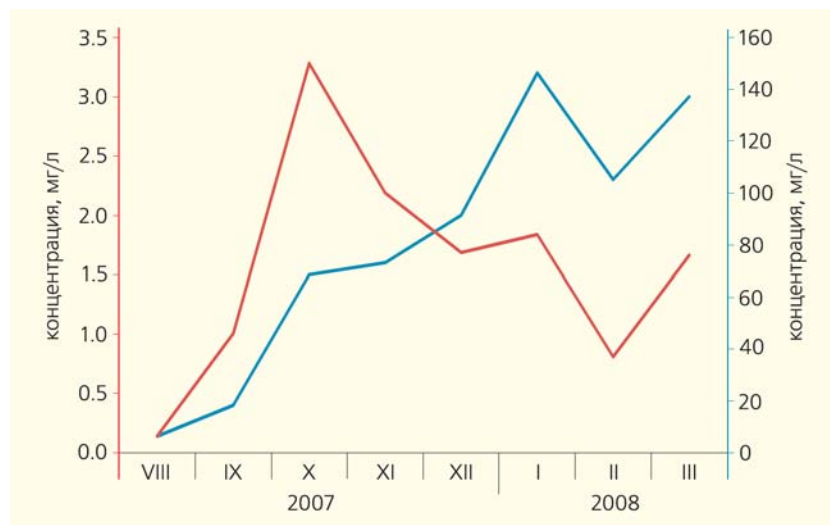
Интересно, что в августе абсолютные минимальные концентрации сульфатов на льдине соответствуют низким значениям в Норильске. В целом же содержание сульфатов в Норильске выше, чем на СП-35, примерно в 40 раз.

Однако не все так определено, если обратиться к данным непосредственных измерений химического состава осадков и наблюдений за метеорологическими условиями при их выпадении.

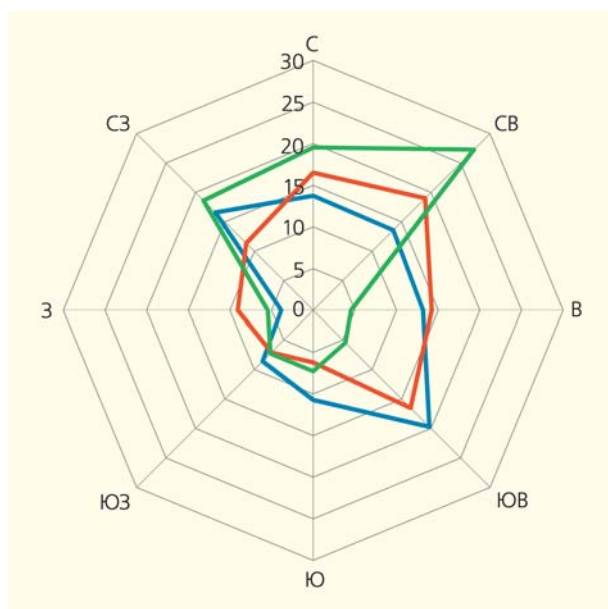
Зимой и летом осадки поступают из разных секторов Арктики, при этом они различаются интенсивностью и продолжительностью. Наименьшее их количество (около 5%) поступает с западным и юго-западным переносом, максимальное (до 20%) — с юго-востока. Выбросы от Норильска рас-

пространяются летом преимущественно на восток и юго-восток с заметной долей южной составляющей. Поэтому прямое попадание их в Центральную Арктику исключается либо происходит только по периферии воздушных потоков. Во время летнего муссона, образующегося в результате перепада давления и направленного в сторону континента, происходит не только блокирование влияния Норильска, но и самоочищение северо-восточной части Арктики.

Зимний перенос в Норильске происходит с более холодной суши на море в северо-западном и западном направлениях и приводит к сильному региональному загрязнению в основном западных секторов Арктики.



Ход изменения концентрации сульфатов в осадках на станции СП-35 (синие шкала и кривая) и в Норильске (красные шкала и кривая).



Процентное распределение поступления атмосферных осадков на станцию СП-35 с разных направлений в 2007 и 2008 гг. Синей кривой показаны осадки холодного периода, красной — теплого, зеленой — июня.

Муссоны в то или иное полугодие не сохраняются здесь непрерывно, а часто сменяются ветрами других направлений. Так, в июне минерализация поступающих на станцию осадков (1.1 мг/л)

и содержание основных компонентов (хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, кальция и натрия) сравнимы с фоновым, а концентрация тяжелых металлов оказывается сверхвысокой. Особенно велико содержание никеля (до 111.5 мкг/л при экологической норме 10 мкг/л). Более 45% таких осадков поступает с северо-востока и севера, т.е. от Североамериканского континента.

### Арктическая дымка

Высокий уровень химического загрязнения воздуха в Арктике, по-видимому, стал причиной формирования так называемой арктической дымки. Ее образованию способствуют низко расположенные задерживающие слои (табл.1), которые практически постоянно присутствуют в атмосфере [5–8]. В этих слоях (инверсиях) температура воздуха возрастает или остается постоянной, в отличие от нормального ее падения с высотой. Повторяемость инверсий в холодный период года достигает 87%. Зимой практически над всей северной частью азиатской территории России и над окраинными морями она превышает 70%, в западной части Арктики уменьшается до 50% [5].

Явление дымки было хорошо известно даже первым полярникам, а отмечали ее во многих районах Арктики. Открытие же уплотнения и многослойности дымки положило конец более ранним представлениям о том, что аэрозольное

**Таблица 1**  
Повторяемость инверсий и состав осадков в центральной Арктике

Характеристика	Месяцы						
	I	II	III	VI	X	XII	VII–IX
Повторяемость инверсий, %	77	78	87	40	50	67	45
Ni, мкг/л	37	245	72	112	64	110	119
Fe, мкг/л	72	195	198	15	75	134	36
Zn, мкг/л	38	170	60	13	87	35	19
Cu, мкг/л	4.2	5.6	7.6	2.5	3.7	4.5	67
Cr, мкг/л	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
Pb, мкг/л	1.3	0.7	2.1	0.3	5.5	1.2	0.9
Проводимость, мкСм/см	166	46	32	3	46	112	7
Величина pH	5.4	5.3	4.7	5.7	6.3	4.9	5.9
Сульфаты, мг/л	3.2	2.3	2.0	0.1	1.0	2	0.2
Хлориды, мг/л	47	10	8	0.2	12	29	0.7
Сумма ионов, мг/л	81	25	17	1.1	23	54	3

загрязнение может быть только локальным или региональным. В холодном и сухом воздухе полярных регионов некоторые частицы способны многие сутки оставаться во взвешенном состоянии, что позволяет различным соединениям мигрировать на большие расстояния. При существующей системе циркуляции воздушных масс перенос загрязнителей из промышленно развитых регионов Европы, Азии и Северной Америки в Арктику в основном осуществляется в зимний период, а вынос на континенты — в летний [6—9]. Рассеивание (диффузия) и выпадение загрязнений происходят обычно в результате движения воздуха в горизонтальном и вертикальном направлении, а также при выпадении осадков.

Результаты наблюдений на севере Аляски в 2003—2008 гг. показали, что число слоев инверсии в пределах тропопаузы практически не меняется от весны к осени; зимой их становится значительно больше [8]. И в нижнем 300—500-метровом слое воздуха, вероятнее всего, также существуют инверсии.

В зонах повышенного давления воздуха (в антициклональных условиях) загрязнение всегда выше. Причем настолько, что появление и силу антициклона в США используют для прогноза по-

тенциала загрязнения воздуха [9]. В антициклонах растекающийся в приледном слое воздух вместе с загрязняющими веществами поднимается в ложбинах до тех пор, пока его начальная плавучесть и инерция вертикального движения не исчерпаются.

С наступлением полярного дня происходит разрушение радиационных инверсий и начиная с мая они формируются в основном под влиянием адвекции (переноса) более теплого воздуха.

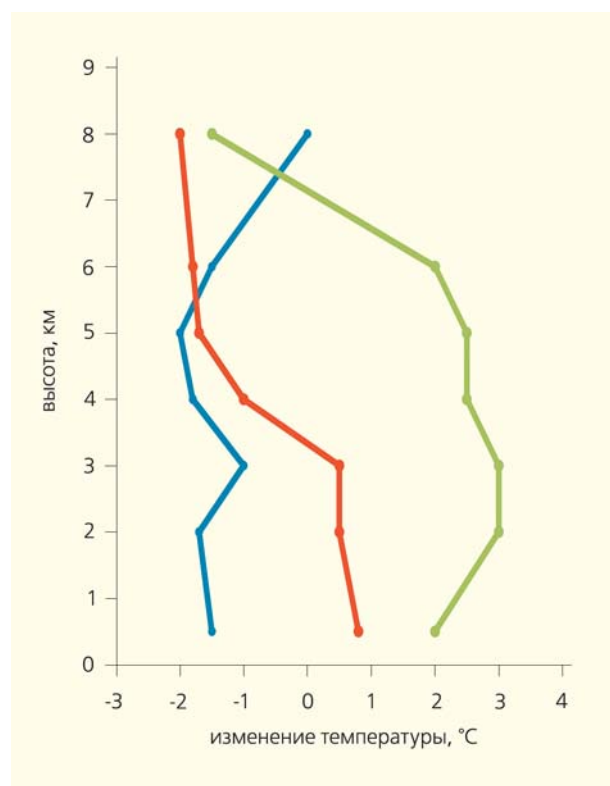
Наиболее высокие концентрации основных компонентов и микроэлементов в атмосферных осадках приходятся на зимний период, когда повторяемость и число инверсий достигает максимальных значений. Высота их находится в пределах 500—1000 м, и они словно прижаты к поверхности льда. Летом система циркуляции воздуха перестраивается, и высота инверсионного слоя увеличивается до 2000 м.

Изменение концентрации микроэлементов в осадках (табл.2) оценивают по сезонам: лето (июнь, июль, август) и зима (ноябрь, декабрь, январь, февраль, март). Также рассматриваются лимитирующие показатели вредности (ЛПВ) или экологическая норма элементов в природных водах и гигиенические предельно допустимые концентрации (ПДК) [10].

Невероятно, но концентрации свинца и кадмия, относящихся к супертоксикантам, оказались вполне сопоставимыми с теми, которые были получены для заповедников Центрального федерального округа России [11]. Вместе с марганцем, медью и хромом они составляют немногим более 4% от суммы микроэлементов. Около 96% тяжелых металлов приходится на железо, цинк и никель. Зимой содержание железа, марганца и меди превышает экологическую норму в 2—8 раз, цинка в 17, а никеля более чем в 20 раз; летом оно несколько меньше. Доля тяжелых металлов варьирует от 0.5 до 12% от общей суммы ионов (основные компоненты плюс тяжелые металлы). В большинстве региональных и городских осадков содержание никеля, марганца, меди, свинца, хрома и кадмия обычно на порядок или два ниже содержания основных компонентов и нередко увеличивается с ростом минерализации [12]. Из рассматриваемых металлов к числу наиболее опасных для экосистем относятся никель и медь, содержание которых значительно превышает экологическую норму, а также свинец и кадмий, имеющие очень низкий допустимый уровень содержания в воздухе.

Среди возможных составляющих арктической дымки могут быть оксиды металлов, аска, почвенная пыль и металлоорганические соединения.

В течение года относительное содержание сажи в воздухе, сульфатов и суммы ионов в осадках хорошо согласуются. Примерно так же ведут себя хлориды и кислотность осадков. Их среднемесячные высокие и низкие значения довольно хо-



Распределение инверсий по высоте над северной Аляской в сентябре (красная кривая), мае (синяя кривая) и июне (зеленая кривая) [8]. Значения по горизонтальной оси показывают отклонение температуры воздуха на указанной высоте от ее величины вблизи поверхности льда.



рошо разделяются по холодному и теплому периодам соответственно. В любом случае загрязнение возрастает с зимним увеличением повторяемости числа инверсий и уменьшением их высоты. Перестройка начинается и в связи с продвижением арктического фронта в глубь материка, что, по-видимому, приводит вообще к понижению загрязнения Арктики.

Максимальная кислотность осадков также приходится на зиму. За основными компонентами в основном следуют цинк и железо, что характерно и для континентальных станций.

Установлено, что в холодный период года содержание никеля и меди не возрастает. При осреднении за июнь, июль, август и сентябрь получается, что в среднем за месяц относительное содержание никеля составляет 11.5%, а в холодный период — 9%; для меди же различия вообще не наблюдаются.

По результатам измерений, линейная связь содержания большинства тяжелых металлов и основных компонентов отсутствует, хотя источники главных компонентов и микроэлементов одни и те же.

Приведем пример. В субтропической зоне были собраны осадки, представлявшие собой взвесь частиц черного цвета. Во взвешенном состоянии содержалось 21 мг/л сажи, которую отфильтровали, высушили при 105°C и подвергли химическому анализу. Помимо основных компонентов в осадках обнаружены около 30 микроэлементов и следы поверхностно-активных веществ (ПАВ). Становятся понятными хорошая (но не полная) вымываемость сажи осадками, почти месячное сохранение ее взвеси, наличие большого количества микроэлементов и переход их в раствор. Как известно, одна часть молекул ПАВ полярна, другая — неполярна, поэтому им присуща двойственность свойств по отношению к соответствующим функциональным группам в других соединениях.

Основные компоненты и сажа существенно различаются по физико-химическим свойствам. Все сульфаты, хлориды, нитраты, аммонийные соли и соли щелочных металлов гигроскопичны и хорошо растворимы в воде, в результате чего при постоянно высокой в Заполярье

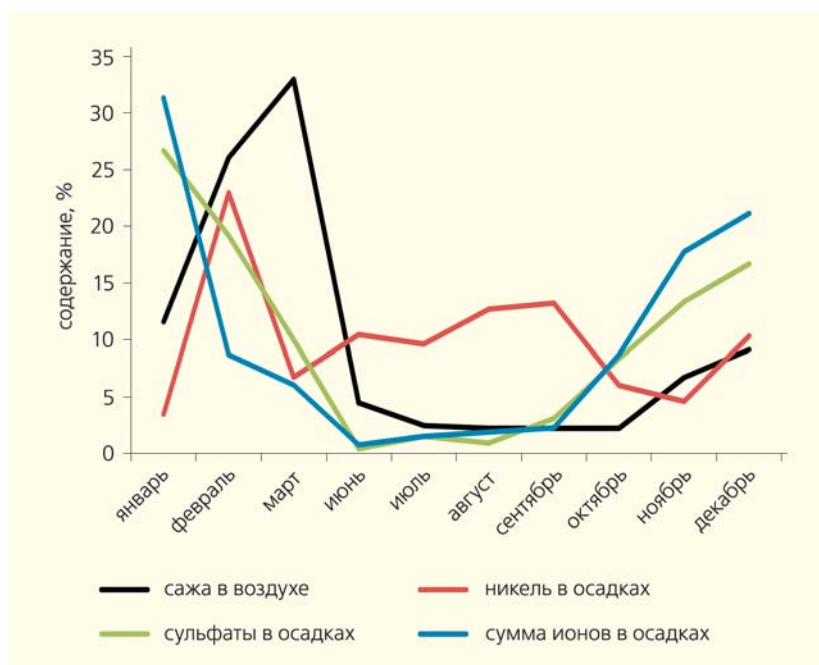
Таблица 2

**Диапазон изменения концентраций тяжелых металлов в осадках и норма их содержания в водных экосистемах**

Сезон и норма	Концентрации тяжелых металлов, мкг/л							
	Fe	Zn	Ni	Mn	Cu	Pb	Cr	Cd
Лето	15–50	13–25	111–135	—	2–9	0,3–6	0,1	0,1
Зима	21–200	13–170	40–245	6–19	3–8	0,2–6	0,1–0,4	0,1
ЛПВ	100	10	10	10	1	10	5	0,5
ПДК	300	1000	20	100	1000	10	50	1

относительной влажности воздуха (>75%) они легко выпадают еще на подступах к центральной Арктике и при отсутствии осадков. Наиболее интенсивно этот процесс идет в летнее время, на что указывают низкая проводимость осадков и высокое содержание тяжелых металлов. Заметим, что в зимних осадках оно еще выше, но при этом практически не оказывает влияния на проводимость ввиду большого количества основных компонентов.

Микроэлементы, по-видимому, присутствуют в атмосфере в виде смеси сажи с мелкодисперсными аэрозолями оксидов металлов и, возможно, металлоорганических соединений. Все промышленные производства и в меньшей степени транспорт выбрасывают в атмосферу помимо широко известных газов сажу, летучую золу, мелкодисперсную пыль, эфирные масла и жирные кислоты. Минеральная составляющая буквально пропитывается органическими веществами (сажа всегда кажется маслянистой). Эти выбросы плохо рас-



Годовой ход относительного содержания сажи в воздухе [13], никеля, сульфатов и суммы ионов в атмосферных осадках Арктики.

творимы в воде и не смачиваются. Инверсионные слои, накапливая эти вещества и задерживая вертикальный обмен, способствуют сохранению арктической дымки практически круглый год. Непосредственно в облачных элементах концентрация тяжелых металлов, по-видимому, невелика, но влажные выпадения создают поток воздуха с аэрозолями, которые вместе с элементами осадков попадают в осадкосборники. Таким образом, процесс выведения загрязнений из воздуха на местном уровне складывается из сухих, сухо-влажных и влажных выпадений. Вероятно, на содержании тяжелых металлов меньше сказываются температурные и влажностные характеристики воздуха, продолжительность осадков. Хотя, например, поведение железа и цинка сравнимо с распределением макрокомпонентов. В настоящее время на некоторых региональных станциях России цинк и железо наряду с магнием можно причислить к основным компонентам.

Как было сказано, существенное различие в физико-химических свойствах основных компонентов и микроэлементов проявилось в летних осадках. Их проводимость и минерализация входят в интервал значений глобального фонового уровня состава осадков, который в принципе (из-за присутствия углекислого газа) не может быть ниже 1–1,5 мг/л. В июньских осадках присутствовали пробы с минерализацией 1.1 мг/л. Следовательно, одновременно осадки в Арктике *выпадают глобально фоновые по главным компонентам и глубоко урбанизированные по тяжелым металлам.*

Следует рассмотреть еще одну особенность распределения химического состава осадков в Арктике. Дрейфующая станция перемещалась в северо-западном направлении, удаляясь от российских и североамериканских источников загрязнения воздуха и несколько приближаясь к европейским. Тем не менее сделать какой-либо определенный вывод в этом отношении полученные результаты не позволяют. Они говорят лишь о том, что воздух на всей акватории Северного Ледовитого океана постоянно содержит большое количество аэрозолей с микроэлементами, распределение и концентрация которых определяются температурно-влажностными характеристиками атмосферы и в особенности циркуляционными процессами.

### Осадки в прибрежных районах

По результатам анализа химического состава осадков в российском Заполярье опубликовано несколько работ, в том числе в зарубежных изданиях [4, 13–15]. Основное внимание в них уделено вопросам качественных и временных изменений состава основных компонентов без сопоставления с микроэлементами.

По климатическим характеристикам Заполярье и прилегающие территории разделены на три области: Атлантическую, Сибирскую и Тихоокеанскую (табл.3). Для каждой из них рассчитывают средние за год значения и выбирают станцию

**Таблица 3**

**Химический состав атмосферных осадков в Арктическом бассейне по средним за год значениям (2007 и 2008 гг.)**

Компонент	Заполярье							СП-35
	Атлантическая область		Сибирская область			Тихоокеанская область		
	область	Падун	область	Норильск	Туруханск	область	Палатка	
Количество осадков, мм	618	530	485	470	640	310.2	462	200
SO <sub>4</sub> , мг/л	2.8	2.1	12.3	90.6	2.5	1.6	2.1	1.2
Cl, мг/л	3.4	1.1	10.8	5.1	0.8	0.8	0.7	14.8
HCO <sub>3</sub> , мг/л	2.4	0.1	8.4	23.4	3.6	3.3	2.7	0.9
Na, мг/л	1.7	0.4	4.8	1.0	0.8	0.6	0.4	5.3
Ca, мг/л	1.2	0.4	2.2	7.6	0.5	0.7	1.1	1.6
M, мг/л	13.4	5.1	43.2	161.0	10.4	8.1	8.5	26.8
Проводимость, мкСм/см	28	15	103	391	19	19	13	55
pH (ср.)	5.5	4.7	6.3	7.3	6.2	6.1	5.7	5.6
pH (мин.)	3.2	3.3	4.0	4.1	3.9	4.0	3.5	4.7

в сельской местности для оценки регионального фоновый уровня области. Станция Туруханск, кроме того, входит (как «глобально» фоновая) в международную систему Глобальной службы атмосферы Всемирной метеорологической организации (ГСА ВМО). Данные отечественных станций относятся к 2007 и 2008 гг. и сопоставимы с полученными для СП-35.

Что касается международной фоновой станции Барроу, то здесь мы вынуждены ограничиться неполными сведениями о величине основных компонентов за 1994 г. [14]. Сумма осадков за год здесь близка к 115 мм с направлением основного (около 70%) переноса из северо-северо-восточного до юго-юго-восточного секторов, т.е. с Американского континента. Величина рН осадков изменяется от 5.3 до 6.3 летом и от 4.6 до 5.2 зимой; проводимость находится в пределах 4.9—170 мкСм/см. Нижняя величина рН и проводимости сопоставимы с данными по СП-35.

В большинстве проб преобладает хлорид натрия в соотношении, близком к морской воде при среднем содержании хлоридов 20 мг/л. Концентрация сульфатов изменяется от 0.1 до 4.3 мг/л. Концентрация нитратов (0.1—0.3 мг/л), кальций и магний (0.1—3.0 мг/л) встречаются примерно в тех же количествах, что и в заполярных областях РФ.

Обращаем внимание, что годовая сумма осадков на прибрежных станциях строго падает с запада на восток и с юга на север, а это само по себе приводит к некоторому возрастанию их минерализации. Так как Норильск, Туруханск и Палатка расположены сравнительно далеко от берега моря, там меньше хлоридов морского происхождения и больше колебания суммы осадков. Максимальное содержание сульфатов и гидрокарбонатов приходится на Норильск, что говорит о присутствии в воздухе большого количества диоксида серы и пыли в виде карбонатов. Расчет концентрации сернистого газа при содержании 90 мг/л сульфатов дает приблизительно 270 мкг диоксида серы на 1 м<sup>3</sup> (ПДК составляет 50 мкг/м<sup>3</sup>). Распространяясь на юг и на север, концентрация сульфатов уменьшается в Туруханске (более 1000 км) до уровня 2.5 мг/л (что выше фоновый уровень примерно на 36%), а на о.Диксон, расположенном севернее Норильска, примерно до 10 мг/л. На СП-35 содержание сульфатов в среднем за год ниже регионального фоновый уровень почти в два раза. В качестве регионального фона для Тихоокеанской полярной области принята концентрация сульфатов в осадках, равная 1.6 мг/л. Примерно так же ведут себя гидрокарбонаты и кальций, характеризуя запыленность воздуха.

Таким образом, по основным компонентам преобладающая роль Норильска в формировании химического состава атмосферных осадков и загрязнении центральной Арктики весьма сомнительна.

Основной вклад (более 50%) в минерализацию летних и зимних осадков на СП-35 вносят хлориды местного происхождения, которые попадают сюда, по-видимому, с метелью и в результате выноса хлорида натрия с разводий.

Анализ полученных результатов позволяет также сделать вывод, что за последние годы не происходит процесса закисления осадков в арктической зоне России. Осадки с повышенной кислотностью регулярно выпадают только на территории Кольского п-ова, где величина рН в 60% случаев имеет значение 5.0, но может достигать и 3.2. Кислотность осадков в Сибирском регионе остается неизменной, а в восточных областях Арктики медленно понижается (величина рН возрастает).

В отношении тяжелых металлов как одного из компонентов арктической дымки следует привести данные, полученные в системе РАН [16]. Пробы снега, собранные в 2 км к северо-востоку от Норильска, содержали 3800, а в 16 км — 45 мкг/л никеля. Концентрация меди во всех случаях была примерно в два раза выше. Такое же соотношение соблюдается и в аэрозолях Норильска. В осадках на СП-35 (несколько тысяч километров от Норильска) содержание никеля находится в пределах 30—240 мкг/л, а медь составляет от 1 до 26% от содержания никеля. Следовательно, и по тяжелым металлам преобладающий вклад Норильска не очевиден.

Комментируя возможность поступления загрязняющих веществ в Арктику, отметим, что Исландская и Алеутская депрессии, а также Азиатский максимум особенно развиты зимой (в январе) и, возможно, они способствуют ее сильному загрязнению. Алеутский минимум почти исчезает летом. Мощный Азиатский максимум (с центром в Монголии и вторичным образованием в Сибири) летом заменяется Азиатской (Сибирской) депрессией, при этом резко меняется направление потока воздуха. Исландский минимум относится к постоянно действующим и мощным центрам атмосферы, а его вторичные ложбины зимой обнаруживаются на картах погоды в Баренцевом море, однако число циклонов и антициклонов, поступающих отсюда в восточный сектор Арктики, не становится преобладающим [3].

Летом, как известно, все центры высокого давления располагаются над океаном с преобладающим переносом воздуха на континенты, и по их перемещению, оказывается, можно прогнозировать степень загрязнения атмосферы [9]. И это при том, что для антициклонов характерна хорошая погода.

Таким образом, можно заключить, что Арктический бассейн в определенных пределах служит прекрасным воздушным фильтром для Северного полушария, очищая атмосферу по одним компонентам и перераспределяя загрязнение воздуха — по другим. При этом невыясненными остаются



причины и возможность накопления в Центральной Арктике тяжелых металлов.

Предварительный анализ изменений химического состава осадков в арктической дымке обнаруживает их определенную связь не только с циркуляционными процессами, но и с температурой приземного слоя воздуха. Эта связь не так проста, как может показаться на первый взгляд. И ее рассмотрение может привести к совершенно неверным выводам. Основным источником противоречий — расхождение роли двух факторов: связи минерализации и влагосодержания с температурой в пределах одного пункта и связи в пункте (или районе) с глобальными изменениями температуры через атмосферную циркуляцию.

И наконец, еще одно немаловажное замечание. Учитывая значительные изменения тропопаузы в Арктике и наличие ее разрывов, можно предположить, что потери (от 65 до 90 единиц Добсона при норме 350) общего содержания озона в течение зимне-весеннего периода 2007 и 2008 гг. произошли в результате воздействия тропосферного загрязнения\*.

Из этого краткого обзора имеющихся данных очевидна настоятельная необходимость не только продолжить, но и организовать по специальной программе регулярные наблюдения за кислотностью и химическим составом атмосферных осадков на акватории Северного Ледовитого океана. ■

\* <http://www.ozone-sec.ch.cam.ac.uk>

## Литература

1. Дроздов О.А., Сорочан О.Г., Воскресенский А.И. и др. Характеристики влагооборота в атмосфере над склонами бассейна Северного Ледовитого океана // Труды ААНИИ. 1976. Т.327. С.15—34.
2. Прик З.М. Физико-географическое районирование Арктики. Ч.1. Л., 1967.
3. Чуканин К.И. Некоторые синоптико-климатические характеристики Арктики // Труды ААНИИ. 1965. Т.273. С.75—85.
4. Першина Н.А., Полищук А.И., Свистов П.Ф. К вопросу о закислении атмосферных осадков в Российской Арктике // Тр. ГГО. 2008. Вып.558. С.211—232.
5. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам / Под ред. О.Д.Бартеневой. Ч.1. Вып.9. Л., 1991.
6. Прохоренков А.М. Исследование путей переноса загрязненных воздушных масс в Арктику // Успехи современного естествознания. 2006. №4. С.73—77.
7. Цигельницкий И.И. Полярная дымка // Природа. 1987. №4. С.65—67.
8. Devasthale A., Will U., Karlsson K.-G., Jones C.G. Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles // Atmospheric Chemistry and Physics. Discuss. 2010. V.10. P. 2835—2858.
9. Holzworth G.C. A study of air pollution potential for the western United States // Journal of Applied Meteorology. 1962. V.1. P.366—382.
10. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: Справочные материалы / Под ред. Т.В.Гусевой. М., 2007.
11. Майстренко В.Н., Хамитов Р.З., Будников Г.К. Эколого-аналитический мониторинг супертоксикантов. М., 1996.
12. Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М., 1987.
13. Barrie L.A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere // NATO ASI Series. 1996. V.143. P.93—129.
14. Sbugui H., Dabe Q. Chemical characteristics of summer precipitation at Point Barrow, Arctic Alaska // Chinese Journal of Polar Science. 1997. V.8. №1. P.1—7.
15. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Oslo, 1998.
16. Шевченко В.Л. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М., 2006.

# Реинтродукция, репатриация, реставрация... и урбанизация

О.В.Беднова

Долгое время в прикладных исследованиях, касающихся охраны биологического разнообразия, в первую очередь уделялось внимание видам, или уже исчезнувшим в дикой природе, или тем, численность которых катастрофически сокращалась. При этом преследовалась цель сохранения видовой уникальной генетической информации и таксономического разнообразия как такового. Для восстановления исчезающих и редких видов начали разрабатывать технологии по искусственному разведению животных в неволе или размножению растений на специальных плантациях (разведение *ex situ*). Следующий шаг предусматривал восстановление популяций видов в естественных местообитаниях (реинтродукцию), или пополнение коллекций зоопарков и ботанических садов.

В настоящее время все больше и больше нарушенных природных и природно-антропогенных территорий нуждается в экологической реабилитации, т.е. в возвращении видовой полноценности обедненным биотическим сообществам — залогом устойчивости экосистем. Особенно важно решить такую задачу на урбанизированных территориях, где зачастую исчезают не только редкие (малочисленные), но и типичные виды лесных, луговых и других природных биотопов. К такому плачев-

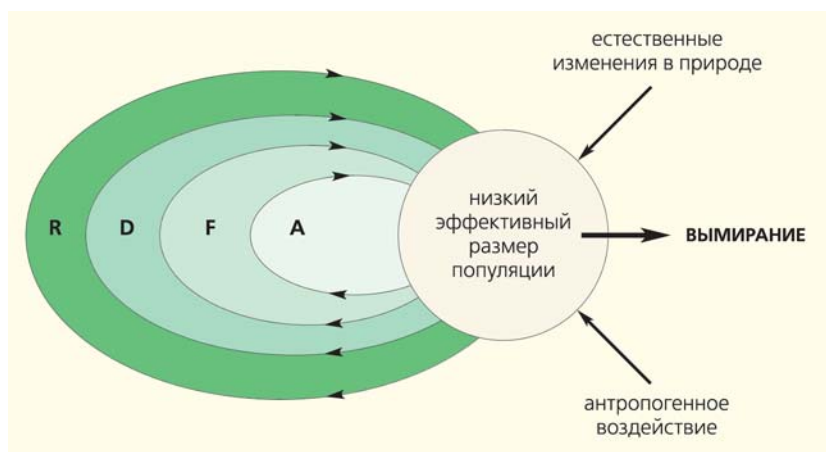


**Ольга Викторовна Беднова**, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и защиты леса Московского государственного университета леса. Область научных интересов — динамика лесных экосистем в урбанизированных условиях, сохранение биоразнообразия на городских особо охраняемых природных территориях.

ному результату приводят фрагментация и уничтожение местообитаний, загрязнение окружающей среды, подрыв кормовой базы, инвазии чужеродных видов.

В природе популяции сокращаются и исчезают из-за флуктуаций численности (они связаны с хищниками, конкуренцией, заболеваниями, природными катастрофами) и из-за утраты способности адаптироваться к изменившимся условиям окружающей среды в связи с уменьшением генетического разнообразия, родственным скрещиванием и дрейфом генов. Уменьшение размера популяции под воздействием одного из этих факторов повышает ее уязвимость в отношении остальных. Популяция оказывается вовлеченной как бы в вихревое движение, которое американские биоэкологи М.Гилпин (M.Gilpin) и М.Сулей (M.Soulé) назвали *вихрем вымирания* (extinction vortex), выделив в нем четыре механизма [1].

Сейчас работа по восстановлению численности видов, нуждающихся в охране, планируется на многих особо охраняемых природных территориях различных рангов, в том числе и городских. И в Москве восстановление видов, занесенных в Красную книгу, — обязательный пункт в целевых программах Департамента природопользования и охраны окружающей среды. В 2004 г. московское правительство приняло специальное постановление «О мероприятиях по восстановлению естественных растительных сообществ и увеличению численности редких животных на особо охраняемых природных территориях города Москвы»\*. Тогда для мегаполиса это было новым направлением природоохранной политики, и первые практические шаги натолкнулись на критику многих специали-



Вихри вымирания. R (reduction) — внешнее нарушение способствует уменьшению размера популяции; D (distribution) — численность популяции уменьшается из-за усиления пространственной неоднородности распределения особей при фрагментации подходящих местообитаний, темпы локального исчезновения увеличиваются; F (fitness) — при сокращении численности популяции уменьшается гетерозиготность и увеличивается скорость дрейфа генов, повышается степень инбредной депрессии и увеличивается генетический груз, что со временем ведет к вымиранию; A (adaptation) — увеличение генетического дрейфа и уменьшение генетического разнообразия снижают адаптивный потенциал популяции.

стов-биоэкологов. Так, недоумение вызывали план по восстановлению численности серой куропатки, ежей и зайцев или создание еловых насаждений в абсолютно неприемлемых условиях (например, на Воробьевых горах). Но еще парадоксальнее выглядело планирование «быстрых победоносных мероприятий» на фоне нарушенных местообитаний (или даже их отсутствия!) при явной диспропорции в финансировании не в пользу восстановления последних. Что-то из задуманного тогда удалось, что-то кануло в небытие, но страсти не утихают и по сей день. Так совместимы ли реинтродукция и урбанизация? Попробуем разобраться.

### Тонкости терминологии

Восстановить вид в природе — не значит просто вернуть животных или растения в принадлежащий им ареал. Речь идет о создании в природных биотопах устойчивых локальных популяций, способных поддерживать себя. Решение такой задачи предполагает внедрение долгосрочных и, как правило, дорогостоящих программ, результаты которых далеко не всегда могут оказаться успешными.

В современной прикладной биоэкологии появилось специальное понятие «технология восстановления и сохранения редких видов», подразумевающее комплекс специальных методов, операций, приемов, организационных мер и режимов работы, а также их последовательности [2]. Создание искусственных популяций в природных

биотопах — наиболее сложный вариант такой технологии, она чаще всего обозначается как *реинтродукция*. Впрочем, параллельно используется целый ряд терминов: *реакклиматизация*, *реставрация*, *репатриация*, *реституция*, *транслокация*, *восстановление* и даже *интродукция*. Отсутствие четкости в терминологии вносит определенные трудности в анализ ситуации в этой сфере.

В популярном в свое время «Словаре терминов, связанных с охраной живой природы» А.С.Яблокова и Н.Ф.Реймерса (1982) *реинтродукция* определена как «интродукция растений в места, где вид ранее обитал, а затем исчез, как правило, по вине человека». При этом отмечено, что для животных в подобном случае чаще употребим термин *реакклиматизация*. Тридцатилетний опыт создания искусственных популяций рас-

тений и животных показал, что здесь возможны разные сценарии. Во-первых, можно, как и определено в упомянутом словаре, возвращать виды в местообитания, из которых они исчезли. Во-вторых, создавать локальные популяции в пределах географического ареала там, где вид ранее не обитал, но со временем возникли условия для его «подселения» (например, в лесных культурах по мере формирования и усложнения в них лесной среды). В-третьих, можно усилить новыми жизнеспособными особями имеющиеся, но угасающие в природе популяции. Все три способа объединяет одно свойство — локальные искусственные популяции создаются в границах географического ареала вида. Это положение, пожалуй, наилучшим образом отражает терминология, предложенная отечественными ботаниками: *реинтродукция* — создание искусственных популяций вида в природных биотопах в границах его ареала; *репатриация* — создание популяций вида в местообитаниях, из которых он исчез; *реставрация* — восстановление угасающих (т.е. обреченных) популяций [3]. Поскольку репатриация и реставрация проводятся в природных биотопах в границах ареала вида, их можно считать частными случаями *реинтродукции*. К тому же сегодня этот термин в среде зоологов практически вытеснил термин *реакклиматизация*. Поэтому в статье будем использовать *реинтродукцию* как наиболее универсальный термин.

Чтобы восстановить популяцию вида, необходимо детально изучить его природные популяции; сформировать генетически репрезентатив-



ные выборки особей; подобрать подходящие местообитания в природе и вживить туда подготовленных особей (т.е. осуществить реинтродукцию); наконец — проводить мониторинг состояния популяции, по результатам которого принимать решения о дальнейших действиях.

Каждая позиция этой программы может определить успех или провал мероприятия. Но мы подробнее остановимся на формировании репрезентативной выборки для реинтродукции. Практика показала, что экологически наиболее эффективно возвращать в природу резерв, выращенный на основе природного материала в специальных питомниках (т.е. схема: природная популяция — размножение в культуре — возвращение в природу). Но можно и перемещать особей из одной точки видового ареала в другую, иначе говоря, создавать своего рода «дочернюю популяцию» в новом месте. Например, переселить рыжих лесных муравьев для защиты леса от вредителей (это так называемое внутриареальное расселение энтомофагов). Усилить угасающую местную популяцию можно за счет «подселения» представителей другой — географически отдаленной, но процветающей. Так, южноподмосковную популяцию бобра восстановили с помощью животных из Белоруссии и из Воронежского заповедника.

Среди ботаников предварительное культивирование растений для последующего «вживления» в природу называют *реинтродукцией через интродукцию*,



Обитатель тенистых широколиственных лесов лунник оживающий (*Lunaria rediviva*) в природно-историческом заповеднике «Горки». Участки леса с преобладанием в травяном покрове осоки волосистой (*Carex pilosa*) или малины (*Rubus idaeus*) оказались благоприятными для развития искусственных популяций этого вида.

Здесь и далее фото автора

а альтернативный вариант (из природы в природу) — *реинтродукцией без интродукции*. Очевидно, что из-за минимального ущерба для природной популяции у первого варианта больше преимуществ. Но еще важнее, что в ходе предварительного размножения в культуре можно повысить генетическое разнообразие особей, усиливающее адаптационные возможности вселяемой в природу популяции. Например, для улучшения посадочного материала в питомнике природно-исторического заповедника «Горки» создали коллекцию редких видов растений из удаленных друг от друга подмосковных популяций [4]. В итоге, собранные в условиях питомника семена и выращенная из них рассада обладали большим генетическим разнообразием вида в пределах региона.

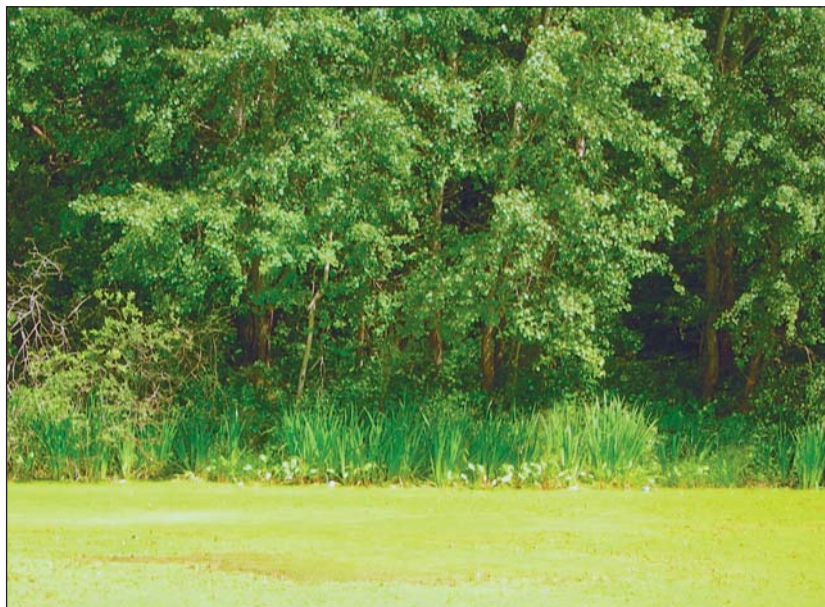
Но вернемся к реинтродукции на городских особо охраняемых природных территориях. В Москве и во многих крупных городах России соответствующим «испытательным полигоном» чаще всего служат сохранившиеся участки городских лесов, природного каркаса города.

### Как восстанавливают охраняемые виды растений

К настоящему времени накоплен богатый опыт в получении искусственных популяций дикорастущих растений [5]. При их создании преследуются разные цели: обогащение природных ресурсов хозяйственно-полезными видами; оптимизация видового состава агроценозов; рекультивация нарушенных земель и, конечно же, — восстановление генофонда редких и исчезающих видов. В 2000 г. была утверждена Международная программа ботанических садов по охране растений. В нее включена реинтродукция редких и эндемичных видов наряду с сохранением растений в естественной среде обитания (*in situ*) и с ботаническими коллекциями (*ex situ*). Их рассматривают как резерв исчезающих видов, растительный материал для реинтродукции.

Уже получено много полезной информации по созданию интродукционных популяций в ботанических садах и специальных питомниках. Так, в Главном ботаническом саду РАН (ГБС) испытано около 400 редких и исчезающих видов природной флоры. Большинство растений приспособились к новым условиям существования, прошли полный цикл развития побегов, сохранили природный или близкий к нему темп онтогенеза. Сегодня в коллекции ГБС более 50 видов из Красной книги Российской Федерации [6].

Но интродукционная популяция сама по себе не дает полной гарантии спасения вида. При всех описанных преимуществах предварительного разведения растений есть и опасность нежелательных побочных эффектов. Дело в том, что при длительной клоновой интродукции в растениях



Жизнеспособная искусственная популяция ириса айровидного (*Iris pseudo-corus*), известного как ирис желтый, в пруду Сьяновского лесопарка. Главные условия его успешного развития — слабое затенение (или его отсутствие) и незначительные рекреационные нагрузки [4].

происходят генетические изменения — эрозия\*, инбридинг, гибридизация, сознательный и бессознательный искусственный отбор. В итоге можно получить выборку, генетически отличную от природных популяций, а ее реинтродукция может иметь непредсказуемые экологические последствия. Чтобы избежать их, необходим генетический контроль.

К сожалению, перевод исследовательских работ на путь тендеров и хоздоговоров привел к тому, что в стремлении к быстрому результату реинтродукция превратилась в простой перенос растений из вроде бы благополучных местообитаний туда, где вид стал редким или исчез. Появилось много частных питомников, сделавших краснокишечные виды предметом коммерции, и говорить в этом случае о целенаправленном мониторинге реинтродукции не приходится. А тем временем бесконтрольная реинтродукция по своим возможным негативным последствиям может принести комплекс проблем, с которыми мы столкнулись в результате направленной интродукции чужеродных (адвентивных) видов. Сотрудники ГБС подчеркивают: «...Попытки непродуманного расселения растений ведут к размыванию закономерностей естественного типа расселения видов в пределах ареала. Происходит “засорение” природных сообществ и аборигенных популяций чужеродным генофондом...» [7]. Специфические проблемы возникают и на этапе создания популяции в при-

родных местообитаниях. Есть ряд исследований в области реинтродукции растений, благодаря которым мы имеем представления о технологических приемах создания искусственных популяций в природных биотопах, закономерностях успеха или, напротив, о причинах неудач.

Так, с 1982 г. В.Л.Тихонова и ее ученики наблюдают за состоянием искусственных популяций охраняемых видов растений в лесопарках Москвы и Подмосковья. Семенной материал (и только в исключительных случаях — выкопанные растения) для культивирования в питомниках (их было четыре) собирался из обособленных друг от друга подмосковных популяций. Для каждого вида подбирались оптимальные режимы выращивания. Так было получено свыше 160 искусственных популяций травянистых растений:

купальницы (*Trollius europaeus*), ириса (*Iris pseudo-corus*), гвоздик (*Dianthus versicolor*, *D.superbus*), колокольчиков (*Campanula persicifolia*, *C.latifolia*, *C.trachelium*) и др. Сегодня на территории природно-исторического заповедника «Горки» в естественных растительных сообществах существует около 100 искусственных популяций, созданных на основе материала, полученного в специализированном питомнике [4].

Успешным можно признать восстановление местной угасающей естественной популяции печеночницы обыкновенной (*Hepatica nobilis*) в лесопарковой зоне г.Киржача. В настоящее время искусственная популяция имеет полную возрастную структуру с преобладанием молодых генеративных особей, семенная продуктивность растений не отличается от таковой у особей из природных популяций в аналогичных условиях [4].

Еще в 70—80-х годах в Московской обл. проводились работы по возвращению лесной флоры в места, где она исчезла. В эксперименте использовали более 100 видов растений. Их семена высевали в специальном коллекционном питомнике опытного лесничества в Серебряном бору. Выращенные там растения или полученные от них семена высевали (высаживали) в лес, подбирали оптимальные способы подготовки почвы; в ряде случаев прореживали подлесок [8]. Благодаря выбору агротехнического режима и биогеоценотических условий сформировались микропопуляции ветреницы дубравной (*Anemone nemorosa*), которые не только сохранились к настоящему времени, но и продолжают распространяться.

\* Генетическая эрозия — утрата отдельных генов и их комбинаций.



Хотя не все испытанные в ходе эксперимента виды удалось вернуть в прежние местообитания, результаты многолетней работы привели к важному выводу: неуспех репатриации может быть связан с сукцессионными изменениями в биоценозе, произошедшими со времени исчезновения из него вида. Так, в течение 10 лет велись наблюдения за искусственной популяцией медуницы узколистной (*Pulmonaria angustifolia*), внедренной в лещиновый чернично-разнотравный сосняк. Применение разных способов агротехники внесения растений, подготовки почвы, подбора светового режима и фитоденотического окружения, определило самый результативный вариант — глубокую перекопку почвы и удаление подлеска. При этом всходы давали генеративные побеги, формировались нормальные микропопуляции, а муравьи, разносящие семена, способствовали распространению растений. Но затем под натиском возобновляющегося подлеска и других травянистых видов медуница исчезла — изменившийся фитоценоз «возвращенца» не принял [4]. Не увенчался успехом и эксперимент по переносу типичных для широколиственных лесов растений из малонарушенной дубравы в городской лесопарк: на участке дубового леса под воздействием рекреации сформировался густой злаково-разнотравный травяной покров, в этих условиях не прижилась даже сныть [9]. Итак, подытожим:

— сбор материала для реинтродукции в естественных условиях может нанести ущерб природным популяциям. Эту опасность минимизируют специальные питомники, в которых на основе материала из удаленных природных популяций выращивается искусственная. При этом усиливается генетическое разнообразие особей, что ведет к повышению адаптивности и жизнеспособности будущей популяции;

— при выборе конкретного вида для возвращения в прежние местообитания необходимо учитывать произошедшие там сукцессионные изменения произрастания: сообщество может необратимо измениться со времени исчезновения вида;

— реинтродукцию можно считать успешной только тогда, когда образовалась популяция с нормальной онтогенетической структурой: от всходов до взрослых генеративных особей, продуцирующих жизнеспособные семена. Результаты длительного мониторинга позволяют учитывать и исправлять ошибки, вырабатывать адекватные рекомендации.



Весенний эфемероид хохлатка плотная (*Corydalis solida*), занесена в Красную книгу города Москвы. Еще два года назад растения этого вида можно было обнаружить в липняке по правобережному склону вдоль реки Сетунь в Матвеевском лесу. Сейчас популяция угасла. По верхней части крутого склона, где и встречались островки хохлатки, проходила старая стихийная тропа. Багоустройство территории усугубило ее исчезновение: лестницу с беседкой наверху оборудовали как раз там, где и была сосредоточена основная часть растений.



Лесные весенние эфемероиды в «Аптекарском огороде» ботанического сада МГУ — резерв для реинтродукции.



Поскольку в сохранившихся биотопах города видовой состав чаще всего обеднен, то для успешной реинтродукции в них, видимо, потребуются специальные меры по формированию необходимой фитосреды, в крайнем случае — реконструкция утраченного биогеоценоза. Здесь наряду со знаниями биоэкологических особенностей вселяемого вида необходима тщательная предварительная оценка биотопа. Нужно выявить степень сохранности естественной среды, прогнозировать сукцессионные изменения и тенденции в динамике рекреационной нагрузки. Иначе в лучшем случае получим недолговечную клумбу из видов, занесенных в Красную книгу.

### А с животными — еще сложнее

Достаточно вспомнить, что первая Красная книга — «Красная книга Международного союза охраны природы» («Red Data Book»), вышедшая в 1963 г., посвящена именно животным. В силу этого их разведение в зоопарках и зоопитомниках, и их реинтродукция имеют сегодня более серьезное правовое обеспечение. К важнейшим нормативно-законодательным документам относятся Конвенция о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой исчезновения», Конвенция о биологическом разнообразии, а также законы Российской Федерации «О животном мире» и «Об охране окружающей среды».

Схема создания искусственных популяций животных по сравнению с растениями имеет свою

специфику. Ведь здесь значительно сложнее обеспечить генетическую репрезентативность выборки для реинтродукции, особенно — крупных млекопитающих и птиц. Во-первых, в силу их биологических особенностей трудно получить генетически разнообразную выборку особей-основателей. Во-вторых, при выращивании животных в неволе действует целый комплекс генетических факторов (последствия ненаправленного отбора, инбридинга и быстрой доместикиации), велика опасность отклонений в поведении, что впоследствии может привести к высокой смертности и плохому размножению животных, выпущенных в природу. Поэтому их подготовка требует специального воспитания, исключающего привыкание к человеку, обеспечивающего навыки добывания пищи и другие возможности адаптации к самостоятельной жизни в природе [2].

При реинтродукции животных очень важен прогноз возможного влияния новой популяции на экосистемы, в которых она на первых порах будет своего рода чуждым звеном. Риск отрицательных экологических последствий здесь можно сопоставить с результатами непродуманной интродукции животных. Таких примеров в истории природопользования предостаточно.

Международной группой по реинтродукции при МСОП по результатам мониторинга популяции выработаны следующие критерии оценки эффективности программ по вселению животных: *failure* — проект провалился, животные исчезли; *partially successful* — частично успешен, регистрируется хотя бы одно животное; *successful* — успешен, регистрировали несколько особей; *highly successful* — очень успешен, регистрируется потомство [10].

В урбанизированных условиях обеднение структуры и фрагментация местообитаний, а также факторы беспокойства хотя и ограничивают реинтродукцию животных, но в ряде случаев она экологически необходима. В Москве возвращение в природу охраняемых видов животных началось в 2004 г. Первыми выпустили ушастых сов и белок. Относительно недавно в СМИ появились сообщения, что на присоединенных к Москве территориях планируются специализированные центры для реинтродукции диких животных, исторически обитавших в границах существующего лесопаркового пояса и способных создать устойчивые популяции в современных условиях. Однако надо понимать, что такой подход требует не освоения



Кормушки для зайцев в Троекуровском лесу так и простояли в течение нескольких лет с нетрнутым сеном.

денежных средств и пиара, а адекватной оценки состояния местообитаний, кормовой базы, учета перспектив для жизни новых популяций. Как показательный пример вспомним акцию по выпуску зайцев-русаков и зайцев-беляков в Троекуровский лес. Никаких последствий этого мероприятия, кроме нетронутых, заполненных гниющим сеном кормушек, не осталось. Это и неудивительно: ни площадь лесного массива (около 15 га), ни его внутренняя структура (отсутствие больших полей), ни его местонахождение между двумя крупными автомагистралями не отвечают биоэкологическим требованиям этих животных. И, конечно же, нет ни результатов мониторинга популяции, ни... самих зайцев.

Опыта по реинтродукции животных на урбанизированных территориях, видимо, еще мало. Большинство таких международных и отечественных программ связано с видами, пострадавшими от чрезмерного истребления [11]. К примеру, воссозданы популяции зубра, белого орикса, американского журавля, гавайской казарки, нескольких видов фазанов, сирийской чесночницы, лошади Пржевальского.

Немало в мире попыток восстановления численности хищных птиц как наиболее уязвимой группы животных, для которых прямое уничтожение — лишь один из факторов сокращения численности. Человек принес в их жизнь и отравление пестицидами, и дефицит пищи, и повышенную гибель в антропогенных ландшафтах от технических устройств, и сокращение числа мест для устройства гнезд, и беспокойство. Посему так много хищных птиц на страницах красных книг всех рангов. Городская среда для хищных птиц — узел сосредоточения всех бед, но и здесь их реинтродукция возможна. Так, в Москве в рамках совместной программы «Русского соколиного центра» Всероссийского научно-исследовательского института охраны природы и питомника «Сапсан» предпринята серия выпусков (первый в 1996 г.) птенцов сапсана, воспитанных в питомнике и подготовленных к самостоятельной жизни. У выпущенных в природу птиц сформировались стереотипы поведения, свойственные диким особям, соколы обустроились на московских высотах, успешно адаптируясь к жизни в мегаполисе, возвращаются с зимовки из Южной Африки. После длительного перерыва этот вид вновь гнездится в Москве. Есть ряд публикаций, содержащих обоснование этой



Черная белка в Фили-Кунцевском лесопарке. Возможно, она сама или ее предки представители североамериканского вида *Sciurus niger*.

программы для условий московской агломерации и отражающих ход эксперимента на всех фазах реинтродукции [12].

Для восстановления и сохранения биоразнообразия на урбанизированных территориях ценен и опыт по реинтродукции охотничье-промысловых животных. Так, разработки по технологии выпуска белки обыкновенной для обогащения охотничьих угодий легли в основу популярных для рекреационных территорий мероприятий по разведению и выпуску этого зверька [13]. Сейчас



Бельчатник в одной из московских зон отдыха. Выращенных в нем животных выпускают в природу.



в Москве бельчатники установлены в зонах отдыха и их обитатели радуют горожан. Белок стало заметно больше, можно даже встретить и подвидовых представителей отдаленных географических популяций или даже гибридные формы. Но о состоянии таких реставрированных популяций, к сожалению, ничего неизвестно, хотя, вероятно, наблюдения и проводятся. А ведь кормовые пристрастия белки чрезвычайно универсальны и, следовательно, экологический эффект распространения этого грызуна предсказуем далеко не всегда. Одна только предрасположенность к разорению гнезд мелких воробьинообразных чего стоит.

### И все-таки городу это нужно

В городе главной ареной для реинтродукции, безусловно, должны быть особо охраняемые природные территории. Создание жизнеспособных локальных популяций растений и животных из числа видов зонального биоразнообразия, способных нормализовать экологические процессы в некогда нарушенной экосистеме, можно рассматривать как индикатор экологически верных решений.

Последнее чрезвычайно актуально в приложении к проектам по экологической реабилитации участков городской территории, в том числе и в границах природных парков и заказников. Но в реальности все не без проблем...

Дело в том, что специалисты по городскому ландшафтному проектированию и биоэкологи неоднозначно трактуют содержание восстановительных мероприятий по экологической реабилитации. И если для общественно-деловых и промышленных зон города это различие малозначительно, то для особо охраняемых природных территорий оно принципиально.

Так, известный английский эколог Р.Примак определил экологическую реабилитацию как «восстановление по крайней мере некоторых функций экосистемы и некоторых прежних доминирующих видов» [14]. Проектировщики же рассматривают экологическую реабилитацию исключительно как фундамент для благоустройства и озеленения. В одной из специальных статей [15] говорится о целях экологической реабилитации: «...не меняя первоначального ландшафтно-визуального облика природного объекта, приостановить действие тех негативных природных процессов и явлений, которые в настоящее время там наблюдаются; обеспечить комфортный доступ к реабилитированным территориям и их потребительское качество. Кроме того, экологическая реабилитация подразумевает разработку перечня мероприятий, направленных на улучшение декоративных качеств и фитопатологического состояния растительного покрова, а также на повышение устойчивости охраняемого природного образования к рекреационным нагрузкам».

На первый взгляд вроде и нет кардинальных различий в понимании сути экологической реабилитации обеими сторонами: с помощью инженерных и биотехнологических мер нарушенный участок земной поверхности физически улучшен, и ему возвращены экологически эффективные функции. Но для особо охраняемых территорий ставка только на повышение их потребительских качеств вряд ли отвечает природоохранным целям, даже если речь идет о так называемых прогулочных зонах. Они, в отличие от объектов городского озеленения, должны, с одной стороны, взять на себя основную часть рекреационной нагрузки, а с другой — служить буфером и экологическим коридором между преобразованной территорией и сохранившимися ядрами биоразнообразия (особенно это касается долин малых рек).

Замечательно, если экологическая реабилитация в конечном итоге завершится согласованностью между благоустройством и живой природой. Однако пока позитивных примеров немного, и на особо охраняемых природных территориях «лидирует» дорогостоящее, но экологически необоснованное преобразование, вызывающее не только критику со стороны биоэкологов, но и протесты населения.

Приведем пример того, как эффективно могут дополнять друг друга восстановительные и природоохранные мероприятия. На городских особо охраняемых природных территориях руды и участки долин малых рек не только зрительно определяют рекреационную привлекательность территории, но и служат эпицентрами видового разнообразия. Поэтому экологическая реабилитация водоема (или экологическая реставрация, если он полностью деградировал) не должна сводиться только к его очистке и благоустройству прилегающей территории. Здесь важно обеспечить существование разнообразного сообщества его обитателей, поддерживающих устойчивость водоема как экосистемы. Надежный индикатор экологического состояния территории — земноводные животные, способные существовать при относительно постоянных условиях и отличающиеся сложным жизненным циклом. А он зависит от состояния не только водного местообитания, но и окружающего биотопа (рельефа берега, типа почвы, видового состава растительности). Создание жизнеспособной локальной популяции земноводных в водоеме можно рассматривать и как завершающий этап экологической реабилитации, и как индикатор успешности природоохранных мер.

Известны результаты эксперимента по реставрации обыкновенного тритона (*Lissotriton vulgaris*) на территории усадьбы Знаменское-Садки, откуда вид давно уже исчез [16]. Начало новой жизнеспособной популяции дали личинки, отловленные в местах искусственного размножения (прием



реинтродукции через интродукцию). Предварительно пруд обследовали на предмет заселенности опасным хищным инвазивным видом — ротаном-головешкой (*Perccottus glenii*), ставшим одной из причин видовой обедненности московских водоемов. К счастью, ротан отсутствовал. Исследователи провели небольшую расчистку водоема, сохранив на прибрежной территории естественную растительность, лесную подстилку и небольшие скопления валежника. Последнее важно для миграции животных в середине лета в сухопутные места, где они будут кормиться червями, многоножками, почвенными насекомыми и находить укрытия для зимовки. В результате животные прижились и успешно размножаются. В окультуренном же водоеме с отвесными берегами, укрепленными столь популярными сейчас сетчато-металлическими конструкциями (габионами), с тротуарами и английским газоном по периметру реинтродукция земноводных была бы безуспешной, а экологическая реабилитация водоема как природной экосистемы — неполноценной.

В Москве реализуемые проекты по экологической реабилитации связывают исключительно с водоемами и прибрежными территориями. Хо-

тя они не менее актуальны и для лесных и луговых фрагментов особо охраняемых территорий, причем исключительно в биоэкологической трактовке, подразумевающей восстановление некоторых функций экосистемы и некоторых прежних доминирующих видов. Если к посадке деревьев и кустарников в этом случае подходить не только как к мероприятию по озеленению (а именно это преимущественно и происходит на практике), а как к лесоводческому проекту, то получится, что решать задачу улучшения экологически полезных функций территории надо как раз посредством **реинтродукции**. И речь здесь идет о восстановлении не редких и исчезающих видов, а аборигенных древесно-кустарниковых пород. Для успешного восстановления популяций нужно сажать деревья и кустарники на подходящих почвах, с необходимым режимом увлажнения и освещенности (на языке лесоводов — с учетом типа условий местопрорастания). А дальше можно подумать и о реинтродукции редких трав и животных. Но, возможно, этого делать и не придется: восстановленное местообитание самостоятельно станет центром биотического притяжения. ■

## Литература

1. Gilpin M.E., Soulé M.E. Minimum Viable Populations: Processes of Species Extinction // Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity / M.E.Soulé. Sunderland, 1986. P.19—34.
2. Технологии сохранения редких видов животных // Материалы научной конф. 21—23 ноября 2011 г. М., 2011.
3. Тихонова В.Л. Реинтродукция охраняемых видов растений: проблемы, термины, методические подходы // Вопросы охраны редких видов растений и фитоценозов. М., 1987. С.45—53.
4. Восстановление и мониторинг природной флоры / Под ред. Б.Р.Стригановой и А.А.Маслова. М., 2010.
5. Горбунов Ю.Н., Дзыбов Д.С., Кузьмин З.Е., Смирнов И.А. Методические рекомендации по реинтродукции редких и исчезающих видов растений (для ботанических садов). Тула, 2008.
6. Трулевич Н.В. Интродукция растений природной флоры в отделе флоры ГБС РАН // Ботанические сады в современном мире: теоретические и прикладные исследования (Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 80-летию со дня рождения академика Л.Н.Андреева). М., 2011. С.659—662.
7. Кузьмин З.Е., Швецов А.Н. Переселение растений и экологическая безопасность // Ботанические сады в современном мире: теоретические и прикладные исследования. М., 2011. С.381—383.
8. Рысина Г.П. Опыт восстановления популяций охраняемых растений в Подмосковье // Бюл. Гл. ботан. сада. АН СССР. Вып.133.1984. С.81—85.
9. Полякова Г.А., Меланхолин П.Н. Травянистые растения в городских парках и лесопарках // Материалы XIV международной конференции «Проблемы озеленения крупных городов». М., 2011. С.144—147.
10. Global Re-introduction Perspectives: 2013. Further case-studies from around the globe / P.Soorae. Gland, Switzerland, 2013.
11. Флинт В.Е. Сохранение редких видов в России (теория и практика) / Сохранение и восстановление биоразнообразия. М., 2002. С.7—58.
12. Сорокин А.Г., Бородин А.И., Михайлова Н.Н. Реализация программы реинтродукции сапсана (*Falco peregrinus peregrinus*) в Москве // Хищные птицы и совы в зоопарках и питомниках. Вып. 20. М., 2011. С.70—85.
13. Карпунин И.П. Техника выпуска белок в зеленую зону городов // Акклиматизация охотничьих животных в СССР. Тез. докл. III Всесоюзного семинара-совещания по акклиматизации и реакклиматизации охотничьих животных. Минск, 1978. С.151—153.
14. Примак Р. Основы сохранения биоразнообразия / Пер. с англ. М., 2002.
15. Кузнецова Г.Ю. Экологическая реабилитация: новый подход к решению проблем благоустройства и озеленения крупных городов // Технологии строительства. 2003. №4. С.12—13
16. Семёнов Д.В. Пруды Москвы ради горожан и... ради лягушек // Природа. 2010. №2. С.27—35.

# Античные древности Анапы История Горгиппии

Е.М.Алексеева



Полихромные флаконы из глухого стекла с накладными стеклянными нитями, формовка на песчанистом сердечнике. Работа мастерских Сирии, Финикии, Египта. Погребение некрополя раннего греческого полиса на месте Анапы. VI—V вв. до н.э.

Фотографии предоставлены Институтом археологии РАН

**А**напа — один из курортных городов на черноморском побережье Северного Кавказа в Краснодарском крае. Центр Анапы перекрыл античный город Горгиппию. Его история воссоздается на материалах археологии, античные авторы только упоминают этот город. С 1950 по 2000 г. в Горгиппии проводила археологические раскопки Анапская экспедиция Института археологии АН СССР (с 1993 г. — РАН). За время работ экспедиции исследованы особенности градостроительства и архитектуры, организация общественной жизни, культовые предпочтения, изменения в направлениях торговли, быт, ремесла, погребальный обряд и многие другие аспекты жизни этого крупного древнего центра. По результатам работ экспедиции в Анапе создан специализированный археологический музей-заповедник с экспозицией под открытым небом участка древнего города на месте наиболее результативного раскопа. Многовековое развитие Горгиппии происходило в постоянном взаимодействии с оседлыми земледельческими и кочевыми племенами, которые постоянно менялись в причерноморских, нижнедонских и прикубанских степях. Город был активно вовлечен в исторические процессы, развивавшиеся в Средиземноморье — в Греции, государствах Малой Азии, Ближнего Востока, а затем и Римской империи.

Хочу вернуться к самой яркой находке в Анапе, о которой я писала в журнале «Природа» (1976. №3. С.30—35), информируя об этом неординарном открытии. Только сейчас начали поступать из реставрации так давно открытые нами фрески, и хочется представить общественности исследованный комплекс. Он был отмечен ЮНЕСКО в числе выдающихся открытий 1975 г. наравне с обнаруженным в Китае в тот же год «терракотовым войском». В 1975 г. экспедиция исследовала два склепа, расположенных в непосредственной близости друг к другу. Один, каменный, с тремя саркофагами внутри, целиком ограблен в древности, но стены его сохранили удивительные фрески. Соседний склеп с двумя саркофагами вырублен в скале и засыпан после совершения погребения рушенным скальным грунтом, он уцелел непо потревоженным. В нем стояли два саркофага, выпиленные из целой глыбы известняка, в одном похоронен мужчина, в другом — две девочки. Захороненных в этом склепе сопровождал неординарный погребальный инвентарь с золотыми, серебряными и художественными предметами. В 1976 г. рядом с дромосом склепа с фресками была откры-



**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.

та вырытая в скале гробница, перекрытая массивной плитой. Хотя она была ограблена еще в древности, отдельные предметы погребального инвентаря в ней уцелели. Все три погребальных сооружения прежде перекрывала курганная насыпь, снивелированная при строительстве современной Анапой. Открытые усыпальницы принадлежали одной знатной семье города. Коллекции переданы в Анапский археологический музей-заповедник «Горгиппия».

Мной подготовлен цикл из двух статей об античных древностях Анапы для журнала «Природа». В первой статье приводятся краткие исторические сведения о городе, который мы раскапывали, и о государстве, в котором он развивался непрерывно восемь столетий. Во второй статье дан подробный рассказ об открытии 1970-х годов и интерпретация изображений на фресках. Обе статьи иллюстрируются фотографиями интереснейших находок, сделанных в ходе раскопок.

## Город ионийских греков

Ионийские греки основали полис на берегу Анапской бухты в середине VI в. до н.э., чему предшествовали их ознакомительные мореплавания на рубеже VII—VI вв. до н.э. Греки называли холодное Черное море Понтом Аксинским (морем Негостеприимным), но спустя некоторое время, оказавшись на плодородных землях и около полных рыбы акваторий, переименовали его в Понт Эвксинский (море Гостеприимное). Освоение греками северных берегов Черного моря стало частью единого исторического процесса — так называемой «великой греческой колонизации», — охватившего бассейн Средиземноморья в VIII—VI вв. до н.э. В эти столетия греки из привычных мест обитания (с юга Балканского полуострова, с островов Эгейского моря и с западного побережья Малой Азии) расселялись и основывали полисы в прибрежной зоне всего Средиземноморского бассейна — от Сирии до Испании, от побережья

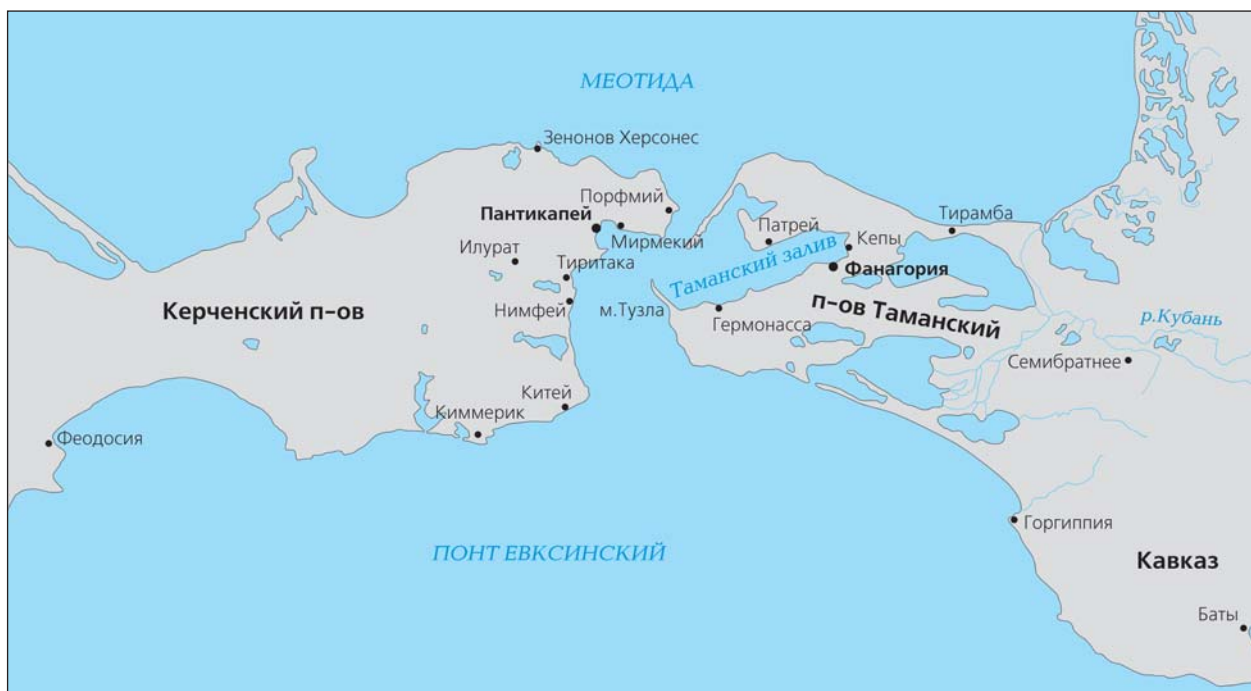


Северной Африки до северных берегов Черного моря. Античная колония не была колонией в привычном для нас смысле слова. Переселенцы сохраняли устойчивые связи с метрополией, но новый город в организационной и прочих сферах деятельности был полностью независим. Основанный таким образом полис эллины называли апойкией — домом вдали от дома. К началу освоения греками северных берегов Черного моря все свободные земли в Средиземноморье были уже заняты, поэтому расселение распространилось теперь уже и на дальние берега. В настоящее время исследователи рассматривают феноменальное переселение греков как многогранный процесс, обусловленный развитием самой формы социально-экономической и политической организации древнего греческого общества — полиса, замкнутой гражданской общины, базировавшейся на земледелии.

Первые 150 лет полис на месте Анапы, подобно множеству соседних, развивался как независимый город-государство [1]. Первоначально он был окружен рвом, который в V в. сменила каменная стена шириной 2,5 м. С востока к стене примыкал некрополь, за ним лежала полисная хора — земли, кормившие население. В момент появления греков местное население обитало в некотором отдалении от морского побережья. Античные авторы население Прикубанья называли меотами, определяя этим собирательным термином группы оседлых племен, занимавшихся земледелием и находившихся на стадии разложения первобытно-общинных отношений (многочисленные племена

имели свои названия, известные грекам). По мнению исследователей, греческое поселение на месте Анапы было основано на землях племени синдов и оттого именно оно могло называться Синдской гаванью, многократно упомянутой древними авторами в описании мореплаваний. Эпиграфического подтверждения этому названию в Анапе пока не найдено, но крупный ранний полис археологи обнаружили и исследовали.

Греческие полисы, основанные в западной части Северного Причерноморья — Тира (Днестровский лиман), Ольвия (Бугский лиман), Херсонес (Севастополь), — веками развивались как демократические рабовладельческие республики, власть в которых принадлежала всем гражданам, объединенным в гражданскую общину. Города-государства (полисы) по обе стороны Керченского пролива — Феодосия, Нимфей, Тиритака, Пантикапей, Мирмекий, Порфмий в восточном Крыму и Патрей, Гермонасса, Фанагория, Кепы, Тирамба на Таманском п-ове — на рубеже V и IV вв. до н.э. начали объединяться под эгидой полиса Пантикапея (современная Керчь), создав первое на территории нашей страны государственное образование — тираническую державу Боспорское царство. Одну из главных причин такого объединения исследователи видят в необходимости противостоять скифской угрозе. На рубеже VI и V вв. до н.э. Великая Скифия представляла собой могучее образование. После победы над войском персидского царя Дария I в 512 г. до н.э. скифы направляют свою экспансию в сопредельные страны — покоряют земледельческое насе-



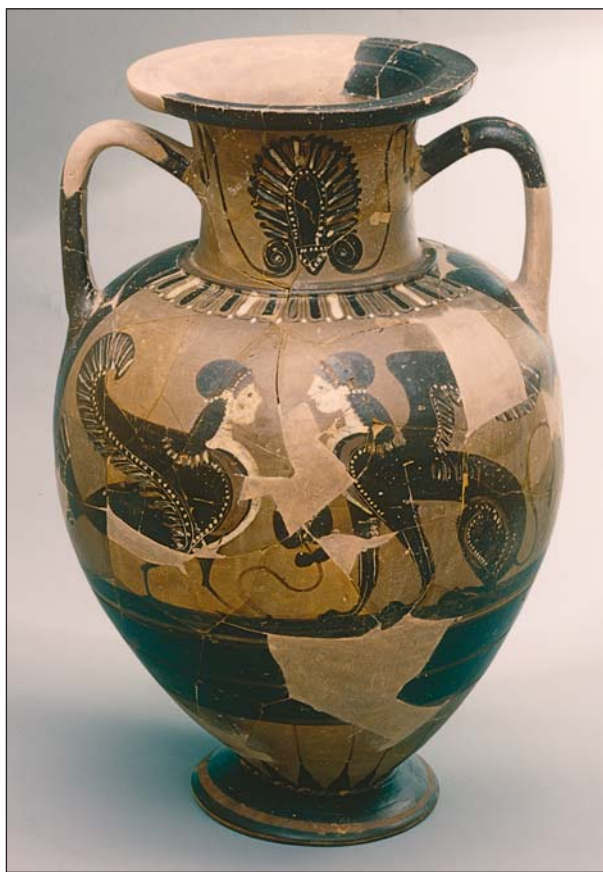
Основные города Боспорского царства.

ление лесостепи и двигаются в юго-западном направлении в сторону Фракии. В V в. до н.э. скифы и фракийцы достигли состояния политического равновесия, установив границу по Нижнему Дунаю. После этого скифская экспансия повернула на юго-восток, став угрозой для причерноморских полисов.

### Боспорское царство

Процесс формирования Боспорского государства занял не одно столетие [2, 3]. Многие полисы включались в консолидацию насильно. Первые 42 года объединение возглавлял знатный греческий род Археанактидов, правивший в Пантикапее. В 438 г. до н.э. власть перешла к династии Спартокидов. У ее членов исследователи выявили как греческие корни, так и родственные связи с фракийским царским домом. Спартокиды правили 330 лет. Основа экономики Боспора в этот период, как и во все последующие времена, — зерновое земледелие и морская торговля зерном и рыбой из акваторий Нижнего Дона и Азовского моря (Меотиды). Основным торговым партнером Боспора в период правления ранних Спартокидов были Афины. Чтобы обеспечить потребности зернового экспорта, Спартокиды вели широкую завоевательную политику вначале в отношении полисов, обладавших земельным потенциалом (Феодосии и Нимфеи), а затем и среди соседних племен, прежде всего в Прикубанье. Титулатура боспорских царей отражает процесс расширения государства. Присоединение плодородных земель Синдики (т.е. земель племени синдов) в долгой и упорной борьбе завершил Горгипп — брат и соправитель боспорского царя Левкона I. Около середины IV в. до н.э. полис на месте Анапы стал называться в его честь. Название Горгиппии подтверждено находками в Анапе монет, клейм и надписей с именем города. Периодом первого расцвета Горгиппии стали IV и начало III в. до н.э., это совпало с процветанием всего Боспора.

Во все периоды развития государства статус Горгиппии — как крупного портового города, лежащего на плодородных землях (житнице государства) вблизи всегда беспокойных и отвоеванных у степняков границ — был выше многих его центров. В ранний период (первая половина IV в. до н.э.) с городом была связана деятельность Горгиппа. 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 Пантикапее и Фанагории, а также Горгиппии. Попечением царя Савромата I (93—123 гг. н.э.) расширяются городские укрепления, а царь Савромат II (174—210 гг. н.э.) пожертвовал причитающийся ему пошлинный сбор в гавани на строительство городского



Столовая амфора из Клазомен (ионийского полиса на западном побережье Малой Азии); чернофигурная роспись — сирена и сфинкс. Слой пожара в доме раннего греческого полиса на месте Анапы. Середина VI в. до н.э.



Дно килика с чернофигурной росписью — лик горгоны Медузы. Культурный слой раннего греческого полиса. VI в. до н.э.



Итальянский краснофигурный кратер (сосуд для смешивания вина с водой в застольях, использован в качестве погребальной урны). Роспись на дионисийские мотивы: силены с музыкальными инструментами, танцующие менады с тамбурином и пальмовой ветвью. Некрополь раннего полиса. Конец V в. до н.э. (слева). Чернолаковая гидрия из разрушенного подкурганного захоронения в Анапе. V в. до н.э.

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 специально назначавшимися царем наместниками.

Восточными соседями скифов, согласно античной литературной традиции, были ираноязычные кочевые племена, близкие скифам по образу жизни и известные грекам под именем савроматов, а позднее сарматов. Савроматская археологическая культура VII—IV вв. до н.э. занимала обширный регион евразийских степей от левобережья Дона до Заволжья с Приаральем, северным Прикаспием и южным Приуральем. В IV—III вв. начинают создаваться военные союзы крупных сарматских племен, какими были, например, аорсы, сираки, роксоланы, язиги. Мощные союзы этих племен настолько окрепли к IV в. до н.э., что оказались способными на крупные завоевания и дальние миграции. Исследования последних десятилетий степных культур Северного Кавказа выявили проникновение в Прикубанье в IV — начале III в. до н.э. кочевых сарматских племен, в частности сираков [4]. Изучение меотских могильников IV в. до н.э. в Прикубанье показало увеличение на 70% числа мужских погребений с оружием. В на-

чале этого столетия появляются и серьезные укрепления меотских городищ (валом и рвом шириной до 10 м, глубиной 5 м). Археологические материалы фиксируют постепенную седентаризацию (оседлость) сарматов на меотских землях, на что указывает смешение погребальных обрядов. Рядом с границами Боспора складывается мощный военно-политический сирако-меотский союз племен, в котором ведущая роль принадлежала сиракам. Это объединение стало частью обширного сиракского племенного союза на Северном Кавказе, ставшего огромной опасностью для Боспора. Поэтому усадьбы на сельских землях Боспора укрепляются.

В конце III в. до н.э. Горгиппия пережила общегородской пожар, разрушивший ее дома, сельские усадьбы на городской хоре и городские стены. Город был восстановлен, но во II в. до н.э. у Боспора осложнились отношения со Скифией на его восточнокрымских землях.

### Воинственные соседи

Мощь кочевых скифов, имевших свой центр в Приднепровье, поколебалась под напором сарматов, переходивших реку Танаис (Дон) и растекавшихся по степям. С запада на Скифию участи-





Одна из трех горгон (деталь мифа о Персее, обезглавившем горгону Медузу). Слоновая кость, гравировка; деталь фриза на саркофаге или погребальном ложе. Подкурганная гробница в окрестностях Анапы. Рубеж V—IV вв. до н.э. (слева). Краснолаковый лагинос с рельефным орнаментом — олень наклонился к цветку. Работа пергамской школы. Погребение горгиппийского некрополя. III в. до н.э.

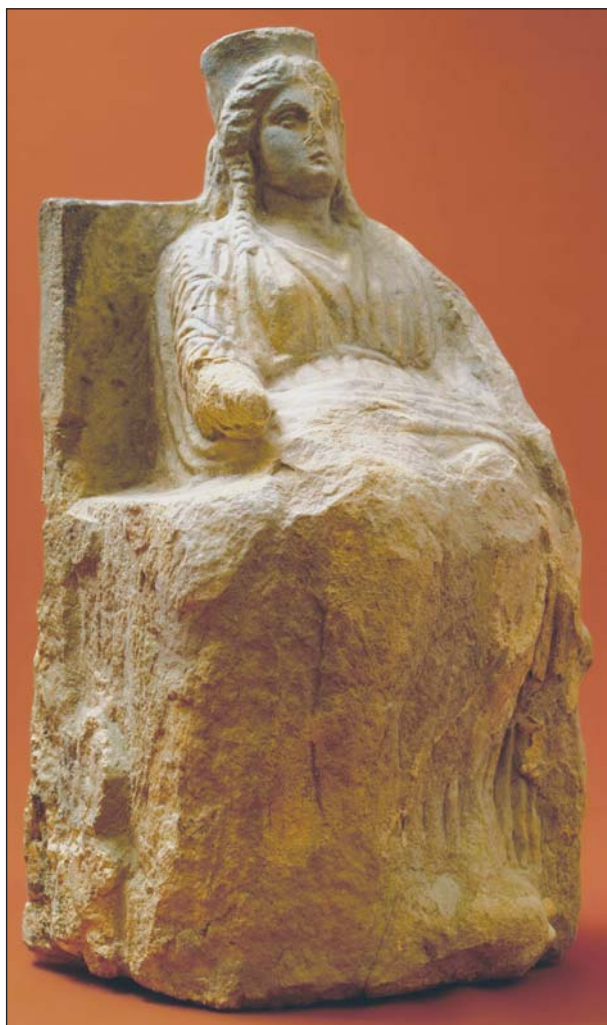


лись набеги кельтских племен. Древние авторы, отмечая воинственность сарматов, писали, что «они истребили население Скифии, сделав страну пустыней». Вторжение сарматов нарушило складывавшиеся веками межплеменные отношения. В конце IV в. до н.э. скифы передвинулись из Приднепровья в Крым, сделав столицей Неаполь Скифский (ныне это окраина Симферополя). Крушение Великой Скифии от рубежа IV—III вв. до н.э. и образование сильной скифской державы в Крыму создало спокойную обстановку для всех причерноморских греческих государств. Раскопки показали, что на Керченском п-ове (земли Боспора) в III в. до н.э. из 276 сельских поселений 233 были оставлены жителями. Ко II в. до н.э. наиболее сложная обстановка сложилась в Херсонесе. Город развивался в соседстве не только с Крымской Скифией, но и с таврами, населявшими горный Крым. На захваченных и разрушенных поселениях херсонесской хоры возникали скифские крепости, они вплотную приблизились к Херсонесу. В начале II в. до н.э. Херсонес заключил союзнический договор с царем Понтийского царства Фарнаком I, а в конце столетия перед угрозой скифов обратился за помощью к его внуку, царю Понта Митридату VI Евпатору, который в это время вступил в соперничество с Римом.

На востоке Боспора (прикубанские земли) обстановка дольше сохраняла стабильность, чему не мешало оседлое меотское окружение, но уже к середине II в. до н.э. у восточных границ Боспора окреп военный союз сарматских племен за счет притока в Прикубанье новых сарматских племен из Волго-Донских степей. На Таманский п-ов и юго-восточные земли Боспора — Горгиппию и Баты (окрестности Новороссийска) — начались опустошительные набеги, археология фиксирует пожары. Страбон [5, кн.VII, гл.4, фр.4] отметил, что варвары требовали от правившего тогда царя Перисада V дани «больше прежнего».

### Понтийское царство

В конце II в. до н.э., не выдержав напора варваров, боспорский царь Перисад V передал власть сильному соседу — царю Понтийского царства Митридату VI Евпатору, подведя итог 330-летнему правлению Спартокидов на Боспоре. По свидетельству Страбона, «Митридат стал господином Боспора» [5, кн.VII, гл.4, фр.3]. Это событие было подготовлено долгим развитием взаимоотношений Боспора с крупными центрами Понта (Амисом, Синопой, Гераклеей); понтийский флот господствовал в Черном море и обеспечивал безо-



Тихе — греческая богиня судьбы, случая, счастливого и злого рока. Мраморовидный известняк. Слой пожара II в. до н.э. в горгиппийском доме.



Голова коня на пластине, украшавшей клине (ложе). Бронза. Слой пожара I в. до н.э. — I в. н.э. в горгиппийском доме.

пасность торговым судам. Горгиппия вместе с Боспором вошла в состав Понтийской державы, объединившей к этому времени земли Малой Азии, Закавказья и Северного Причерноморья [6]. Боспором управлял один из сыновей Митридата Махар, который выполнял функции наместника царя. Подчинив северопричерноморские греческие города, Митридат установил союзнические отношения с племенами, жившими от Дуная до Дона и вокруг Азовского моря. Все завоевания Митридата в Северном Причерноморье были направлены на достижение главной цели его жизни — победы в противостоянии с Римом за господство на Черном море. Как известно, после распада империи Александра Македонского Греция до II в. до н.э. находилась под властью Македонии, но в 168 г. до н.э. Македония была разгромлена Римом и в 148 г. объявлена римской провинцией, а через два года к ней была присоединена и Греция. В Средиземноморье наступал период гегемонии Рима.

Эллинские города Причерноморья превратились в главный источник пополнения митридатских войск продовольствием, а наличие союзных степных племен обеспечивало постоянное восполнение людских потерь в армии Понта. Митридат провел три долгих военных кампании против Рима. Последняя растянулась на 10 лет и окончилась сокрушительным поражением — теперь римский флот господствовал в Черном море и осуществлял блокаду судов Понта и Боспора. После поражения Митридат бежал в Пантикапей, на окраину своих владений, и начал готовиться к следующему походу против Рима. В 63 г. до н.э. мятеж подняла Фанагория. Греческий историк II в. н.э. Аппиан об этих событиях эпохи Митридата писал: «...сколько их было поблизости — крепости, недавно занятые Митридатом, Херсонес и Феодосия, и Нимфей, и все другие, сколько их было у Понта, удобных для обороны, отпали от него, следуя смелому примеру фанагорийцев» [7, фр.108]. Находясь в пантикапейском дворце, Митридат отдал приказ евноху Бакху умертвить царских жен, сестер и наложниц. Затем он обратился к предводителю телохранителей Битоиту: «Я не могу умереть от яда вследствие глупых моих предохранительных мер при помощи других ядов. Самого же страшного и столь обычного в жизни царей яда — неверности войска, детей и друзей — я не предвидел... большую поддержку и помощь твоя рука оказывала мне в делах войны, но самая большая помощь будет, если ты сейчас прикончишь мою жизнь», и он подставил голову под удар меча своего телохранителя [7, фр.82, 111].

После смерти Митридата его сын Фарнак, перешедший при жизни отца на сторону римлян, получил от римского консула и полководца Помпея в управление Боспорское царство. Его 15-летнее правление было заполнено подготовкой к борьбе с Римом за утверждение в бывших владе-



ниях отца, но желаемого он так и не достиг. Постмитридатовское время и рубеж тысячелетий ознаменовались укреплением границ Боспорского государства, возведением крепостей и созданием военных поселений на царских землях. К военной службе привлекались конные дружины сарматских воинов, хорошо известные в средиземноморском мире умением воевать и использовавшиеся в качестве наемников для решения многих конфликтов внутри региона.

После гибели Митридата VI в 63 г. до н.э. Боспором на рубеже тысячелетий правили, сменяя друг друга, его сын Фарнак II, его внучка Динамия и ее сын Аспург. Последний положил начало правлению новой династии, остававшейся у власти почти 250 лет. Ономастика имен этой династии выявляет сарматские корни в ее генеалогии и уводит в ираноязычный мир.

После крушения царства Митридата VI, начиная с конца I в. до н.э., история Боспора была неразрывно связана с Римом. На правах победителя над Понтийским царством Рим осуществляет протекторат, определяя порядок престолонаследования. При императоре Нероне Рим провел на Боспоре монетную реформу, вследствие которой был прекращен чекан золотых статеров, а эмиссии медных денег стали проводиться по римской системе. После смерти Нерона Боспор возобновил чекан золотых статеров и выпуск медных монет от своего имени, на золотых монетах помещались портреты членов императорского римского дома, на медных — лик боспорского царя. С конца I в. портрет боспорского царя занимает лицевую сторону золотых статеров, а портрет императора помещается на реверсе. В начале II в. н.э., в правление боспорского царя Савромата I, портреты римских императоров появляются и на меди, но вскоре окончательно исчезают, и серии боспорских монет носят независимый характер. Эти изменения в облике монет отражают колебания степени зависимости Боспора от Рима. Боспорские военные контингенты входили в регулярные и вспомогательные части римской армии. На население были возложены обязанности по снабжению продовольствием римских войск. В этот период в Северное Причерноморье поступают товары (художественные и бытовые изделия из бронзы и стекла, керамика с краснолаковым покрытием) со всей территории Римской империи — как из восточных, так и из западных провинций.

### Приход аланов

В середине I в. н.э. в очередной раз меняется экспозиция племен на северо-востоке Причерноморья. На историческую арену выходит мощный племенной союз кочевников аланов. Они появились из Внутренней Азии и осели в степях вос-



Деталь храма — архитектурный блок, в центре кассеты — лик горгоны Медузы со змейками под подбородком. Мрамор. Культурный слой Горгииппии в центре Анапы. II в. — первая половина III в. н.э.



Верхняя часть надгробной стелы с эпитафией «Талон и мать Гедин, прощайте». Мрамор. Культурный слой Горгииппии. II в. н.э.





Бюст египетской богини судьбы и мистических культов Исида, покровительницы мореплаваний, плодородия, материнства. Бронза. Слой пожара 240 г. н.э. в горгиппийском доме.



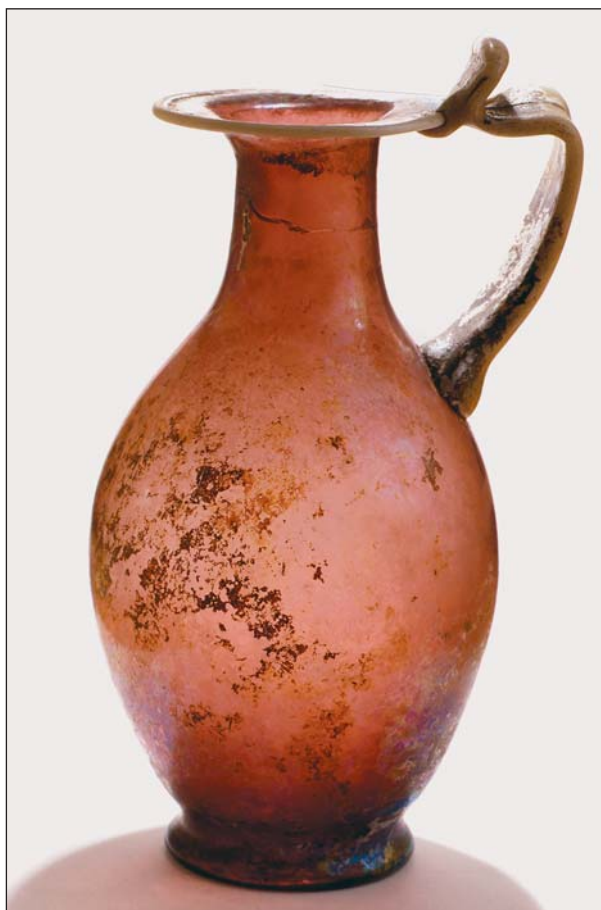
Надгробие местного образца с рельефной женской фигурой. Ракушечник. Культурный слой горгиппийского некрополя. Первые века нашей эры.

точнее Дона и севернее Кавказа. С момента появления два первых столетия аланы будут оказывать влияние как на внутреннюю политику Боспора, так и на его отношения с Римом. Они пытались вступить в опасные для Боспора союзнические отношения с тавро-скифами в Крыму. Движение аланов на запад вызывало перемещение их соседей — сарматских племен аорсов и сираков [8, гл. XII, фр. 80, 82]. В I в. аланы опустошали Армению, в III в. вторгались в римскую провинцию Фракию. Только после 370 г. аланы были вытеснены гуннами на запад. После V в. следы их теряются в Северной Африке. Многие античные авторы, упоминая этноним «аланы» для догунского времени, говорят об этом народе как о диком, воинственном, свободном, непокорном, жестоком и свирепом, «хуже всякой другой беды». На Боспор была возложена задача по созданию щита для Римской империи против кочевников. Военные прерогативы Боспора были расширены, в его обязанности входило контролировать обстановку на Северном Кавказе и в Крыму, противостоять тавро-скифам и аланам, защищать Херсонес. В самом конце I в. Боспору удалось одержать победу над аланами, важную для безопасности границ Римской империи, о чем известно из найденной в Пантикапее надписи. Для Боспора II в. н.э. стал временем восстановления разрушенных укреплений многих центров, размаха строительства и периодом последнего расцвета государства.

К началу III в. меняется ситуация на границах Боспора. В степях появляются варварские племена, названные античными авторами готами. Собственно готами были племена германской языковой группы, пришедшие с берегов Балтийского моря. Готы возглавили передвижение больших объединений племен различных этнических групп, в том числе аланских, сарматских и др. Передвижения этих племен нарушили жизненный ритм всех центров античной культуры Северного Причерноморья. Первой была разгромлена Ольвия. Горгиппия также приняла один из первых ударов, погибла она в 238/239 г. н.э. во всеобщем пожаре (наиболее поздние монеты из слоя пожара помечены этим годом). Вслед за Горгиппией был разгромлен Танаис, располагавшийся в низовьях Дона. В Горгиппии горели все дома. Особенно сильный огонь бушевал в подвалах, куда рухнули деревянные перекрытия, полы и стропила крыш. В подвалах вдребезги разбились амфоры и пифосы, полные зерна, рыбы, вина и нефти, все смешалось с провалившейся вниз утварью наземных комнат. Осколки стеклянных и керамических сосудов оплавившись и покрылись пузырями. На полах были разбросаны десятки и сотни монет, брошено все. Пожарище не расчищалось и в первоначальном виде «дождалось» археологов. Скелетов погибших в пожарище не найдено, жителей могли увести завоеватели.



Антропоморфное надгробие, ракушечник. Культурный слой горгиппийского некрополя.



Кувшин из прозрачного стекла, техника свободного дутья. Погребение горгиппийского некрополя. I—II вв. н.э.

После этого пожара жизнь в Горгиппии кое-где теплилась, но полностью восстановиться город не смог. На восточном его краю (на месте главных въездных ворот и, видимо, вблизи порта) на пожарище была сооружена цитадель с каменными стенами (толщиной 2,8 м) и контрфорсами. Планировку внутри нее уничтожила жизнедеятельность Анапы эпохи русско-турецких войн — уровень дневной поверхности Анапы турецкого времени вплотную подходит к дневной поверхности города III в. Для сравнения: уровень дневной поверхности раннего греческого полиса VI в. до н.э. находится на 3 м ниже поверхности асфальта анапских улиц. Мощность культурных напластований собственно Горгиппии со-



Серебряная ложка с козым копытцем на конце ручки. Склеп II 1975 г., погребение конца II — начала III в. н.э.





Полихромная стеклянная фиала. Стекло: глухое белое и прозрачное — бесцветное с прокладкой золотой фольги, цвета марганца, зеленого и сизо-зеленое. Склеп II 1975 г., погребение конца II — начала III в. н.э.

ставляет около 2,5 м, они лежат ниже мостовых современной Анапы на 0,8—1 м. Стратиграфия памятника очень сложна, так как город на одном месте развивался восемь веков, а в ходе строительных работ во все эпохи более ранние напластования перекапываются, переоткладываются и уничтожаются.

О событиях на Боспоре начала III в. н.э. нам известны мало. Со смертью в 211 г. царя Савромата II окончился золотой век Боспора (II в.). Наступило

правлящей сарматской династии, создавшей сармато-аланскую группировку.

В окрестностях Горгииппии жизнь продолжалась вплоть до гуннского передвижения племен 370-х годов н.э., о чем свидетельствуют материалы могильников и монетных кладов в ее окрестностях.

Такова «канва» истории развития античных государств, основанных греками в Северном Причерноморье и Горгииппии в частности [9]. ■

## Литература

1. Алексеева Е.М. Греческая колонизация Северо-Западного Кавказа. М., 1991.
2. Гайдукевич В.Ф. Боспорское царство. М.; Л., 1949.
3. Завойкин А.А. Кризис «первой половины» V в. до н.э. и проблема образования Боспорского государства // Российская археология. 2006. № 4. С.103—111.
4. Марченко И.И. Сираки Кубани. Краснодар, 1996.
5. Страбон. География: В 17 кн. М., 1964.
6. Молев Е.А. Митридат Евпатор. Саратов, 1976.
7. Аппиан Александрийский. Римская история. Кн. XIII: Митридатовы войны // Аппиан. Римские войны. СПб., 1994.
8. Плиний Старший. Естественная история. Кн. IV: О странах Европы // Вопросы истории естествознания и техники. 2007. №3. С.110—142.
9. Алексеева Е.М. Античный город Горгииппия. М., 1997.



# Спорово-пыльцевой анализ: применение

С.А.Сафарова,

кандидат биологических наук

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН  
Москва

**П**алинология — наука о пыльцевых зернах и спорах — возникла в конце XVII века\*. С изобретением микроскопа у ботаников появилась возможность определять таксономическую принадлежность растения по его невидимым глазу остаткам — пыльце и спорам. Было установлено, что их оболочки состоят из удивительно стойкого вещества — спорополленина, способного сохраняться в континентальных и морских осадках миллионы лет. Поэтому, едва появившись на свет, спорово-пыльцевой анализ сделался совершенно необходимым в самых различных областях знаний, где от него ждут ответов на разнообразные, порой более чем неожиданные вопросы. Палинологические методы вошли в некоторые научные дисциплины настолько прочно, что без них было бы немислимо их развитие в последние десятилетия.

Анализ пыльцы и спор широко применяется, например, в **геологии полезных ископаемых**. Исследование спорово-пыльцевых комплексов угленосных отложений помогает определить их возраст, геологическое строение и величину запасов угля. Так, установлено, что крупнейшие каменноугольные бассейны Донецкий, Подмосковский, Карагандинский, Вестфальский и Силезский образовались в каменноугольный период, а Тунгусский, Кузнецкий и Печорский — в пермский [1, 2]. С помощью палинологического метода подсчитаны и примерные запасы угля в этих бассейнах.

Тем не менее в многотомном описании угольных бассейнов России можно найти лишь краткие характеристики и неуточненный возраст многих месторождений, в том числе дальневосточных. В геологических отчетах обращается внимание на отсутствие палеонтологических данных. По этой причине границы между свитами не обоснованы и считаются условными.

Несколько лет назад сотрудники Тихоокеанского океанологического института и Института

океанологии им П.П.Ширшова совместно с коллегами из Китайской Народной Республики завершили многолетние работы по биостратиграфии Тумангано-Бикинского буроугольного бассейна, расположенного на территории КНР, Китая и Дальнего Востока России [3]. Это месторождение — самое крупное из буроугольных: его производственная мощность составляет 6,5 млн т угля в год, а возможный уровень добычи оценивается в 14–15 млн т. Здесь действует Лучегорский угольный разрез, обеспечивающий углем Приморскую ГРЭС. Возраст же угленосных отложений определяется разными авторами по-разному. Специалисты ботаники и палинологи собрали здесь обширный материал: получены листовые отпечатки растений и спорово-пыльцевые данные. Здесь обнаружены виды родов *Taxodium*, *Harmelalis*, *Eucommia*, *Alnus*, *Ostrya*, *Carpinus*, *Cyclocaria*, *Pterocarya*, *Carya*, *Salix*, *Populus*, *Cotinus*, *Laurocerasus*, *Nyssa*, *Cordia*, *Juglans*, *Ulmus*, *Castanea*, *Castanopsis*, *Myrica*, *Betula*, *Liquidambar*, *Sterculia*, *Tricolporopollenites*, *Fagus* и *Quercus*. Сравнение этого комплекса с известными третичными флорами Дальнего Востока показало сходство с болотнинской флорой Южного Приморья, фиксирующей климатический оптимум эоцена.

Такие же определения сделаны и для других угленосных отложений Дальнего Востока, в частности Нежинского буроугольного месторождения (в Надеждинском р-не Приморского края), запасы которого составляют 17,8 млн т.

С помощью спорово-пыльцевого анализа можно определять возраст и запасы не только каменного угля, но и других полезных ископаемых. Так, при разведке железных руд в Курганской обл. на помощь геологам, геофизикам, буровикам и геохимикам пришли палеонтологи, которые помогли открыть там месторождение мощностью около 10 млрд т.

Значение спорово-пыльцевого анализа существенно возросло в годы Великой Отечественной войны в связи с увеличившимся интересом к геологии россыпных месторождений.

В последние десятилетия палинологический анализ нашел применение в **нефтяной геологии**. Он используется при геологических иссле-

\* Об истории становления палинологии и людях, стоявших у истоков этой науки, рассказано в предыдущей статье автора в «Природе» (2014. №6. С.58–62).



Ископаемые пыльца и споры растений.

дованиях практически во всех нефтеносных районах мира.

Анализ пыльцы и спор играет важную роль в определении возрастного диапазона палеозойских и мезозойско-кайнозойских нефтегазосодержащих толщ, в обосновании региональных и общих стратиграфических схем и их корреляции. Хорошая сохранность пыльцы и высокая информативность спорово-пыльцевых комплексов даже в небольшой части зерна делают метод весьма эффективным. Объектами палинологического исследования в нефтяной геологии могут быть не только породы, но и нефть, газ, конденсаты и вода нефтяных месторождений. Особенно важен этот метод для выяснения путей миграции нефти и газа и установления интервалов между возможными перетоками этих полезных ископаемых. Небольшие размеры, малый удельный вес, стойкость к воздействию кислот, щелочей, органических растворителей и высоких температур, а также хорошие флотационные свойства пыльцы и спор позволяют им легко переноситься с нефтью и природным газом, к тому же сама нефть служит отличной консервирующей средой, благоприятной для сохранения органических микроостатков.

С помощью спорово-пыльцевых комплексов из нефти можно выделить «местную» и «миграционную» части, причем вторая представляет особый интерес. Диапазон вертикальной миграции фиксируется разностью стратиграфических уровней между «местными» комплексами и наиболее древними «миграционными». Уточнение нижней границы миграции связано со знанием морфологии и систематики древнейших растительных форм.

Так, на примере Урало-Поволжских нефтеносных отложений показано, что залежи нефти, конденсата и газа в гранулярных и трещинных коллек-

торах здесь вторичны, поскольку в них присутствуют микрофоссилии иного возраста, чем вмещающие породы [4]. Характерная смена палинологических комплексов доказывает, что формирование залежей на этой территории происходило в процессе миграции углеводородов, как правило из нижележащих отложений в вышележащие.

Многие месторождения нефти и газа и целые провинции приурочены к древним и современным континентальным окраинам. Наиболее крупные обнаружены в бассейне Атлантического океана и в Северном море, где нефть залегает в очень древних отложениях (юрского и мелового периодов, более 60—100 млн лет назад). Колоссальные запасы обнаружены также в Каспийском, Азовском, Черном, Баренцевом, Охотском, Беринговом и других морях. Перспективными для добычи нефти и газа считаются арктические шельфы России и США. В морских скважинах, пробуренных в американском секторе Чукотского моря, уже получены притоки нефти и газа.

Спорово-пыльцевой анализ широко используется в **гидротехнической геологии**. Большой размах строительства в нашей стране требует детального геологического обоснования гидротехнических и других проектов. А большинство грунтов, с которыми имеют дело строители, представляют собой отложения четвертичного периода. В одних случаях они служат основанием для фундаментов, в других непосредственно используются в качестве строительных материалов. Ни одно крупное строительство не обходится без услуг спорово-пыльцевых лабораторий.

Например, при возведении Нижнекамской ГЭС проектировщикам нужно было точно установить верхнюю границу третичных отложений, для которых характерны отложения плотных глин (они должны были служить основанием для плотины). Ее смогли определить палеонтологи Казанского университета по найденным отпечаткам двудольных растений (дуба, липы, клена, орешника) конца третичного периода (около 6 млн лет назад) и спорам водяного папоротника ацоллы (*Azolla*).

Исключительно велика роль спорово-пыльцевого анализа в изучении **геологии торфяных месторождений**. По пыльцевым диаграммам разрезов, заложенным в различных болотах, определяют происхождение и возраст торфяников. Палинологические данные помогают проследить изменения в характере растительности, а затем путем корреляции разных разрезов между собой установить фазы колебаний климата. Эти данные позволяют судить об относительном возрасте тех или иных торфяников. Определить абсолютный возраст каждого горизонта удается в том случае, если существует возможность установить время образования хотя бы одного из них — на базе археологических находок или радиоуглеродным методом.

Известный отечественный палеоботаник В.С.Доктуровский приводил такой пример. В Гер-

мании, близ Гамбурга, в торфянике Витмоор, под слоем торфа мощностью 1.8 м была обнаружена дорога, представляющая собой настил из бревен. На дороге нашлись монеты времен Римской империи, т.е. имеющие возраст около 2 тыс. лет. Пыльцевой анализ показал, что время строительства дороги соответствовало так называемой суббореальной климатической фазе голоцена. Прирост торфа за год составил 0.05—0.1 см. С большой точностью был определен абсолютный возраст каждого слоя торфяника, а затем и возраст многих торфяников прилегающего района.

По данным палинологического анализа торфа из двух болот на побережье Балтийского моря и Псковского озера было установлено, что ~6 тыс. лет назад здесь появился лес и начал накапливаться торф, а прибрежные дюнные пески заросли сосновым лесом примерно 4.7—3.9 тыс. лет назад [5].

Немаловажную роль спорово-пыльцевой анализ играет в **археологии**. Он позволяет не только уточнить время существования тех или иных поселений, но и дает возможность восстановить среду обитания наших далеких предков. Приведу пример. На оз.Лача в бассейне р.Онеги известна стоянка Веретье, она находится в полукилометре от устья р.Кинешмы. Археологи установили, что стоянка функционировала в начале 2-го тысячелетия до н.э., а это соответствует суббореальной фазе голоцена. Пыльцевой анализ торфа показал, что в то время здесь росли сосна, ель и береза с примесью дуба и вяза, а климат был суше и теплее современного. В настоящее время в здешних местах (а это севернее 61°с.ш.) дуб не растет, он встречается лишь южнее 59°с.ш.

К суббореальной фазе относятся и две неолитические стоянки, обнаруженные вблизи г.Кемь (1900—1600 гг. до н.э.). Их возраст также подтверждается результатами спорово-пыльцевого анализа. Здесь в окружающих лесах преобладала сосна, в большом количестве росли ольха, орешник, дуб и вяз.

На востоке Казахстана, в Зайсанской котловине, при раскопках одного из холмов были найдены хорошо сохранившиеся на глине отпечатки листьев древних субтропических растений. В донных отложениях Байкала и озер Забайкальского края тоже сохранились такие отпечатки. На обрывистом берегу Татарского пролива, вблизи пос.Сизиман, охотники обнаружили отполированные блестящие камни, оказавшиеся окаменевшими деревьями. Установлено, что 40—30 млн лет назад здесь рядом с елями и лиственницами росли туи, папоротники, метасеквойи, магнолии и платаны.

В среднем течении р.Анадырь на Чукотке была пробурена скважина и получен керн длиной 14 м. Палинологические исследования показали доминирующее положение хвойных деревьев (в среднем 45.06%), пыльцы покрытосеменных видов (31.8%) и спор (2.6%). Такой спорово-пыльцевой комплекс указывает, что в недалеком прошлом

здесь произрастали вечнозеленые хвойные и лиственные леса, некоторые из которых сегодня сохранились только в тропиках.

Исследователи-палеонтологи, изучавшие четвертичные отложения в районе Главного Туркменского канала (незавершенного проекта мелиорации Туркмении 1950-х годов), обнаружили в них пыльцу ореха, орешника, ольхи и других деревьев. Значит, совсем недавно эти деревья росли здесь и исчезли они лишь после осушения русла р.Узбой. Эти данные подсказали агрономам и лесоводам, что в насаждения, запроектированные вдоль канала, можно было включить и некоторые из названных видов растений.

В Минусинской котловине, известной богатством и разнообразием следов пребывания человека самых разных эпох, от палеолита до Средневековья, палинологи исследовали ряд палеолитических стоянок. Были взяты образцы почв из культурных слоев грота Проскурякова, который расположен на правом берегу р.Белый Июс, выше с.Ефремкино. На этом участке отроги Кузнецкого Алатау с двух сторон «сжимают» долину реки. Северные и западные склоны покрыты древесной растительностью (сосной, лиственницей, кедром, березой), а южные — степной травянистой. В обрывах множество гротов и пещер. В гроте Проскурякова были найдены несколько мустьерских пластин и большое количество остатков млекопитающих как степных, так и таежных видов, в том числе яков [7]. Из видов, тяготеющих к степным луговым участкам, выделяются лошадь и бизон. По фаунистическому материалу наиболее близкими аналогами грота Проскурякова могут быть палеолитические стоянки левобережья Енисея: Афонтова гора (I—III) близ Красноярска и расположенные на 150 км южнее Кокоревские стоянки. По радиоуглеродным данным, их возраст колеблется в пределах от 13 до 20 тыс. лет.

Образцы из грота Проскурякова также были датированы сартанским веком. Климат в то время был холодным и засушливым. Ледники вытеснили с гор лес и сопутствовавший ему животный мир. Из-за наступившего похолодания с севера в Минусинскую котловину мигрировали крупные стадные млекопитающие, в их числе мамонты. Як, обитавший на границе льда и высокогорных лугов, вынужден был спуститься до границ плоскогорья (это не значит, что он сменил экологическую нишу, она осталась прежней, но снизилось ее положение в рельефе).

Во время оледенения в степной части котловины сохранились стада степных животных (например, сайгаки), хотя их поголовье, безусловно, сократилось. Тем не менее они и другие животные, «спасавшиеся» в котловине от нашествия ледника, привлекли в эти края палеолитического человека, расселившегося по речным берегам. В межгорно-котловинном ландшафте сформировались определенные типы зимних и летних стоянок, более





Грот Проскурякова, Хакасия [6].

или менее постоянных, связанных с сезонными изменениями климатических условий и миграциями животных. Поскольку пути таких миграций в котловине были короткими, у человека сформировался полукочевой образ жизни. Эта традиция, возникшая из-за ландшафтных особенностей межгорных котловин Южной Сибири, сохранилась до наших дней в укладе хакасского населения: здесь зимняя жизнь в избах сочетается с летним кочевьем в горах.

Спорово-пыльцевой анализ пришел на помощь и исследователю тайн о.Пасхи, известному норвежскому ученому Туру Хейердалу. Изучение взятых им проб торфа показало, что на этом безлесном сегодня острове в далеком прошлом существовала богатая растительность, росли даже пальмовые рощи. Было уточнено время появления на острове пресноводного камыша из Южной Америки. Эти факты наряду с археологическими данными позволили Хейердалу всесторонне обосновать гипотезу о заселении островов Тихого океана.

**Почвоведение** сегодня также невозможно представить без данных палинологии. Тесное взаимодействие этих дисциплин можно оценить на примере изучения эволюции природных условий Большеземельской тундры. Ландшафты этого региона не всегда были такими, какими мы их видим сейчас. Палинологические данные говорят о том, что ранее здесь были распространены мощные подзолы — типичные лесные почвы [8]. Они не образуются в тундре, следовательно, здесь могут считаться реликтовыми. Судя по характеру их распространения, зона сплошных лесов в Большеземельской тундре практически достигала побережья Северного Ледовитого океана. Спорово-пыльцевой анализ показал, что в самой северной части лесной зоны произрастала еловая тайга.

Немаловажную помощь палинология оказывает **медицине**. Английский палинолог Х.Хайд установил, что сенную лихорадку (поллиноз) в Европе вызывает пыльца злаков и некоторых деревьев, а также пыльца отдельных видов сорных растений [9]. В США основными аллергенами считаются амброзия и некоторые степные травы. В Австралии и Новой Зеландии поллинозы вызывает пыльца ряда растений европейского происхождения.

В справочнике по аллергенным растениям и пыльце перечисляются многие известные и широко распространенные виды. Среди них лиственные (береза, дуб, тополь, рябина, ясень, ольха и др.) и хвойные (сосна, ель, лиственница и др.) деревья\*, многие сорняки (кра-

пива, щавель, подорожник, лебеда и др.), дикорастущие полевые злаки и растения заболоченных и влажных местообитаний (пушица, камыш, тростник), а также ряд возделываемых культур (кукуруза, рожь, рис, пшеница, просо).

Резкое увеличение количества опасной для здоровья пыльцы происходит в разных регионах в разное время, и зависит эти всплески от особенностей рассеивания пыльцы, определяемых, в свою очередь, метеорологическими условиями. Следует принять во внимание, что в атмосфере промышленных городов пыльца соприкасается с еще более тонкодисперсными промышленными выбросами, что повышает ее вредное воздействие на организм человека.

Большую пользу спорово-пыльцевые исследования приносят **лесной типологии**. Это особенно важно при разработке естественных классификаций типов леса, учитывающих генезис растительных сообществ. Еще в 1891 г. русский ботаник С.И.Коржинский писал: «...Современное состояние растительности какой либо страны есть лишь одна из стадий непрерывных изменений ее растительного покрова, результат минувших условий и зачаток будущих». Такой подход к лесной типологии целиком соответствует идеям отечественной геоботанической науки, которая, в отличие от американской, не признает никаких заключительных устойчивых ассоциаций или формаций.

При изучении изменений растительного покрова лесоводы сталкиваются с процессами различного масштаба. Достаточно хорошо изучены смены, происходящие на наших глазах: после вырубок, пожаров и т.п. хуже исследованы процессы

\* Раньше сосна, ель и береза не считались аллергенами, но теперь известно, что и они могут вызывать тяжелые заболевания.

медленного преобразования растительного покрова: вековые смены (по Е.М.Лавренко) или филоценогенез (по В.Н.Сукачеву). Здесь палинологический метод может оказаться весьма эффективным. «Понятно, с каким глубоким интересом, — писал С.И. Коржинский, — собираются все факты относительно доисторических условий растительности, так как в них именно ученые должны искать ключ к пониманию современных явлений растительного мира».

Как мы видим, палинология широко востребована во многих дисциплинах, связанных с континентальными (наземными) отложениями. Но применение спорово-пыльцевого анализа в **палеоокеанологии** тоже значительно облегчает труд ученых, занимающихся исследованием донных отложений океанов и морей.

Еще в 1892 г. известный русский геолог И.А.Андрусов, изучая илы Черного моря, нашел в них большое количество пыльцы хвойных деревьев. В 1951 г. специалисты Института океанологии обнаружили пыльцу наземных растений в Тихом океане — в Филиппинской впадине, глубина которой превышает 10 тыс. м. Исследования морских отложений Охотского моря и Тихого океана позволили уже в 1950-х годах составить карты и схемы количественного распределения пыльцы на дне этих акваторий [10, 11].

Спорово-пыльцевые спектры в пробах донных осадков морей и океанов дают отчетливое представление о развитии растительности и колебаниях климата на прилегающей суше. Например, пыльца в поверхностных осадках моря Лаптевых отражает состав современных тундро-

вых ассоциаций: в основном это споры зеленых и сфагновых мхов, а также папоротники. Среди травянистых определены осоковые, злаковые, вересковые и др. Отмечены пыльца голубики, багульника и толокнянки. Из древесных в спектре преобладают сосна, кедровый стланик, береза и карликовая ива. В пробах из колонок голоценовых донных осадков по спорово-пыльцевым данным установлены несколько небольших похолоданий и одно значительное потепление, соответствующее климатическому оптимуму, когда в растительном покрове лаптевоморского побережья появились ель, ольха и кедр, а также маревые, гвоздичные и бобовые.

В Беринговом море результаты спорово-пыльцевого и фораминиферового анализов проб из колонок донных осадков позволили отнести отложения шельфа к голоцену и определить горизонты, соответствующие субатлантическому, суббореальному, атлантическому, бореальному и предбореальному времени [12].

Таким образом, спорово-пыльцевой анализ — метод, использующийся самыми разнородными дисциплинами. Диапазон его применения очень широк. Ископаемые микроостатки растений как свидетели отдаленных геологических эпох могут оказать существенную помощь разведчикам недр, строителям, археологам, океанологам и лесоводам. Но многие из возможных сторон применения спорово-пыльцевого анализа еще ждут своего открытия. Поэтому одними из целей статьи были привлечение внимания к этому методу и попытка способствовать более широкому его внедрению в жизнь, в практику. ■

## Литература

1. *Нейбург М.Ф.* К стратиграфии угленосных отложений Кузнецкого бассейна // Известия АН СССР. Сер. Геол. 1936. Вып.4. С.155—160.
2. *Нейбург М.Ф.* Верхнепалеозойская флора Кузнецкого бассейна // Палеонтология СССР. Т.12. Ч.3. Вып.2. М.; Л., 1948.
3. *Аблаев А.Г., Сафарова С.А., Ван Ю-Фей.* Палеоген Пушкинской впадины Притуманганья. Дальний Восток России. М., 2009.
4. *Медведева А.М.* Палинологическое изучение нефти. М., 1978.
5. *Гаель А.Г., Сафарова С.А., Смирнова Л.Ф., Тялли П.Г.* К истории формирования лесной растительности на песках в Эстонии // Научные доклады высшей школы. Биологические науки. М., 1977. С.121—129.
6. *Горбатовский В.В.* Геологические образования — сакральные объекты народов России // Материалы Международной конференции «Уникальные геологические объекты России: сохранение и рекреационный потенциал». СПб., 2013.
7. *Окладников А.П., Оводов Н.Д., Рыбаков С.А.* Грот Проскуракова — новая палеолитическая стоянка в Хакасии // Бюлл. комиссии по изуч. четв. периода. 1975. №44. С.111—117.
8. *Федорова Р.В.* Материалы палеоботанического исследования погребенных торфяников Приполярного Урала // Изв. Всесоюз. геогр. общества. 1951. Т.83. Вып.6. С.5—10.
9. *Hude N.A., Adams K.F.* An Atlas of airborne Pollen Grains. L., 1958.
10. *Коренева Е.В.* Изучение современных морских отложений методом спорово-пыльцевого анализа // Труды Института океанологии АН СССР. 1955. Т.13. С.23—29.
11. *Коренева Е.В.* Спорово-пыльцевой анализ донных отложений Охотского моря // Труды Института океанологии АН СССР. 1957. Т.13. С. 221—251.
12. *Саидова Х.М., Сафарова С.А.* Экостратиграфия и палеогеография голоцена шельфа Берингова моря по фораминиферам, спорам и пыльце // Четвертичный период. Стратиграфия. 1989. С.176—181.

# МАГИЯ КРИСТАЛЛОВ

К 150-летию со дня рождения Г.В.Вульфа



Непреодолимое значение работ знаменитого кристаллографа, члена-корреспондента Российской академии наук Георгия (Юрия) Викторовича Вульфа (1863–1925) связано прежде всего с тем, что он предложил свой, очень наглядный, способ вывода всех 32 видов кристаллографической симметрии и разработал графический метод обработки результатов измерения кристаллов с помощью стереографической сетки (сетки Вульфа). Но этим его вклад в кристаллографию отнюдь не ограничивается. Георгий Викторович обнаружил, что на форму кристалла во время его роста из раствора влияет сила тяжести, изобрел вращающийся кристаллизатор и научился получать кристаллы правильной формы, открыл закон, согласно которому скорости роста граней кристалла пропорциональны их удельным поверхностным энергиям. «Руководство по кристаллографии», изданное в 1904 г., во многом обобщило его работы в этой науке. В 1913 г. независимо от Л.Брэгга он сформулировал условия интерференционного отражения рентгеновских лучей от атомных плоскостей в кристаллах (формула Брэгга–Вульфа), ставшие основой рентгеновской спектроскопии. Наконец, Вульф первым в России начал рентгеноструктурные исследования.

Был Вульф и в числе первых авторов «Природы», опубликовав в нашем журнале целый ряд статей: «Есть ли что-либо общее у кристаллов и растений?» (1912), «Прохождение рентгеновских лучей через кристаллы» (1913), «Рентгеновские лучи и кристаллы» (1913), «Как растут кристаллы» (1915) и др.

Памяти Георгия Викторовича посвящена предлагаемая читателям подборка, выход которой приурочен к Международному году кристаллографии. Редакция посчитала необходимым повторить статью Георгия Викторовича «Как растут кристаллы». Она интересна сегодня и с точки зрения истории науки, и как прекрасный образец доступного рассказа о сложном. В статье А.Э.Волошина, Л.Н.Рашковича, Е.Б.Рудневой и В.Л.Маноменовой «Выращиваем кристаллы» кратко изложены современные воззрения на проблемы, затронутые в работе Вульфа, которые касаются процессов роста кристаллов и методов их получения, а также затронуты основы физики элементарных ростовых процессов и обсуждаются последние достижения в этой области. Статья А.А.Маслова, Е.В.Черновой и В.М.Щербакова «Георгий Викторович Вульф» рассказывает о жизненном пути ученого и его научном творчестве, о последних годах жизни в Тарусе.



# Как растут кристаллы



Проф. Г.В.Вульф

Всем известно, что кристаллы образуются в жидкости и, раз образовавшись, увеличиваются в размерах — растут. Стоит растворить в воде квасцы или селитру до насыщения, поставить раствор так, чтобы он мог свободно высыхать, и мы через некоторое время заметим появление кристаллов растворенного вещества, и эти кристаллы будут расти. Как ни прост этот опыт, однако большинству он не удается. Во-первых, явление роста кристаллов далеко не так просто, как кажется с начала, а, во-вторых, даже и простые опыты удаются лишь тогда, когда производящий их хорошо понимает суть дела и может избежать осложнений, способных помешать удаче опыта.

Многие думают, что кристаллы растут из насыщенного раствора. Это глубоко ошибочно. Насыщенный раствор содержит в себе ровно столько растворенного вещества, сколько его может раствориться при данной температуре. Чтобы из раствора могло выделиться растворенное вещество, необходимо, чтобы оно содержалось в нем в избытке, чтобы раствор был *пересыщен*. Если раствор лишь *насыщен*, а тем более, если он *недосыщен*, то, очевидно, он не может из себя выделить растворенного в нем вещества. Для того же, чтобы сделать раствор пересыщенным, надо его в большинстве случаев охладить или же удалить из него часть растворителя, высушивая раствор при неизменной температуре. Обыкновенно и пересыщенный раствор не склонен сразу выделить из себя кристаллы, и часто надо бывает или подождать некоторое время, или же бросить в него кристаллик растворенного в нем вещества — *затравку*. Сделать это надо, однако, вовремя, пока раствор не очень пересытился, иначе получится множество мелких кристаллов, а не один или несколько хороших, которые бы нас удовлетворили. Уже этих немногих замечаний достаточно для того, чтобы читатель убедился, что дело сращением хороших кристаллов обстоит не просто.

Надо себе ясно представлять, как растут кристаллы. Мы начнем с явлений, сопровождающих рост кристалла из раствора.

Представим себе, что из раствора выделился кристалл, лежит на дне сосуда и растет. Обычно говорят: нельзя тревожить растущий кристалл и раствор. Если желаем получить хороший

кристалл, пусть кристалл растет спокойно. Мы дальше увидим, насколько справедливо это правило, а теперь спросим себя, под влиянием каких сил осаждаются на кристалле частицы растворенного вещества в таком, по-видимому, спокойном растворе. Первое предположение, которое напрашивается в данном случае, состоит в том, что кристаллы есть центр притягательных сил, распространяющихся на всю массу раствора, и что под влиянием этих сил на кристалл устремляются частицы растворенного вещества из всей массы раствора: кристалл как бы высасывает из раствора вещество. Однако такое предположение было опровергнуто очень простым опытом Франкенгейма еще в 1836 году. Франкенгейм заставлял расти кристалл, покрытый весьма тонким слоем лака, и оказалось, что такой кристалл не растет — силы, с которыми кристалл действует на раствор, распространяются вокруг кристалла на расстояние, меньшее толщины тонкого лакового слоя. Если бы кристалл действовал на частицы раствора подобно магниту, то, разумеется, тонкий слой лака не уничтожил бы такого действия кристалла. Значит, силы, с которыми кристалл действует на раствор, относятся к разряду *молекулярных сил*, действие которых заметно лишь на расстояниях, соизмеримых с расстояниями, отделяющими частицы вещества друг от друга. Таким образом, кристалл питается веществом, находящимся в слое раствора, непосредственно к нему прилегающем. Что же должно сделаться с этим слоем раствора, когда он выделит на поверхность кристалла избыток заключенного в нем твердого вещества? Он, несомненно, станет более легким, чем окружающий его пересыщенный раствор, и начнет всплывать на поверхность раствора. С кристалла вверх потянется струйка более легкого насыщенного раствора. Надо думать, что раствор даже раньше станет подниматься с кристалла вверх, чем отдаст кристаллу весь свой избыток твердого вещества, что этот поднимающийся с кристалла раствор будет еще несколько пересыщен. Английский ученый Майерг очень остроумными опытами доказал, что это именно так, что прилегающий к растущему кристаллу раствор всегда несколько пересыщен, и ему даже удалось измерить степень пересыщения этого слоя раствора. Поднимаясь с кристалла, струйка раствора играет роль тяги

в печной трубе и притягивает снизу и с боков к кристаллу свежие порции пересыщенного раствора, поглощающиеся кристаллом и, в свою очередь, подымающиеся струйкой вверх. Таким образом, кристалл перемешивает свой собственный раствор, и только таким образом он может расти. Итак, раствор с растущим кристаллом вовсе не остается покойным — в нем все время циркулируют токи, его перемешивающие. Для правильности роста кристалла необходимо, чтобы эти токи, которые назовем *концентрационными*, не были слишком энергичны. Автор задался целью изучить влияние этих токов на рост кристалла. Он сделал ряд моментальных фотографий с растущего кристалла при помощи способа Теплера\*, основанного на том, что лучи света меняют свое направление, проходя через среды с различными показателями преломления. Если через раствор пропустить огромный пучок лучей, то этот пучок можно перехватить заслоночкой, как раз достаточной для этого по своим размерам. Если в растворе будут токи другого показателя преломления, чем раствор, то они отклонят части лучей и выведут их из-за заслоночки. Эти лучи и сделают токи светлыми на темном фоне для глаза, помещенного за заслоночкой и смотрящего по направлению к раствору. Вместо глаза можно поместить объектив фотографического аппарата. Прибор, примененный автором, изображен на рис.1. Автор работал с этим прибором в деревне, поэтому и лампа взята керосиновая.

\* Подробности относительно метода Теплера читатели найдут в «Природе» за 1914 год, с.1504. — *Ред.*

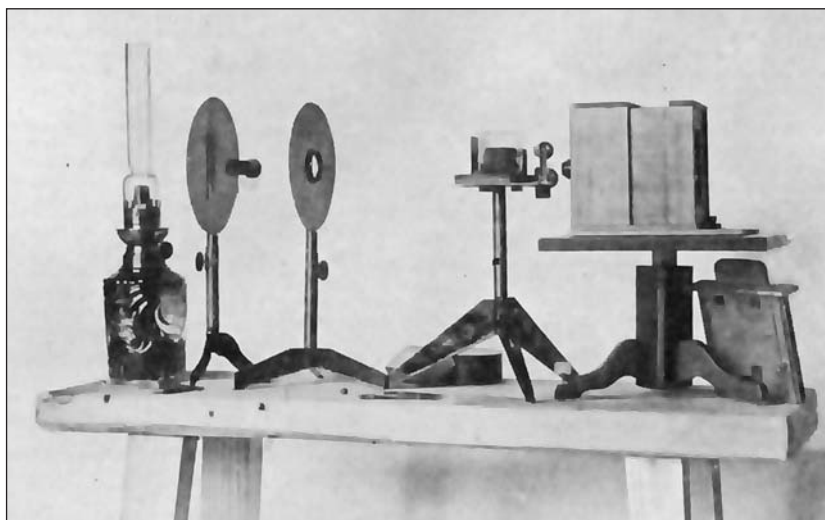


Рис.1. Прибор для фотографирования токов при кристаллизации. Лампа освещает вертикальную щель: лучи от щели, пройдя собирающее стекло, падают параллельным пучком на цилиндрический сосудик с раствором и собираются в виде светлой вертикальной линии на вертикальном ребре заслоночки перед объективом фотографической камеры. Растущий в сосудике кристалл производит токи, отклоняющие лучи, которые и проникают в объектив камеры, направленный на кристаллик.

Моментальная съемка производилась магниезильной вспышкой. Маленький цилиндрический сосудик с раствором служил в то же время и собирающей цилиндрической чечевицей, в фокусе которой помещалась заслоночка. Объективом фотографической камеры служил слабый объектив микроскопа. Снимки, полученные автором, воспроизведены на рис.2.

На этих снимках представлены десять последовательных стадий роста одного кристалла сернокислой цинковоаммиачной соли, отделенных промежутком времени около четырех минут. Изображения больше действительных предметов в 2—6 раз.

На каждом изображении видим кристалл, покоящийся на дне сосудика. Видим также и уровень раствора. От кристалла подымается вверх струйка концентрационного тока, идущая до самого уровня жидкости и отражающаяся от него внутрь толщи раствора, где она расплывается.

Для того чтобы вполне понять таблицу, следует заметить, что кристаллик появился, когда еще раствор не совсем остыл, так что пересыщение при его появлении не достигло еще максимума. Что раствор продолжал охлаждаться во время роста кристалла, на это указывают струйки охлажденного раствора, спускающегося вниз. Эти струйки видны на первых четырех снимках, особенно же резко на третьем. Такой ход явления давал возможность представить более общую картину действия концентрационных токов.

По таблице видно, что энергия концентрационных токов возрастает по мере охлаждения раствора, т.е. по мере увеличения его пересыщения. Из сравнения отдельных изображений можно с ясностью вывести заключение, что *при слабых концентрационных токах кристалл растет гораздо правильнее, чем при сильных*. Действительно, на первых четырех снимках концентрационные токи еще слабы, и форма кристалла показывает правильные плоские грани, пересекающиеся по прямолинейным ребрам. С пятого изображения начинается усиление концентрационных токов, и ему сопутствует искажение правильных очертаний кристалла. На десятом (последнем) изображении токи и искажение формы достигают максимума: токи принимают бурный характер, а форма почти не показывает плоских ограничений. Такое искажение многогранной формы концентрационными токами не может не отразиться и на внутреннем

строении кристалла; кристаллы, выросшие под влиянием сильных концентрационных токов, бывают перепополнены включениями, так что теряют прозрачность. Концентрационные токи влияют на форму кристалла. Они стремятся как бы расплющить кристалл, делая его больше в горизонтальном направлении, чем в вертикальном, предполагая, разумеется, что кристалл растет на плоском горизонтальном дне сосуда. Струйка, поднимающаяся с кристалла, привлекает к нему свежий раствор с боков по дну сосуда. Поэтому твердое вещество отлагается прежде всего на боках кристалла. На верхнюю часть кристалла раствор протекает уже более бедный растворенным веществом. Поэтому кристалл должен больше расти в горизонтальном направлении, чем в вертикальном. Это обстоятельство может сильно исказить форму кристалла. Если кристалл по своей природе должен быть кубом, то при росте его на дне сосуда мы могли бы ожидать, что вырастет лишь верхняя половина куба, так что кристалл будет вдвое ниже, чем если бы он рос свободно подвешенным в жидкости. Однако же при этих условиях кубический кристалл вырастает в призму с квадратным основанием, высота которой меньше половины стороны основания. Теоретическая форма кристалла становится иногда неузнаваемой. Виновницей такого искажения внешней формы кристалла в конечном счете является сила тяжести — это она производит струйки концентрационных токов, и если мы сумеем устранить это одностороннее влияние силы тяжести, направленной по вертикали, то дадим возможность кристаллу получить при росте теоретическую форму. Такого исключения влияния силы тяжести на рост кристаллов автор достиг тем, что заставил кристалл расти во вращающихся кристаллизаторах. Рис.3 представляет такой прибор. Маленький кристаллик прикрепляется на проволоке к плоской крышке цилиндрического сосуда. Сосуд наполняется пересыщенным раствором какого-нибудь вещества и герметически закрывается крышкой так, что кристаллик оказывается погруженным в раствор. Закрытый сосуд вставляется в раму, которая вращается при помощи часового механизма на горизонтальной оси.

Все приспособление, изображенное на рис.3, погружается в термостат большого ящика с водой, температура которой особыми приспособлениями поддерживается постоянно одна и та же.

Растущий кристаллик постоянно вращается около горизонтальной оси прибора, его верхняя

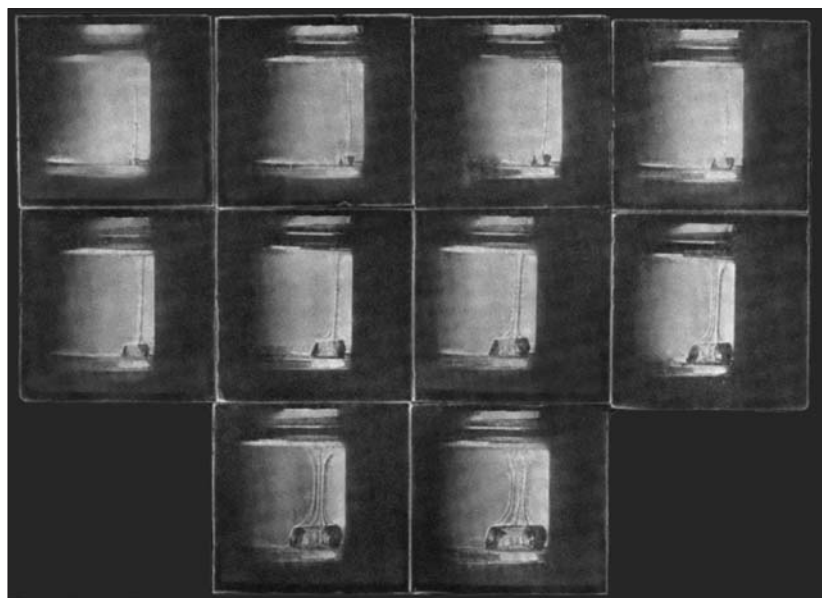


Рис.2. Увеличенные моментальные последовательные снимки с токов, производимых одним и тем же растущим кристаллом.

часть меняется своим местом с нижней, а так как нижняя часть кристаллика в этих условиях растет быстрее боковых, а боковые быстрее верхней, то при вращении скорости роста сравниваются в достаточной степени, чтобы кристаллик мог приобрести форму, независимую от влияния силы тяжести. На рис.4 изображен кристалл квасцов, выросший спокойно на дне кристаллизующего сосуда, а на рис.5 — такой же кристалл, выросший при вращении. Первый кристалл не имеет с октаэдром ничего общего, кроме величины углов, второй же в значительной степени воспроизводит теоретический октаэдр. Мы можем поэтому утверждать, что теоретическую форму кристалл может приобрести лишь при росте во вращающихся

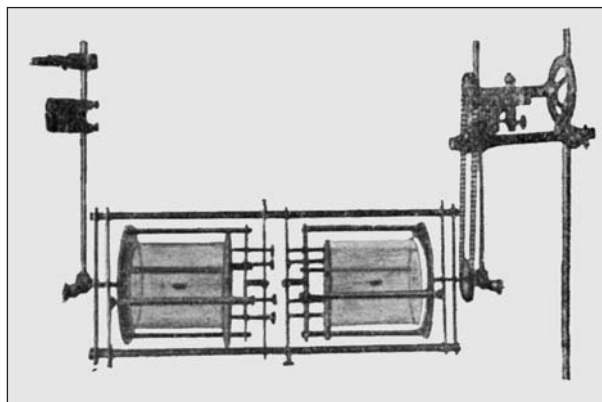


Рис.3. Вращающийся кристаллизатор системы проф. Вульфа. Два герметически закрытых сосуда заключают по прикрепленному к их крышкам кристаллу. Сосуды вставлены в раму, вращающуюся на горизонтальной оси.



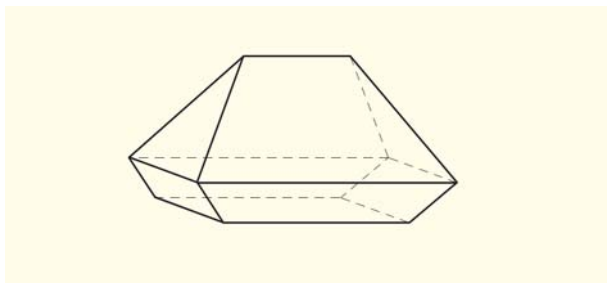


Рис.4. Октаэдрический кристалл квасцов, выросший на дне сосуда.

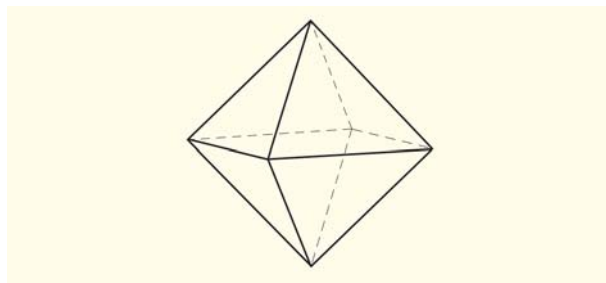


Рис.5. Октаэдрический кристалл квасцов, выросший во вращающемся кристаллизаторе.

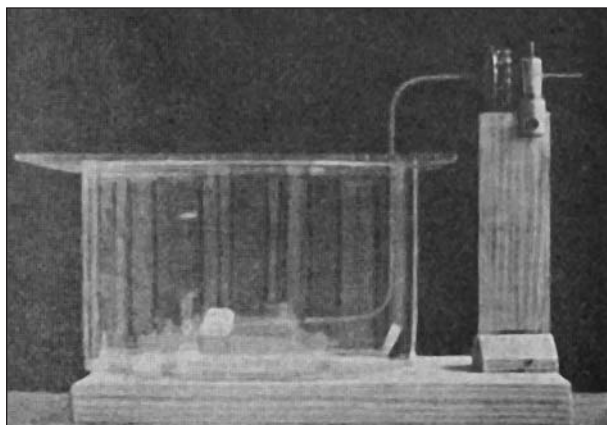


Рис.6. Вращающийся кристаллизатор Шубникова. К краю сосуда прикреплена изогнутая толстая проволока. На внешнем конце ее насажено колесо, соединенное с тонкой проволокой, обматывающей толстую. К тонкой проволоке у дна сосуда прикреплен кристалл. Вращение колеса передается по тонкой проволоке кристаллу.

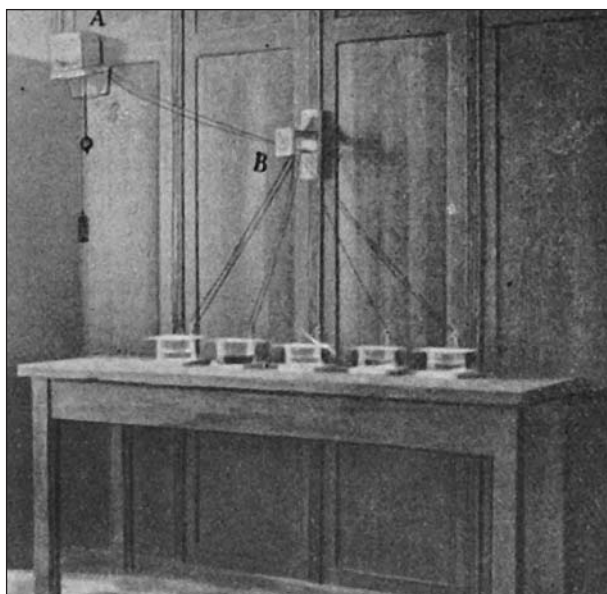


Рис.7. Ряд кристаллизаторов Шубникова, приводимых в действие одним общим часовым механизмом.

кристаллизаторах. Недавно в университете Шаньявского А.В.Шубниковым построен другой тип приборов для той же цели.

В приборе Шубникова (рис.6) вращается не сосуд, а лишь кристаллы, сосуд же остается в покое. В кристаллографической лаборатории автора в университете Шаньявского ведутся опыты и практические занятия с вращающимся кристаллизатором обоих типов. При помощи этих опытов были открыты случаи, когда истинная форма кристаллов была раньше понимаема неправильно, как, например, форма кристаллов двуххромокалиевой соли.

Рис.7 представляет ряд приборов Шубникова, приводимых одновременно в действие часовым механизмом А, висящим на стене. Механизм вращает ось В, от которой идет передача к отдельным сосудам.

Построив вращающиеся кристаллизаторы, автор воспользовался ими для измерения скорости роста кристаллов по различным направлениям. Дело в том, что свойства кристалла одинаковы по параллельным направлениям и различны по направлениям, наклонным друг к другу. В этом состоит так называемая *анизотропия* кристаллов. Когда кристалл растет, то его грани перемещаются параллельно самим себе. Все точки грани А (рис.8) при росте кристалла перемещаются на одинаковое расстояние перпендикулярно к грани, ибо перемещение  $a_1$  должно быть равно  $a_2$ , так как эти перемещения параллельны друг другу. То же скажем и относительно грани В: перемещения  $b_1$  и  $b_2$  равны друг другу, и грань В при росте кристалла перемещается параллельно самой себе. Но расстояния  $a$  не равны вообще расстояниям  $b$ ; так как они не параллельны, а потому при росте кристалла грани А и В удаляются вообще с различными скоростями. При этом скоростью роста грани мы назовем перемещение грани в единицу времени, считая по перпендикуляру к грани.

Автор исследовал скорости роста на кристаллах Моровской соли (двойной сернокислой шестиводной соли аммония и закиси железа) и нашел большую разницу в скоростях роста различных граней: есть грани, скорости роста которых разнятся в три раза.

Измерение скоростей роста различных граней одного и того же кристалла впервые были произведены автором и опубликованы им в его диссертации «К вопросу о скоростях роста и растворения кристаллических граней» в 1895 году\*. Впоследствии появился целый ряд работ по этому вопросу. Десять лет перед тем известный физик Кюри высказал принцип, долженствующий лежать в основе формы, которую кристалл приобретает в растворе. По Кюри в каждом кристалле, погруженном в насыщенный маточный раствор, надо различать 1) внутреннюю энергию, постоянную для всех одинаковой величины участков кристалла, находящихся внутри его и достаточно удаленных от его поверхности, и 2) энергию весьма тонкого переходного слоя у поверхности кристалла: энергия участков кристалла, лежащих у его поверхности, заметно отличается от энергии участков такой же величины, взятых внутри кристалла. Поэтому вся энергия кристалла может быть разделена на две части — одна будет пропорциональна всему объему кристалла, другая пропорциональна переходному слою, т.е. поверхности кристалла. Если тело изменяет свою форму, не изменяя своего объема, то объемная энергия остается постоянной, и вся энергия изменяется пропорционально поверхности. Поверхностная энергия тела, погруженного в жидкость, измеряется его капиллярной постоянной относительно жидкости. Капиллярная постоянная это есть энергия, которую надо затратить, чтобы увеличить поверхность разграничения на единицу. Если тело изъято от всяких сил, кроме капиллярных, т.е. действующих на поверхности его разграничения со средой, его окружающей, то так как всякая система стремится иметь минимум энергии, то и взятое тело стремится принять шаровую форму, ибо у шара поверхность меньше, чем у всякого другого тела, имеющего одинаковый с ним объем. Например, капля масла, погруженная в смесь спирта и воды, принимает шаровую форму, если смесь подобрана так, что капля не тонет и не всплывает.

Кристалл есть многогранное тело, и каждая грань кристалла должна, в силу его анизотропии, характеризоваться особой величиной капиллярной постоянной, которую для граней 1, 2, 3... обозначим через  $K_1, K_2, K_3...$  Если площади граней 1, 2, 3... обозначены через  $S_1, S_2, S_3...$ , то поверхностная энергия каждой грани выразится одним из произведе-

\* Автор считает уместным отметить, что в своей прекрасной популярной книге «Физические состояния вещества», переведенной и на русский язык, французский ученый Ш. Морен (Ch. Mauguain) посвящает полторы страницы (с.64 и 65 русского издания «Матезис» 1912 года) изложению содержания упомянутой диссертации автора, не упоминая, однако же, его фамилии. Морен при этом ссылается на книгу Баумгауэра (H. Baumhauer, Die neuere entwicklung der Kristallographie, в сборнике «die Natur» 1905 года), в изложении которого он, очевидно, и познакомился с исследованиями автора.

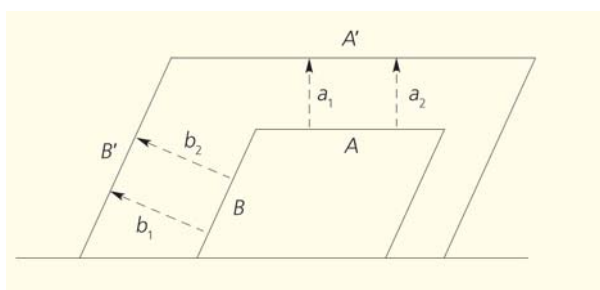


Рис.8. Растущий кристалл в двух последовательных состояниях роста. Грани перемещены параллельно, но не на одинаковое расстояние.

ний  $K_1S_1, K_2S_2, K_3S_3...$  Вся поверхностная энергия кристалла, которую обозначим через  $E$ , получится сложением энергии отдельных граней, так что

$$E = K_1S_1 + K_2S_2 + K_3S_3 + \dots$$

Согласно принципу Кюри, устойчивой формой кристалла, т.е. такой формой, которая не будет изменяться со временем, если кристалл останется в растворе неопределенно долгое время, будет та, для которой величина  $E$  будет наименьшей при постоянном объеме кристалла. Этот принцип позволил Кюри получить формулы, по которым мы бы могли вычислить форму кристалла, если бы знали капиллярные постоянные для различных граней кристалла. Для примера возьмем кристалл, представленный на рис.9, ограниченный одновременно и гранями куба и гранями октаэдра. Если обозначить капиллярные постоянные куба через  $C$ , а октаэдра через  $O$ , если далее все ребро куба обозначить через  $B$ , а отрезок этого ребра, считая от вершины куба, отсекаемый октаэдрической гранью, через  $X$ , то Кюри вычисляет

$$\frac{X}{B} = \frac{3}{2} - \frac{O}{C} \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Зная отношение  $O:C$ , мы могли бы знать и величину  $X$  относительно  $B$ , т.е. форму кристалла.

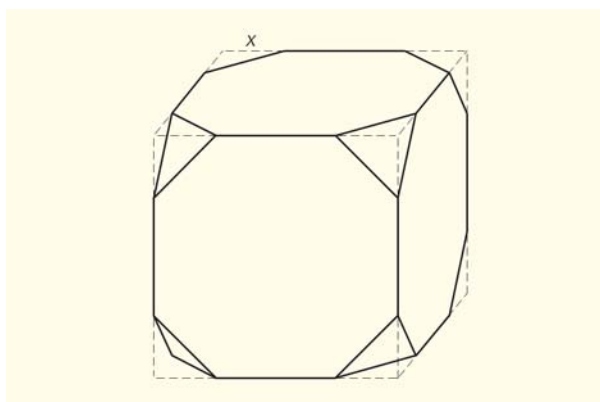


Рис.9. Комбинация куба с октаэдром. Октаэдр образует треугольные площадки на углах куба.

Рассматривая формулы Кюри, автор заметил, что они могут быть значительно упрощены, если форму кристалла определить длиной перпендикуляров, опущенных из особой точки внутри кристалла на его грани, причем предполагается, что направления перпендикуляров вполне известны и независимы от роста кристалла. Оказалось, что устойчивой формой кристалла будет та, при которой длины этих перпендикуляров будут относиться, как капиллярные постоянные отдельных граней. Иными словами, если представить себе кристалл, начинающий расти в какой-либо точке маточного раствора и если провести грани кристалла на расстояниях от этой точки, пропорциональных их капиллярным постоянным, то мы получим устойчивую форму кристалла. Очевидно, что идя обратно, измеряя относительную скорость роста различных граней кристалла, как это и делал автор, мы тем самым измеряем и относительные величины капиллярных постоянных граней кристалла. В таком дополненном виде принцип Кюри получил название принципа Кюри—Вульфа и стал применяться к решению задач, не имеющих на первый взгляд ничего общего с кристаллофизикой. Представим себе, например, что необходимо сделать прямоугольный параллелепипед  $ABCDEFGH$  (рис.10) объемом в 1000 единиц и покрыть его грани слоем трех металлов, положим, золотом, серебром и медью, притом так, чтобы верхняя и нижняя грань были вызолочены, обе боковые высеребрены, а передняя и задняя покрыты медью. Предположим далее, что стоимости покрытия золотом, серебром и медью на единицу поверхности относятся, как  $25 : 5 : 1$ \*. Спрашивается, какие размеры надо дать ребрам параллелепипеда, чтобы стоимость его была наименьшая? Для решения этой задачи

\* Числа взяты произвольно.

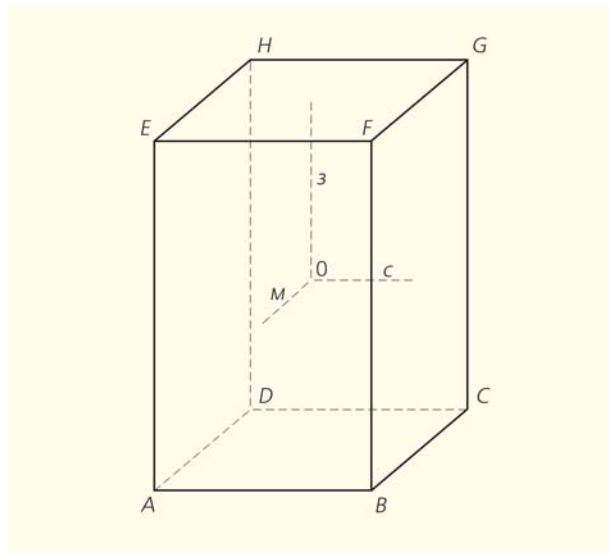


Рис.10.

обратимся к началам геометрии и к принципу Кюри в формулировке автора. Из центра  $O$  параллелепипеда опустим перпендикуляры на грани и обозначим длину этих перпендикуляров через  $z$ ,  $c$  и  $m$ . Стоимость покрытия металлами поверхности параллелепипеда приравняем поверхностной энергии этого тела и тогда по принципу Кюри для условия наименьшей энергии тела при данном его объеме мы получим условие

$$z : c : m = 25 : 5 : 1.$$

Обозначив через  $a^3$  коэффициент пропорциональности, мы найдем, что объем нашего параллелепипеда равен, с одной стороны,  $a^3 \times 25 \times 1$ , а с другой — 1000. Приравняв эти два числа, найдем уравнение  $a^3 \times 25 \times 5 \times 1 = 1000$ , откуда  $a^3 = 8$  или  $a = 2$ .

Таким образом, искомые стороны параллелепипеда будут равны  $2 \times 25 = 55$ ,  $2 \times 5 = 10$  и  $2 \times 1 = 2$  единиц длины. Для золоченой поверхности мы получим стоимость покрытия в  $2 \times 10 \times 2 \times 20 = 1000$  единиц стоимости медной, для серебряной  $50 \times 2 \times 2 \times 5 = 1000$  таких единиц и для медной  $50 \times 10 \times 2 \times 1 = 1000$  таких единиц. Общая стоимость покрытия поверхности будет 3000 единиц стоимости покрытия единицы поверхности медью. Попробуем проверить, действительно ли эта стоимость наименьшая. Сделаем куб вместо параллелепипеда. Тогда  $z = c = m$ , и мы получим  $a^3 = 1000$ , или  $a = 10$ . Наши поверхности будут иметь по 100 квадратных единиц, и стоимость покрытия их будет: для золотой 2500, для серебряной 500 и для медной 100 единиц стоимости покрытия медью единицы поверхности. Всего, значит, получим 3500 единиц стоимости, на 500 единиц больше, чем прежде. С другой стороны, рассуждая так, что золочение всего дороже, а потому выгоднее взять под него наименьшую поверхность, что покрытие медью всего дешевле, так что медную поверхность следует взять как можно больше, мы можем задать такие размеры нашему параллелепипеду, чтобы ребра его были равны 2, 4 и 125 линейных единиц, причем золотая поверхность будет  $2 \times 4 \times 2 = 16$ , серебряная  $2 \times 125 \times 2 = 500$  и медная  $4 \times 125 \times 2 = 1000$  квадратных единиц. Стоимость покрытия поверхностей, исчисленная в единицах покрытия медью, будет  $25 \times 16 + 5 \times 500 + 1000 = 3900$ . Опять получается число большее, чем вычисленное по принципу Кюри.

Приведенный пример показывает, с одной стороны, что приложимость принципа Кюри далеко выходит за пределы кристаллофизики, с другой же, он объясняет его значение как частного случая гораздо более общего принципа экономии, лежащего в основании явления природы: природа стремится все произвести с наименьшей затратой энергии. Но одно утверждение, что явление принимает данное течение благодаря тому, что природа стремится так или иначе осуществить принцип экономии, нам не может заменить точного объяснения явления, и мы тогда только будем



удовлетворены, когда нам удастся путем анализа всего явления проследить, как этот принцип экономии осуществляется в каждом данном случае. В нашем случае роста кристаллов мы можем отдать себе отчет в этом следующим образом. Из своей формулировки принципа Кюри автор вывел следствие, что объем вещества, отлагающегося при кристаллизации на какой-нибудь грани кристалла, пропорционален поверхностной энергии этой грани, и что вообще поверхностная энергия кристалла пропорциональна работе, затраченной на образование всего кристалла. Вывод этот прост до очевидности. Положив его в основу наших рассуждений, мы легко сообразим, что та грань растет быстрее, т.е. удаляется быстрее от начальной точки появления кристалла, энергия которой больше, а так как быстро растущие грани исчезают более или менее быстро, то на кристалле остаются лишь грани, энергия которых наименьшая, так что вся внешняя энергия кристалла «стремится» стать наименьшей. Что быстро растущие грани действительно стремятся уменьшиться в размерах и даже исчезнуть по мере роста кристалла, это видно на рис.11, где представлены три грани кристалла с различными скоростями роста. Грани 1 и 3 растут медленнее грани 2, находящейся между ними, а потому грань 2 уменьшается в размерах и, наконец, совсем исчезает, тогда как грани 1 и 3 продолжают до взаимного пересечения.

Когда автор опубликовал свою формулировку принципа Кюри, она привлекла на себя внимание как математиков, так и физиков. Математики заметили, что в своем доказательстве автор не принял в расчет связи между отдельными гранями, не ввел в вычисление того влияния, какое оказывает растущая грань на величину и форму соседних граней. Английский математик Гильтон (Hilton) предложил более совершенный в математическом смысле вывод, но пришел к тому же результату, что и автор, т.е. что скорости роста гра-

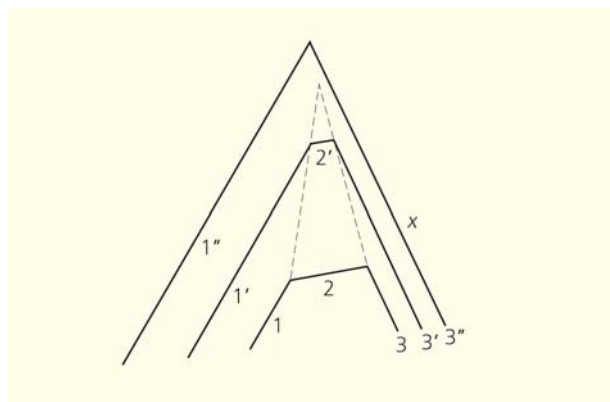


Рис.11. Часть растущего кристалла в трех последовательных состояниях роста. Средняя грань, наиболее быстро растущая, через некоторое время исчезает.

ней пропорциональны их удельной поверхностной энергии (капиллярной постоянной). Такое совпадение результатов можно выразить в положении, что при росте кристаллов грани кристалла растут независимо друг от друга. При самом образовании кристалла в растворе он уже получает форму, отвечающую наименьшей величине поверхностной энергии, и эта форма остается при росте подобной самой себе, если остаются неизменными условия роста.

С точки зрения физики принцип Кюри, особенно же в его формулировке, данной автором, возбудил также сомнения, высказанные в научной литературе. Принцип этот выведен для условий равновесия между кристаллом и маточным раствором. Можно ли говорить о равновесии между кристаллом и раствором, если кристалл растет? Французскому ученому Фридэлю кажется, что ничего подобного нельзя говорить, что при росте кристалла ни о каком равновесии не может быть речи. В равновесии могут быть лишь кристалл и насыщенный раствор его вещества, но в таком растворе кристалл не изменяется, и, следовательно, в равновесии с насыщенным раствором может находиться кристалл любой формы. Это возражение не соответствует действительности. Всякому, кто занимался кристаллизацией веществ из раствора, известно, что если положить в пересыщенный раствор кристалл, то далеко не всегда он остается однородным при дальнейшем росте: по большей части он растет неправильно, включая в себя муть из пузырьков маточного раствора, скопляющуюся особенно густо под ребрами кристалла, там, где грани соприкасаются. Это показывает, что при своем дальнейшем росте грани уже перестают расти независимо друг от друга и взаимно нарушают правильность роста. Наоборот, кристалл, выросший самостоятельно рядом с положенным в раствор, вырастает вполне однородно. Это показывает, что для всякой степени пересыщения раствора есть своя определенная форма кристалла, что скорость роста граней кристалла, а, следовательно, и их поверхностная энергия зависят от пересыщения раствора. Таким образом, может расти вполне нормально, оставаясь вполне однородным, лишь такой кристалл, форма которого находится в равновесии с раствором, а эта форма должна удовлетворять принципу Кюри. Таким образом, принцип Кюри лежит в основе явлений роста кристаллов. А.В.Шубников в кристаллографической лаборатории университета Шаньянского произвел целый ряд исследований, направленных к уяснению зависимости между формой кристалла и пересыщением раствора, в котором кристалл растет.

На рисунке 12 (a, b, c, d, e) изображена форма кристаллов квасцов, росших из растворов, все менее и менее пересыщенных. Кристаллы лежали на горизонтальном дне сосуда, с которым совпадает плоскость чертежа. Рассматривая внимательно

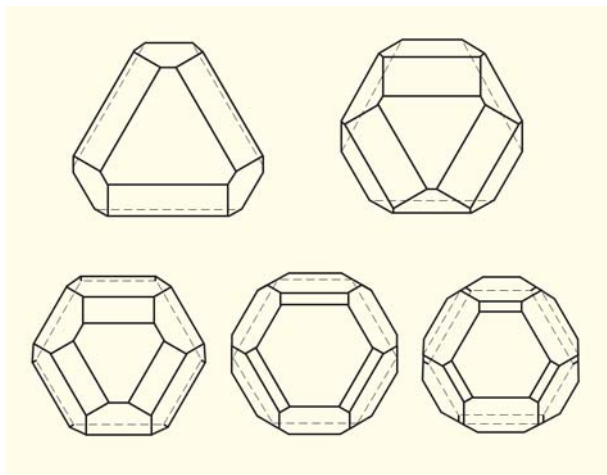


Рис.12. Кристаллы квасцов, выросшие на горизонтальном дне сосуда (параллельном плоскости чертежа) при различных пересыщениях раствора — первый при наибольшем, последний при наименьшем. Последний наиболее изъят от действия силы тяжести, благодаря слабым токам, а потому наиболее приближается к шаровидной форме капли.

рисунок, мы видим, что по мере уменьшения пересыщения, форма кристалла все более и более округляется, как бы приближаясь к шару. Ясно, что по мере падения пересыщения, концентрационные токи ослабевают, иначе ослабевает и влияющие силы тяжести на растущий кристалл. Он становится похож на каплю жидкости, взвешенную в другой жидкости, одинакового с нею удельного веса, а такая капля, как это было сказано, принимает такую форму.

Перемешивание раствора концентрационными токами возможно лишь до некоторого предела. По мере уменьшения пересыщения раствора от выделения вещества на кристалле, струйка с кристалла подымается все медленнее и медленнее. Рост кристалла тоже замедляется в соответствии с этим. Наконец струйка вовсе перестанет подыматься с кристалла. Приток свежего раствора к кристаллу прекратится, прекратится и рост кристалла. При этом раствор еще останется пересыщенным, так что возможно возникновение новых маленьких кристаллов. Стоит лишь взболтать такой, по-видимому уже неспособный кристаллизоваться, раствор, и мы увидим, что он помутнеет от выделения множества мелких кристалликов. Однако же нельзя утверждать, что рост кристалла в отсутствие концентрационных токов совершенно прекращается. Пока раствор еще пересыщен, возможен рост кристаллов путем диффузии. Частицы растворенного вещества проникают в беднеющий веществом слой раствора, прилегающий к кристаллу, вследствие того, что эти частицы находятся в непрерывном движении. Они как бы проталкиваются собственным движением в места, где их меньше, и пополняют беднеющее пересы-

щение раствора у самой поверхности кристалла. Однако диффузия совершается крайне медленно, и рост кристалла под ее влиянием идет гораздо медленнее, чем под влиянием концентрационных токов. Практически он вовсе прекращается с прекращением последних. На кристаллах одних веществ токи прекращаются раньше, чем на других, по причинам, которых здесь мы касаться не станем. Вследствие этого некоторые вещества можно получить в больших кристаллах, другие очень трудно или совершенно невозможно. Это разнообразие в величине кристаллов различных веществ напоминает разнообразие в росте животных и растений различных видов и часто приводит в пример аналогии между кристаллами и организмами. Читатель уже на основании вышеизложенного может себе ясно представить, насколько эти аналогии основаны на поверхностном знании дела. Однако идеи о сходстве между кристаллами и организмами очень увлекательны, так как они питают в нас надежду открыть, наконец, таинственный мост, перекинутый между областями неорганического и органического мира. Поэтому они легко находят себе распространение в широкой публике, и мы надеемся побеседовать о них с читателем «Природы» в ближайшем будущем.

Что касается роста кристалла из застывающих жидкостей, то по существу он не отличается от роста из раствора. Точно так же рост должен вызываться вокруг кристалла токи, только здесь токи будут не концентрационные, а конвекционные. Дело в том, что процесс затвердевания, кристаллизации, сопровождается выделением тепла, и нагретый слой жидкости, прилегающий к кристаллу, делается обыкновенно более легким и устремляется вверх, притягивая на свое место жидкость более низкой температуры\*. Если жидкость очень вязка, то нагретый слой раствора не успевает подняться с кристалла, и кристаллизация может приостановиться, пока слой не отдаст своего избытка тепла соседним слоям раствора. Если при этом и теплопроводность раствора мала, то рост кристалла будет происходить периодически, то более, то менее быстро. Автору удалось недавно открыть явление, подтверждающее правильность этих соображений. Наблюдения автора касаются кристаллизации уксуснокислого холестерина и еще не опубликованы в специальных научных органах. Они вкратце следующие. Из расплавленной жидкости уксуснокислый холестерин кристаллизуется не сразу, а дает твердую тонкую,

\* Обратное наблюдается при кристаллизации воды. Как известно, лед легче воды, а потому он образуется на поверхности воды, когда температура воды станет ниже 0°. Образование льда сопровождается выделением тепла. От этого окружающая лед вода нагревается. Но нагреваясь выше 0°, вода становится плотнее и должна опуститься вниз, уступив свое место наверху более холодной воде, поддерживающей дальнейшее образование льда.

ультрамикроскопическую муть, собирающуюся в комочки определенного строения, получивших название жидких кристаллов. При дальнейшем остывании начинает кристаллизоваться жидкость, в которой заключена муть. Появляются великолепные лучистые кристаллические сростки (сферолиты) твердого уксуснокислого холестерина. Эти сферолиты изображены на микрофотограмме рис.13, сделанной в поляризованном свете. Все поле зрения разбито на участки гиперболическими линиями. Внутри каждого участка видна точка, из которой расходятся лучами кристаллы. Четыре пучка кристаллов образуют темный крест, так как расположенные в этих пучках кристаллы тушат поляризованный свет. Увеличение этой микрофотограммы сравнительно небольшое — раз в 30. Если рассмотреть часть сферолита при очень большом увеличении, то мы заметим, что выходящие из общего центра кристаллические волокна усеяны поперечными равноотстоящими полосками, попеременно более и менее темными, так что одинаковые полосы отделены друг от друга расстоянием в одну тысячную долю миллиметра. Полоски эти хорошо видны на микрофотограмме рис.14, снятой при увеличении в 2500 раз. Полоски состоят из мути, захваченной кристаллами при их росте. Что в полосках действительно заключается муть, это доказывается следующим наблюдением. Получив сферолиты уксуснокислого холестерина в виде тонкого слоя между двумя стеклышками, станем смотреть через этот слой на пламя свечи. Двигая в стороны препарат, мы заметим, что он окрашивается цветами радуги, и каждому положению препарата отвечает свой цвет — наименьшему сдвигу препарата, при котором видны цвета, отвечает фиолетовый цвет, наибольшему — темно-красный. Явление это прямо вытекает из описанного строения сферолитов: темные полосы, чередуясь со светлыми, образуют так называемую дифракционную решетку, разлагающую белый свет свечи на составляющие его части, окрашенные в спектральные цвета. Оказывается, что разложенный препаратом свет вдобавок поляризован, притом так, как поляризует свет тонкая ультрамикроскопическая муть. Поэтому автор полагает, что рост кристаллов уксуснокислого холестерина происходит неравномерно, скачками, в зависимости от накопления и рассеяния теплоты, образующейся при кристаллизации. Эта неравномерность роста обнаруживается лишь благодаря присутствию мути в кристаллизующейся жидкости и благодаря тому, что эта муть отлагается более или менее густо, в зависимости от скорости кристаллизации. Надо думать, что при всякой кристаллизации рост кристалла совершается подобным же образом, скачками, что кристаллизация никогда не совершается вполне изотермически, при вполне неизменной температуре, а всегда сопровождается колебаниями температуры.

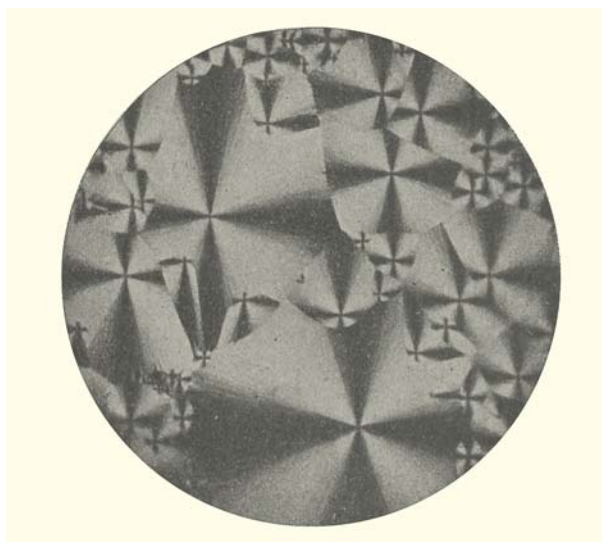


Рис.13. Сферолиты (лучистые собрания тонких кристаллов) уксуснокислого холестерина. Благодаря поляризации света видны темные кресты, проходящие через центры сферолитов. Сферолиты разграничены гиперболическими кривыми.

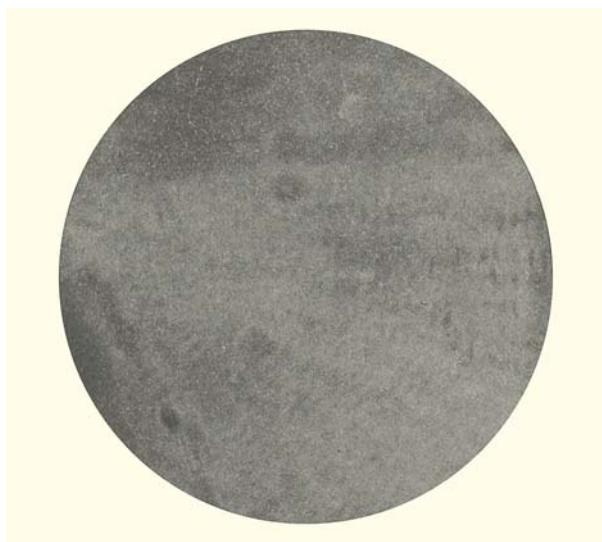


Рис.14. Часть сферолита уксуснокислого холестерина, увеличенная в 2500 раз. Видны светлые и темные полосы, образованные неравномерным включением ультрамикроскопической мути. Неравномерность включения мути обусловливается периодическим ускорением и замедлением роста кристаллов, в зависимости от накопления и рассеяния тепла при кристаллизации.

Читатель теперь видит, что процесс кристаллизации вовсе не так прост, как может показаться с первого взгляда. Напротив, для того, чтобы овладеть вполне искусством растить хорошие однородные, большие кристаллы, надо поглубже вникнуть в явления, сопровождающие рост кристаллов. ■



# Выращиваем кристаллы



А.Э.Волошин, Л.Н.Рашкович, Е.Б.Руднева, В.Л.Маноменова

Замечательная статья Георгия Викторовича Вульфа «Как растут кристаллы» (опубликованная в сентябрьском номере журнала «Природа» за 1915 г.), как, впрочем, и все работы этого выдающегося русского кристаллографа, посвящена изучению роста кристаллов в растворе и анализу наблюдаемых явлений. На основании очень простых, но остроумных экспериментов Вульф смог сделать абсолютно верные выводы и описать много интересных особенностей процесса кристаллизации, которые сегодня кажутся очевидными. Между тем необходимо помнить, что в то время полностью отсутствовали как теоретические, так и экспериментальные предпосылки, необходимые для объяснения механизмов роста кристаллов на элементарном уровне. Только что (в 1912 г.) состоялось открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке, а знания об атомном строении кристаллов находились на самом начальном уровне. Соответственно, не были развиты представления о точечных дефектах структуры. Хотя математическая теория дислокаций и была разработана В.Вольгеррой в 1905 г., однако представления о дислокациях были введены в физику твердого тела лишь в 1934 г., а их роль при росте кристаллов была установлена только в конце 1940-х годов. Вопросы захвата примесей при росте кристаллов стали планомерно исследоваться лишь с начала 1950-х годов, как и вопросы воздействия примесей на рост кристаллов.

Тем больший интерес для современного читателя представляет эта работа Георгия Викторовича, которая не только демонстрирует талант выдающегося ученого, но и позволяет оценить тот огромный путь, который прошла наука за истекшие 100 лет. В нашей статье мы попытались дать краткое описание современных воззрений на проблемы, затронутые в работе Вульфа. Естественно, мы не могли охватить здесь все вопросы, связанные с процессами роста кристаллов, методами их получения и достижениями в этой области. Поэтому ограничимся очень сжатым изложением основ физики элементарных процессов роста.

## Что такое кристаллизация?

Процесс перехода вещества из жидкого или газообразного состояния в кристаллическое в классическом его варианте не связан с изменением химического состава рассматриваемой системы. Это фазовый переход первого рода. Как и все фазовые переходы, процесс кристаллизации отличается тем, что равновесие взаимодействующих фаз имеет место лишь при определенных значениях температуры и давления и описывается равенством их термодинамических потенциалов:

$$\Delta G_1 = \Delta H_1 - T\Delta S_1 = \Delta G_2 = \Delta H_2 - T\Delta S_2.$$

Здесь  $\Delta H_i$  и  $\Delta S_i$  ( $i = 1, 2$ ) — соответственно теплота и энтропия образования одной и другой фазы. Термодинамический потенциал  $\Delta G_i$ , или свободная энергия, представляет собой ту часть полной энергии системы, которая может быть преобразована в работу (в данном случае имеется в виду работа по переносу вещества из одной фазы в другую). Если равновесие в системе нарушается, возникает разность термодинамических потенциалов — движущая сила процессов кристаллизации или обратных ей (плавления, растворения, десублимации — в зависимости от кристаллизующей фазы):

$$\Delta G_{12} = \Delta H_{12} - T\Delta S_{12}.$$



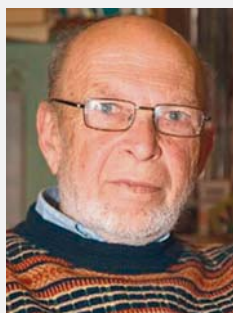
Кристаллы дигидрофосфата калия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , KDP), выращенные из водных растворов на точечной затравке методом снижения температуры.

Фотографии предоставлены

Институтом кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН



**Алексей Эдуардович Волошин**, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН, лауреат премии Правительства РФ. Представитель России в Международной организации по росту кристаллов. Область научных интересов — дефекты структуры кристаллов, рентгеновские дифракционные методы исследования структуры кристаллов, рост кристаллов.



**Леонид Николаевич Рашкович**, доктор химических наук, профессор физического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Лауреат премии Лодиза Международной организации по росту кристаллов. Научные интересы связаны с проблемами роста кристаллов.



**Елена Борисовна Руднева**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН, лауреат премии Правительства РФ. Область научных интересов — рост кристаллов, дефекты структуры кристаллов.



**Вера Львовна Маноменова**, кандидат химических наук, научный сотрудник того же института, лауреат премии Правительства РФ. Занимается проблемами роста кристаллов.

Здесь  $\Delta H_{12}$ ,  $\Delta S_{12}$  — теплота и энтропия плавления (растворения). Величина  $\Delta G_{12}/R_M T$  дает общее для всех случаев описание понятия пересыщения ( $R_M$  — универсальная газовая постоянная). Можно показать, что в случае кристаллизации из раствора относительное пересыщение будет определяться следующей формулой:

$$\sigma = \Delta G_{12}/R_M T \approx \frac{\Delta C}{C_0},$$

где  $C_0$  и  $\Delta C$  — соответственно равновесная и избыточная концентрации вещества в растворе.

При положительном пересыщении процесс кристаллизации на макроскопическом уровне выглядит как однонаправленный процесс увеличения массы кристаллической фазы и уменьшения массы жидкой фазы, при этом чем больше пересыщение, тем больше скорость прироста массы кристалла.

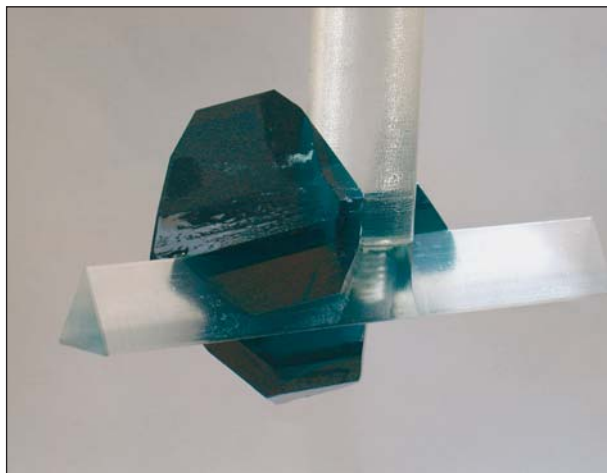
Однако на атомарном уровне, т.е. на уровне элементарных актов, взаимодействие кристалла с жидкой или газовой средой выглядит как флуктуационный процесс большого числа событий присоединения к поверхности кристалла или отрыва от нее строительных единиц, которыми могут быть атомы, ионы, молекулы или их ассоциаты. В состоянии равновесия количество присоединяющихся в единицу времени частиц равно числу уходящих, в отсутствие равновесия баланс изменяется в ту или иную сторону, приводя к увеличению массы той или иной фазы.

Анализ процесса кристаллизации на атомарном уровне позволяет установить его важные закономерности, определяющие механизм и особенности реализации в различных условиях. В этом случае удобнее оперировать термодинамическими величинами, отнесенными к одной частице. Так мы приходим к понятию химического потенциала, который равен:

$$\Delta \mu = \Delta G/N_A = \Delta h - T \Delta s,$$

где  $N_A$  — число Авогадро, а  $\Delta h = \Delta H/N_A$  и  $\Delta s = \Delta S/N_A$ . При этом химический потенциал равен работе, которую необходимо затратить на удаление одной частицы из данной фазы, а величина  $\Delta h$  характеризует взаимодействие частицы с другими строительными единицами данной фазы, т.е. позволяет оценить энергию химической связи.

Простая модель кристалла была предложена В.Косселем, допустившим, что строительные единицы (атомы, ионы или молекулы и их комплексы) — это кубики, плотно упакован-



«Паразитный» кристалл  $\alpha$ -гексагидрата сульфата никеля ( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\alpha$ -NSH), обросший мешалку кристаллизатора.

ные в кристалле. Грани кубиков соединены друг с другом связями с одинаковой энергией. Каждая, не имеющая соседей, грань кубика образует некомпенсированную связь. Сумма таких связей дает поверхностную энергию грани.

Если рассмотреть возможные положения частиц в решетке кристалла, можно выделить шесть неэквивалентных позиций. Их различие заключается в количестве некомпенсированных (оборванных) связей. Так, например, наибольшее число оборванных связей имеет частица на поверхности. Такая частица слабее всего удерживается кристаллом и может легко оторваться от него под воздействием тепловых колебаний. Наиболее прочно с кристаллом связана частица в объеме кристалла, все связи которой насыщены.

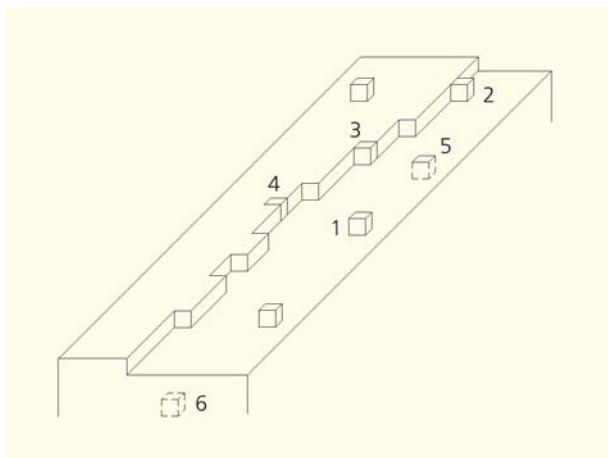


Схема поверхности кристалла (показан только один слой, высота которого имеет размер строительной единицы) с простой кубической решеткой и возможные положения атомов: 1 — на поверхности; 2 — на ступени; 3 — в изломе; 4 — в ступени; 5 — в поверхностном слое; 6 — в объеме.

С точки зрения процесса роста кристалла самым важным оказывается положение в изломе. Это вызвано тем, что присоединение к излому частицы воспроизводит начальную конфигурацию поверхности и не меняет на ней числа некомпенсированных связей, т.е. поверхностной энергии кристалла. По этой причине изменение внутренней энергии кристалла при отрыве частицы из излома равно теплоте фазового превращения (испарения, плавления) в расчете на одну частицу. Неизменность поверхностной энергии в этом случае означает также, что химический потенциал частицы в изломе равен химическому потенциалу кристалла. Соответственно, работа по переводу частицы из излома в среду равна разности химических потенциалов среды и кристалла. Значения работы по переводу частиц из других положений на поверхности в среду уже не равны указанной разнице, так как при этом меняется энергия поверхности.

Из сказанного, в частности, следует, что присоединение или отрыв частицы от излома может происходить при любой разнице химических потенциалов среды и кристалла, т.е. при *любом* пересыщении, которое выражается через разницу химических потенциалов как

$$\sigma = \Delta\mu_{12}/k_B T \approx \frac{\Delta C}{C_0},$$

где  $k_B$  — константа Больцмана. Соответственно, рост кристалла за счет присоединения частиц в изломы может происходить при сколь угодно малом положительном пересыщении. При этом также важно, что после присоединения частицы сам излом не исчезает, а лишь перемещается, обеспечивая возможность последующих присоединений частиц. Чем больше изломов, тем при прочих равных условиях быстрее растет кристалл.

Таким образом, умозрительный анализ, который впоследствии, особенно после изобретения атомно-силовой микроскопии, был неоднократно подтвержден экспериментально, показывает, что рост кристалла осуществляется за счет присоединения частиц к изломам. Важно отметить, что на процесс роста должно влиять состояние поверхности кристалла, а именно, количество и расположение на ней изломов.

## Структура поверхности

На поверхности кристалла есть гладкие участки, ступени, ограничивающие ростовые слои, адсорбированные частицы и вакансии на плоских участках. Если таких частиц много, грань называется атомно-шероховатой, в противном случае — атомно-гладкой.

Очевидно, что при нормальных условиях абсолютно атомно-гладкой поверхности быть не может: на ней всегда в том или ином количестве будут присутствовать адсорбированные атомы или



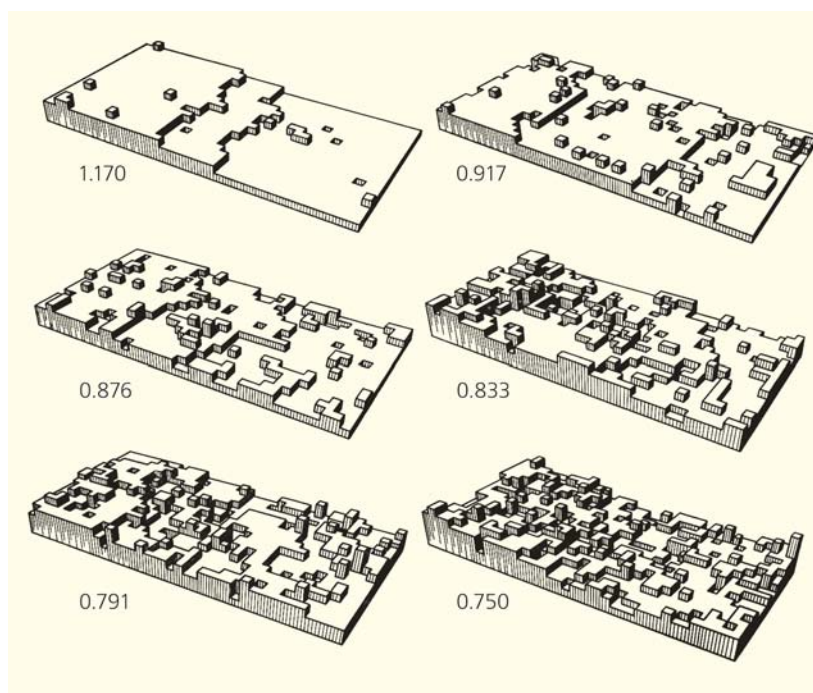
вакансии. Также очевидно, что четкой границы между атомно-гладкой и атомно-шероховатой поверхностями нет. Анализ показывает, что при малом количестве адсорбированных атомов на поверхности энергетически выгодно их объединение в области, ограниченные ступенями. Таким образом, атомно-гладкой считается поверхность, на которой возможно существование ступеней.

В случае, когда поверхность атомно-шероховатая, плотность изломов на ней очень велика и строительные единицы могут присоединяться практически к любому ее месту. Такой механизм роста называется нормальным. Важная особенность этого механизма заключается в том, что различные участки поверхности имеют возможность индивидуально реагировать на изменение условий роста. Вследствие этого поверхность кристалла принимает форму теплового или концентрационного поля среды вокруг кристалла.

Так, например, кристаллы, выращиваемые из расплава, зачастую имеют цилиндрическую форму.

При росте на атомно-гладкой поверхности изломы локализованы преимущественно на торцах ступеней. В этом случае рост кристалла происходит за счет движения ступеней, при этом поверхность кристалла остается плоской и может перемещаться только параллельно самой себе. Такой механизм роста называется послойным, его отличительная особенность — рост ограниченных кристаллов.

К.А.Джексоном в 1958 г. [2] был получен критерий, согласно которому при  $\Delta h/k_b T < 2$  поверхность считается атомно-шероховатой, а при  $\Delta h/k_b T > 5.3$  — атомно-гладкой. В интервале  $2 < \Delta h/k_b T < 5.3$  возможны оба варианта. По сути, критерий Джексона устанавливает соотношение между прочностью кристаллической решетки и кинетической энергией атомов. Величина  $\Delta h$  для различных кристаллов варьирует в пределах полутора порядков, однако при этом также меняется и температура плавления. Поэтому основной фактор, определяющий величину  $\Delta h/k_b T$ , — это температура проведения процесса. При росте из растворов, который проходит при температуре значительно меньшей, чем температура плавления, почти всегда наблюдается послойный рост. В свою очередь, рост по нормальному механизму обычен при выращивании кристаллов из расплава, хотя послойный рост часто наблюдается и в этом случае.



Атомная структура плотноупакованной грани и переход от атомно-гладкой к атомно-шероховатой поверхности по результатам численного моделирования методом Монте-Карло [1]. Числа дают значения  $w/k_b T$ , где  $w$  — избыточная энергия границы кристалла в расчете на одну связь.

Различие в механизмах роста кристаллов оказывает влияние и на другие процессы, в том числе на процессы образования в них дефектов. При этом, безусловно, сильное влияние оказывают и условия роста кристалла: давление, температура и скорость ее снижения, пересыщение, температурные и концентрационные градиенты, интенсивность перемешивания жидкой фазы и распределение в ней потоков, химический состав кристалла и жидкой фазы и др. Чтобы понять влияние различных факторов на структурное совершенство кристаллов, рассмотрим далее вопросы массообмена при их росте.

В кристаллической структуре как природных, так и искусственно выращенных кристаллов всегда имеются нарушения. Это посторонние точечные и объемные включения, дислокации и дефекты упаковки, границы между секторами роста граней (секториальные границы), между секторами дислокационных холмиков на поверхностях граней (вицинальные границы) и полосы роста, обусловленные неравномерным распределением примесей, а также многое другое. Все это может приводить к ухудшению разнообразных физических свойств кристаллов.

Бытует мнение, что чем медленнее растет кристалл, тем выше его совершенство. Оно основано на представлении о присоединении строительных единиц к кристаллу путем проб и ошибок. Тогда чем больше у них времени для попыток встроить-

ся в кристалл, тем больше шансов, что это будет сделано правильно. Это действительно правильно в отношении уменьшения плотности точечных дефектов в кристалле. Однако для многих применений кристаллов, особенно в оптике, главными являются постоянство показателя преломления в их объеме, отсутствие включений и других объемных дефектов. Образование таких дефектов в существенной степени определяются свойствами жидкой фазы и условиями процесса выращивания кристалла, когда помимо скорости роста большое значение имеют особенности массообмена.

### Рост из расплава

Кристаллы, выращиваемые из расплава, — основной класс кристаллических материалов, используемых в промышленности. В первую очередь это полупроводники, составляющие основу современной микроэлектроники, и лазерные кристаллы. Процессы их роста и образования в них дефектов хорошо изучены, поскольку эти кристаллы и проблемы их выращивания находились в фокусе внимания большого числа исследователей во второй половине XX в.

При росте из расплава в каждый промежуток времени из жидкой в кристаллическую фазу переходит целиком некоторый объем расплава, примыкающий к фронту кристаллизации, и проблема доставки «строительного материала» для роста кристалла отсутствует. Основная причина образования дислокаций и микродвойников в этом случае — это термоупругие напряжения, обусловленные градиентом температуры, который неизбежно существует в системе кристалл—расплав, поскольку по одну сторону от фронта кристаллизации вещество должно находиться при температуре ниже температуры плавления (кристалл), а по другую — выше (расплав). Дополнительные напряжения возникают также при росте в контейнерах из-за разницы коэффициентов теплового расширения кристалла и материала контейнера.

Неоднородное распределение примесей в кристалле целиком связано с процессами их подвода к фронту и захвата растущим кристаллом. По сути, расплав представляет собой раствор малых количеств различных элементов и соединений (примесей) в жидкой фазе основного вещества. Не вся примесь, поступающая к фронту кристаллизации, захватывается: ее концентрация в кристалле определяется как термодинамическими факторами (равновесным составом твердого раствора при данной температуре), так и кинетическими (скоростями роста кристалла, диффузии, перемешивания).

Вхождение примесей в кристалл характеризуется коэффициентом распределения  $k$ , равным отношению концентрации примеси в кристалле к ее концентрации в расплаве. Этот процесс в стацио-

нарном режиме описывается уравнением конвективной диффузии — уравнением диффузии в потоке, движущемся со скоростью  $W(z)$  (здесь  $z$  — расстояние от поверхности кристалла,  $D$  — коэффициент диффузии примеси, а  $C$  — ее концентрация):

$$D \frac{\partial^2 C(z)}{\partial z^2} + W(z) \frac{\partial C(z)}{\partial z} = 0.$$

Граничные условия этой задачи — постоянство концентрации примеси на бесконечном удалении от фронта кристаллизации ( $C(z) = C_\infty$ ) и материальный баланс примеси на фронте кристаллизации. Например, при  $k < 1$  примесь накапливается перед фронтом кристаллизации, а отвод избыточного ее количества осуществляется за счет диффузии. С течением времени возникает баланс между двумя материальными потоками и на фронте кристаллизации устанавливается определенное значение концентрации примеси, зависящее от скорости роста кристалла, скорости диффузии и коэффициента распределения. В результате вблизи фронта кристаллизации формируется пограничный диффузионный слой — слой жидкости, в пределах которого концентрация вещества (примеси) меняется существенным образом. За пределами диффузионного слоя концентрацию примеси считают постоянной [3].

Дополнительным фактором, влияющим на этот процесс, оказывается движение расплава, почти всегда возникающее из-за градиента температуры. Скорость движения жидкости на границе с твердым телом равна нулю, однако из-за действия сил вязкого трения вблизи поверхности формируется пограничный гидродинамический слой, в пределах которого скорость течения меняется от нуля до ее характерного значения в рассматриваемом объеме.

Оценки показывают, что толщина гидродинамического слоя примерно на порядок превосходит толщину диффузионного слоя, при этом толщины диффузионного и гидродинамического слоев связаны друг с другом. При увеличении скорости потока толщина гидродинамического слоя уменьшается, при этом также уменьшаются толщина диффузионного слоя и концентрация примеси на фронте кристаллизации (при  $k < 1$ ). Таким образом, вариации скорости движения расплава приводят к вариациям концентрации примеси в кристалле, т.е. к возникновению ее неоднородного распределения.

Заметим, что причиной неоднородности состава кристалла могут быть не только примеси, но и нестехиометрия бинарных и более сложных соединений (т.е. отклонение их состава от точной химической формулы, когда элементы присутствуют не в строго определенных соотношениях). Итак, при росте кристаллов из расплава наиболее типичные и трудно устранимые дефекты — это те, что обусловлены именно неоднородностью теплового поля, т.е. дислокации и неоднородности со-



Кристалл Ge, выращенный из расплава методом Чохральского (слева) и кристалл  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  (KDP), выращенный из водного раствора (фото Н.П.Зайцевой).



става. В настоящее время существует единственный кристалл, для которого эта проблема успешно решена — это кристалл кремния. Однако дислокации — это и каналы «стока» примесей, вакансий, собственных межузельных атомов на поверхность кристалла, поэтому устранение дислокаций в данном случае приводит к массовому формированию других дефектов — так называемых микродефектов, представляющих собой скопления термодинамически избыточных точечных дефектов. Для устранения таких дефектов был разработан метод геттерирования — отжиг пластин кремния со специально обработанной поверхностью.

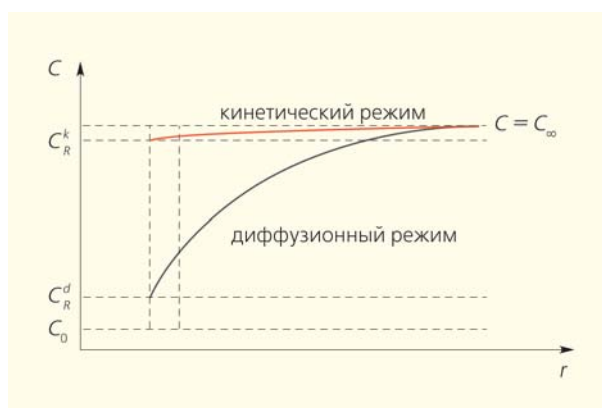
## Рост из растворов

При росте из растворов кристалл забирает из приповерхностного слоя жидкой фазы лишь часть вещества, и возможность продолжения роста и его скорость будут определяться скоростью подвода новых порций вещества из объема раствора. Таким образом, в данном случае мы имеем дело с классическим двухстадийным процессом, скорость которого будет определяться скоростью наиболее медленной из его стадий.

Если скорость роста кристалла лимитируется подводом вещества — это диффузионный режим. В таком случае концентрация вещества у растущей поверхности близка к равновесной ( $C_n \approx C_0$ ,  $\sigma_n \approx 0$ ) и сильно отличается от той, которая существует в объеме раствора ( $C_0 \ll C_\infty$ ). В результате по нормали к поверхности устанавливается довольно большой градиент пересыщения. Это приводит к морфологической неустойчивости грани: если на ней возникает какой-либо выступающий элемент, его верхняя часть оказывается в области более высокого пересыщения и начинает расти быстрее, чем основание.

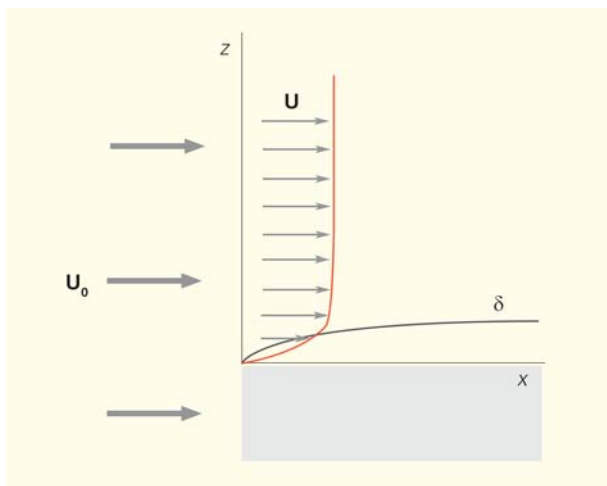
Если процесс встраивания частиц в кристалл идет медленнее, чем подвод вещества, — это кинетический режим. Теперь концентрация вещества (или температура) и пересыщение на поверхности такие же, как в объеме раствора. Подобный режим более благоприятен для роста кристаллов, поскольку обеспечивает устойчивость грани. Кроме того в этом случае рост кристалла, в сравнении с диффузионным режимом, происходит быстрее при одном и том же пересыщении в объеме раствора. Промежуточный случай называется режимом смешанной кинетики.

При параллельном обтекании жидкостью полубесконечной пластины наблюдается следующая картина. При перемещении от края пластины вдоль ее поверхности на расстояние  $x$  толщина



Пересыщение на границе раздела фаз в различных кинетических режимах.  $C$  — концентрация вещества в растворе,  $r$  — расстояние от поверхности кристалла,  $C_\infty$  — концентрация вещества в растворе на бесконечном удалении от поверхности кристалла,  $C_0$  — равновесная концентрация,  $C_R^k$  — распределение концентрации в кинетическом режиме,  $C_R^d$  — распределение концентрации в диффузионном режиме.





Скорость течения жидкости вблизи поверхности при параллельном обтекании полубесконечной пластины.  $U_0$  — начальная скорость потока,  $U$  — скорость потока над поверхностью пластины,  $z$  — расстояние от поверхности пластины,  $x$  — расстояние вдоль поверхности пластины,  $\delta$  — толщина диффузионного пограничного слоя.

диффузионного слоя ( $\delta$ ) растет и поверхностное пересыщение уменьшается. На краю пластины, где  $x = 0$ ,  $\delta$  также должна быть равна нулю. Таким образом, вдоль грани устанавливается неоднородное пересыщение.

Следует заметить, что неоднородное пересыщение вдоль поверхности кристалла устанавливается также и в отсутствие перемешивания, так как форма концентрационного поля близка к сферической, а кристалл имеет форму многогранника. Поскольку при послойном росте (в отличие от роста по нормальному механизму) грань остается плоской и не может принять форму концентрационно-

го поля, неоднородное распределение пересыщения вдоль грани сохраняется на протяжении всего процесса. Следствием этого будет различие в скоростях движения ступеней в разных точках поверхности, что также приводит к развитию морфологической неустойчивости грани и захвату включений раствора. Для объяснения этого явления необходимо рассмотреть особенности образования и движения ростовых ступеней.

### Почему необходимо контролировать ростовые ступени?

Очевидно, что изначально существовавшие на грани кристалла ступени по мере их движения подойдут к ее краю и исчезнут. Для продолжения роста кристалла необходимы *источники* ступеней. Первой гипотезой относительно природы таких источников была идея образования двумерных зародышей на поверхности кристалла. Однако теоретические расчеты предсказывали в этом случае скорости роста кристаллов на несколько порядков ниже наблюдаемых экспериментально. Данное противоречие было разрешено Ф.Франком, который в 1948 г. предположил существование в кристаллах линейных дефектов, называемых винтовыми дислокациями, что впоследствии подтверждено экспериментально. Уже в 1951 г. была опубликована завершенная дислокационная теория роста кристаллов В.Бартона, Н.Кабреры и Ф.Франка (теория БКФ) [4], которая впервые объяснила рост кристаллов при малом пересыщении, описала основные кинетические зависимости послойного роста и послужила основой для анализа наблюдаемых морфологических явлений и процессов образования дефектов при росте кристаллов из растворов.

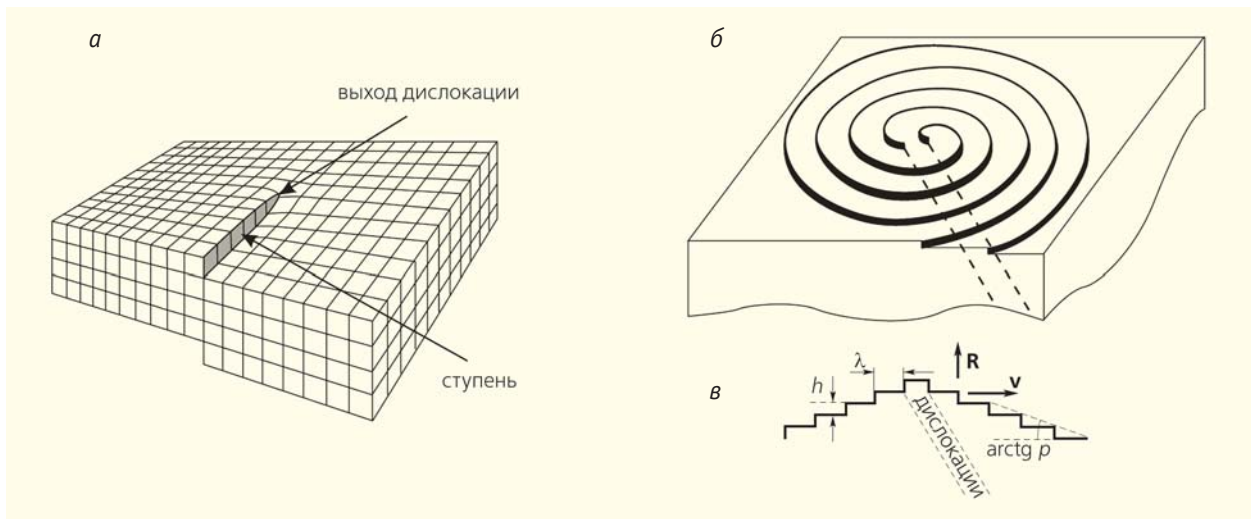


Схема незарастающей ступени, образованной винтовой дислокацией нормальной к поверхности грани (а), и дислокационного холмика, формируемого двумя дислокациями (б, в).

Винтовая дислокация дает незарастающую ступень и формирует один слой строительных единиц, закрученный в геликоид. Высота ступени обычно равна расстоянию между кристаллографическими плоскостями, параллельными грани (межплоскостному расстоянию). Присоединение строительных единиц к ступени приводит к ее вращению вокруг точки выхода дислокации. В результате ступень закручивается в спираль и на грани образуется холмик. Заметим, что источниками ступеней могут быть не только единичные дислокации, но и дислокационные пучки.

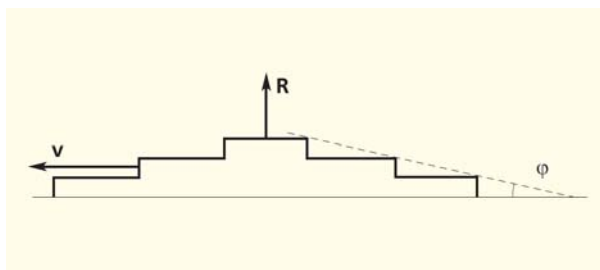
Если все ступени высотой  $h$  движутся с одинаковой скоростью  $v$ , то скорость роста по нормали к грани  $R$  связана с крутизной холмика  $p$  соотношением  $R = pv$ , где  $p = h/\lambda = \operatorname{tg}\phi$ ,  $\lambda$  — расстояние между ступенями. В теории БКФ показано, что наклон холмика зависит от пересыщения и мощности дислокационного источника (т.е. количества дислокаций в центре холмика).

Из-за анизотропии свойств грани ступени движутся с различной скоростью вдоль разных направлений. Вследствие этого дислокационные спирали (а значит и холмики), как правило, имеют полигональную форму. При этом ступени разной ориентации захватывают различное количество примеси, что служит основным источником неоднородности состава кристаллов, выращиваемых из растворов.

В отличие от механизма нормального роста, когда атомы могут присоединяться практически к любой точке поверхности кристалла, при послойном росте местами стоков как основного вещества, так и примесей оказываются ступени. Если кристалл растет в диффузионном режиме, когда лимитирующей стадией процесса будет доставка вещества к поверхности, то вокруг ступеней формируются индивидуальные диффузионные поля. Если диффузионные поля ступеней начинают перекрываться, ступеням не хватает питания и их движение замедляется. Вероятность такого явления возрастает по мере увеличения крутизны холмиков, т.е. при повышении пересыщения. Последующие ступени, движущиеся с большей скоростью, догоняют замедлившуюся пару, и постепенно формируются так называемые макроступени, высота которых может достигать десятков и даже сотен микрометров.

Другой причиной возникновения макроступеней могут быть находящиеся в растворе примесные частицы, которые адсорбируются на поверхности и в изломах на ступени. Встраивание их в поверхностный слой кристалла энергетически невыгодно, поэтому они тормозят движение ступеней.

Возникновение макроступеней приводит к образованию включений. Подавляющее большинство неорганических кристаллов растет в растворах в диффузионном режиме. Верхняя часть макроступени оказывается в области с более высоким



Схема, иллюстрирующая соотношение между скоростью движения ступеней  $v$  и нормальной скоростью роста кристалла  $R$  ( $\phi$  — угол наклона холмика).



Изображение двойной дислокационной спирали на грани (010) кристалла бифталата калия ( $\text{KN}_2\text{C}_8\text{O}_4$ ) в атомно-силовом микроскопе [5].

пересыщением и начинает расти быстрее, чем ее основание. В результате образуется «козырек», при схлопывании которого возникают многочисленные включения раствора. Именно включения — основной тип дефектов в кристаллах, выращиваемых из растворов, они присутствуют в них практически всегда, и от них довольно трудно избавиться.

Наиболее надежный способ устранения включений — выращивание кристаллов в кинетическом режиме. Есть два способа его достижения: уменьшение скорости роста кристалла и улучшение перемешивания раствора для уменьшения толщины диффузионного слоя. И хотя, как показывают расчеты и опыт, для этого необходимо добиться весьма высокой скорости движения раствора (около 30 см/с), дополнительным преимуществом становится возможность существенно увеличить скорость роста кристалла.

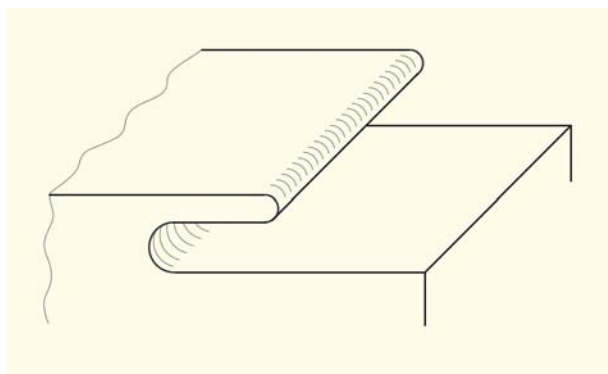


Схема захвата включений макроступенью.

В самом деле, для увеличения скорости роста необходимо повысить пересыщение на гранях кристалла. Поскольку в диффузионном режиме пересыщение на грани значительно ниже, чем в объеме, увеличение переохлаждения раствора также существенно повысит пересыщение и в его объеме. Это может привести к спонтанной кристаллизации — выпадению многочисленных «паразитных» кристаллов. В то же время усиление перемешивания выравнивает концентрации на фронте кристаллизации и в объеме и позволяет существенно повысить пересыщение на грани, зачастую даже без значительного увеличения переохлаждения. Именно такой подход составляет основу методик скоростного выращивания ряда кристаллов из водных растворов ( $KDP$ ,  $LiJO_3$ ,  $NiSO_4 \times 6H_2O$ ). В сочетании с мерами по повышению устойчивости растворов это позволяет выращивать кристаллы со скоростями примерно 10 мм/сут, что на два порядка превосходит скорости роста при традиционных методах.

Замечательно, что Вульф уловил и этот важный момент и отметил его в своей статье. И хотя предложенный им кристаллизатор барабанного типа в настоящее время не применяется (это не очень удобно технологически), сам принцип перемешивания раствора остается практически обязательным при выращивании кристаллов из растворов. Сегодня используются кристаллизаторы вертикального типа, а перемешивание осуществляется мешалками различных видов либо вращением платформы с закрепленным на ней кристаллом вокруг вертикальной оси.

## Методы выращивания кристаллов

**Рост из расплава.** Основное достоинство методов роста кристаллов из расплавов — это возможность достижения больших скоростей роста (до десятков мм/ч) по сравнению с кристаллизацией из раствора (от долей до нескольких мм/сут).

Все многообразие существующих методов роста кристаллов из расплава подразделяется на две

группы: методы, использующие большой объем расплава (методы Киропулоса, Чохральского, Стокбаргера—Бриджмена), и методы, использующие малый объем расплава (методы Вернейля и зонной плавки). Выбор объема расплава, а значит и метода, предпочтительного для кристаллизации определенного вещества, определяется его физико-химическими свойствами: реакционной способностью по отношению к материалу контейнера (тигля) и к кристаллизационной атмосфере, а также возможностью диссоциации кристаллизующего вещества и испарения продуктов распада под действием высоких температур. Для веществ, подверженных термической диссоциации и обладающих высокой реакционной способностью, предпочтительно ограничивать время их пребывания в расплавленном состоянии, следовательно, их нужно выращивать с помощью методов, использующих малый объем расплава.

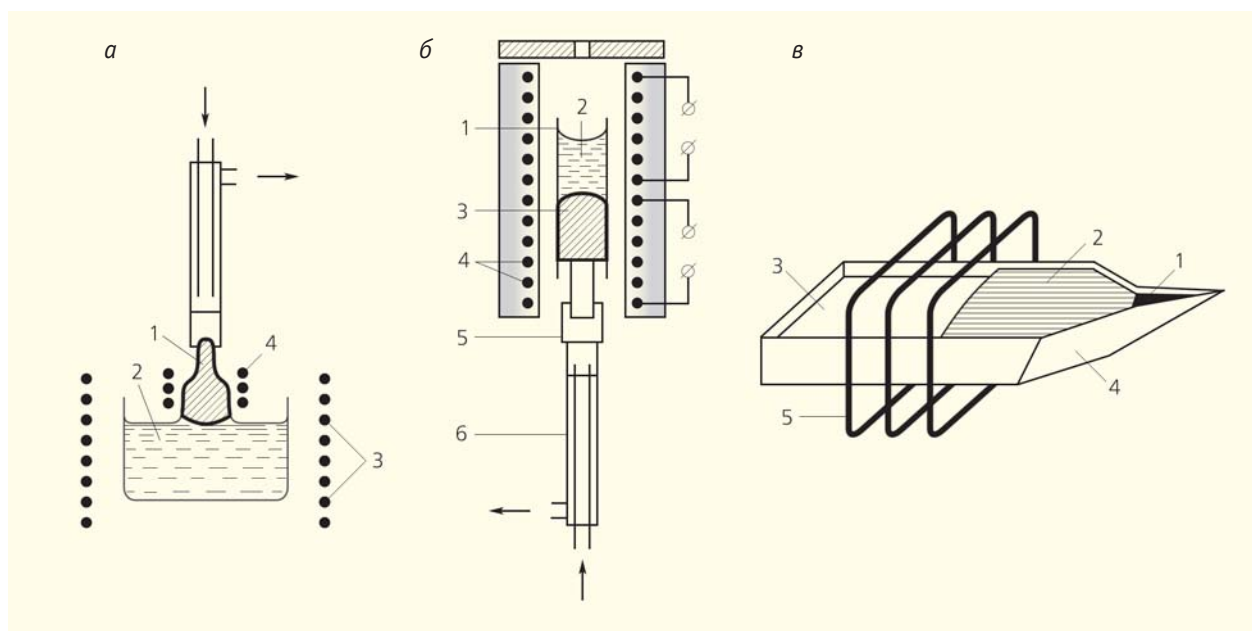
Кроме того, выбор метода роста должен определяться желаемым видом распределения примеси по объему выращенного кристалла, поскольку для обеих групп методов наблюдается резкое различие механизмов массопереноса вещества в расплаве. В большом объеме расплава лидирующая роль принадлежит конвективному переносу вещества и примесей, поэтому наблюдается относительно равномерное распределение примеси в среднем участке выращенного кристалла. Следовательно, эта группа методов предпочтительна для примесного активирования кристаллов. Для очистки кристаллов от примесей применяются методы с малым объемом расплава; в этом случае конвективные потоки уступают место диффузионным, что приводит к существенному перепаду содержания примеси по длине выращенного кристалла.

*Метод Киропулоса* заключается в том, что рост кристалла осуществляется путем плавного снижения температуры расплава с помощью специального холодильника, при этом кристалл может подниматься и вращаться. Этим методом удается выращивать крупные (диаметр ~150 мм) щелочногалогенидные кристаллы:  $NaCl$ ,  $NaBr$ ,  $KCl$ ,  $KBr$ ,  $KI$ ,  $RbCl$ ,  $LiF$ , а также монокристаллы корунда ( $Al_2O_3$ ).

В *методе Чохральского* температура расплава поддерживается постоянной, а растущий кристалл, вращаясь, медленно вытягивается из расплава со скоростью, равной скорости кристаллизации. Именно методом Чохральского выращивают бездислокационные кристаллы кремния диаметром 300 мм и длиной до 3 м. Также этим методом успешно выращиваются монокристаллы германия, корунда, алюмо-иттриевого граната ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), ниобата лития ( $LiNbO_3$ ), фосфида и арсенида галлия и др.

*Метод Стокбаргера—Бриджмена* (метод направленной кристаллизации) существенно отличается от двух упомянутых выше методов тем, что весь объем расплава, помещенного в тигель, за-





Схемы методов выращивания кристаллов из расплава: *а* — метода Чохральского (1 — растущий кристалл; 2 — расплав; 3 — нагреватель; 4 — дополнительный нагреватель), *б* — метода Стокбаргера—Бриджмена (1 — контейнер; 2 — расплав; 3 — растущий кристалл; 4 — нагреватель; 5 — устройство для опускания контейнера; 6 — термопара), *в* — метода Багдасарова (1 — затравка; 2 — кристалл; 3 — расплав; 4 — контейнер; 5 — нагреватель).

кристаллизуется путем медленного перемещения из высокотемпературной части печи в низкотемпературную. При этом удается получать кристаллы заданного диаметра, так как выращиваемый кристалл принимает форму тигля. Данный метод используется для получения металлических, органических и диэлектрических монокристаллов: окислов, фторидов, галогенидов и др.

*Метод Багдасарова* (метод горизонтальной направленной кристаллизации), позволяющий выращивать монокристаллы в виде пластин, успешно используется для получения крупных монокристаллов лейкосапфира, корунда и алюмоиттриевого граната. Основное отличие этого метода от кристаллизации в вертикальном направлении состоит в том, что рост кристалла проводится при практически постоянной высоте расплава, это способствует стабильности ростового процесса. Метод Багдасарова позволяет выращивать кристаллы на затравку, устанавливаемую в начало контейнера, и получать плоские кристаллы таких крупных размеров, которые трудно достигнуть другими способами.

Недостаток методов направленной кристаллизации — постоянный контакт выращенного кристалла с тиглем, что приводит к возникновению дополнительных упругих напряжений из-за разницы коэффициентов теплового расширения материалов кристалла и тигля.

*Метод Вернейля* (бестигельный метод кристаллизации), заключается в том, что исходное вещество в виде порошка с размером частиц 1–100 мкм

сыплется через газовую горелку (температура пламени регулируется соотношением кислорода и водорода) и, оплавляясь, попадает на оплавленный торец медленно опускающейся монокристаллической затравки. Скорость кристаллизации пленки расплава определяется скоростью подачи шихты, температурой пламени и скоростью движения затравки. С помощью этого метода выращивают монокристаллы рубина, лейкосапфира, алюмомагнезиевой шпинели  $MgAl_2O_4$ , рутила  $TiO_2$ , диоксида циркония  $ZrO_2$  (фианита) в виде стержней диаметром до 20 мм и длиной до 500 мм.

*Метод зонной плавки*, основанный на последовательном проплавлении слитка исходного вещества путем перемещения узкой зоны расплава, позволяет проводить многократную перекристаллизацию образца, при которой примеси отталкиваются растущим кристаллом и сосредотачиваются в жидкой фазе. Поэтому с помощью метода зонной плавки, разработанного В.Пфанном, можно получать особо чистые кристаллы. Кроме того, этот метод благодаря возможности создания узкой зоны расплава используется для выращивания термически неустойчивых веществ. С помощью зонной плавки выращиваются монокристаллы металлов (вольфрама, молибдена, рения), полупроводников (в том числе крупных бездислокационных кристаллов кремния) и диэлектриков (лейкосапфира, алюмо-иттриевого граната и др.).

**Рост из раствора.** Создание пересыщения в растворе основано на зависимости растворимости веществ от температуры: для каждой пары ве-

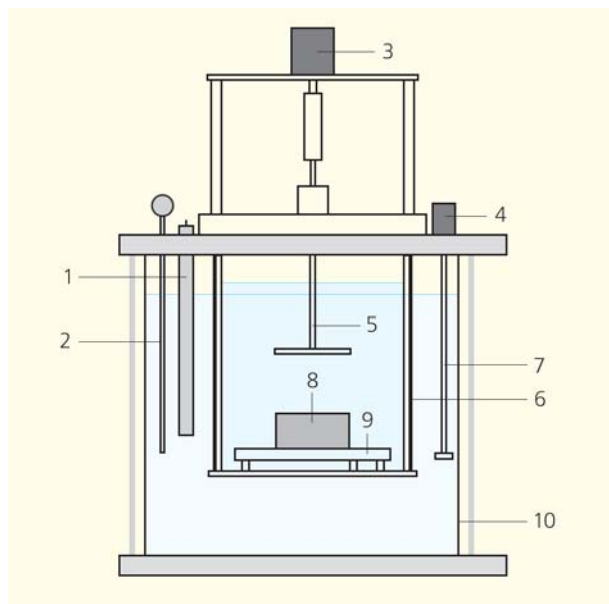


Схема установки для выращивания кристаллов из низкотемпературных растворов: 1 — нагреватель; 2 — термодатчик; 3 — мотор мешалки кристаллизатора; 4 — мотор мешалки термостата; 5 — мешалка кристаллизатора; 6 — кристаллизатор; 7 — мешалка термостата; 8 — кристалл; 9 — платформа; 10 — термостат.

щество—растворитель при данных температуре и давлении максимально возможное количество растворенного вещества строго фиксировано. Как правило, растворимость веществ повышается с температурой, хотя некоторые соли обладают обратной (ретроградной) растворимостью — их растворимость растет при понижении температуры (пример — иодат лития  $\text{LiJO}_3$ ).

Для того чтобы вырастить кристалл, надо поместить затравочный кристалл в пересыщенный раствор. Поддерживать пересыщение в процессе роста можно либо изменяя температуру раствора, либо отбирая конденсат растворителя, либо используя подпитку. Каждый из способов имеет свои достоинства и недостатки. Кристаллизационные установки для выращивания кристаллов во всех случаях выглядят приблизительно одинаково. Заданный режим снижения/поддержания температуры обеспечивают с помощью нагревателя и термоконтроллера с датчиком температуры.

## Литература

1. *Leamy H.J., Gilmer G.H., Jackson K.A.* Statistical thermodynamics of clean surfaces // Surface physics of materials. V.1. N.Y.; San Francisco; L., 1975. P.121—188.
2. *Jackson K.A.* Interface structure // Growth and perfection of crystals. N.Y.; L., 1958. P.319—323, discuss. P.324.
3. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М., 1952.
4. *Burton W., Cabrera N., Frank F.* The growth of crystals and the equilibrium structure of their surfaces // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1951. A243. P.299—358.
5. *Рашкович Л.Н., Петрова Е.В., Шустин О.А., Черневич Т.Г.* Формирование дислокационной спирали на грани (010) кристалла бифталата калия (БФК) // Физика твердого тела. 2003. Т.45. №2. С.400—407.

Кристаллизатор с растущим кристаллом помещается в термостат, снабженный мешалкой для выравнивания температуры.

Большинство кристаллов растут из растворов *методом изменения температуры*. Поскольку равномерность роста в большой степени обеспечивается плавным изменением температуры, этот способ достаточно просто реализовать технически. При выращивании *методом отбора конденсата* необходимое пересыщение достигается путем удаления из кристаллизатора соответствующего количества растворителя. Это может быть реализовано, например, использованием конусообразной крышки кристаллизатора с желобком, в котором собирается и из которого затем удаляется конденсат. Температура раствора во время роста поддерживается постоянной. Недостаток этого метода состоит в уменьшении объема раствора, и это может существенно ограничить размер конечного кристалла. Такого недостатка лишен *метод выращивания с использованием подпитки*. Однако устройство кристаллизатора еще несколько усложняется: помимо устройства для сбора конденсата необходима емкость с насыщенным раствором, на дне которой должна быть нерастворенная соль. Для поддержания пересыщения из кристаллизатора удаляется конденсат, который попадает в емкость с насыщенным раствором, а раствор подается в кристаллизатор. Так при постоянных температуре и объеме раствора достигается требуемое значение пересыщения.

Для создания более однородного распределения пересыщения вдоль поверхности кристалла, как правило, применяют перемешивание раствора, которое осуществляется либо с помощью мешалки, либо путем вращения кристаллизационной платформы с закрепленным на ней кристаллом.

\* \* \*

Современные представления о механизмах роста кристаллов и образования в них дефектов полностью соответствуют выводам Вульфа и объясняют их. Следует отдать дань уважения глубокой научной интуиции Георгия Викторовича, его научному энтузиазму и тому четкому логическому анализу очевидных сегодня явлений, который позволил ему на основании очень простых экспериментов сделать абсолютно верные выводы о происходящих процессах роста кристаллов. ■

# Георгий Викторович Вульф



А.А.Маслов,  
кандидат технических наук  
Е.В.Чернова,  
В.М.Щербаков,  
кандидат технических наук  
Институт общей физики им.А.М.Прохорова РАН  
Москва

*Времена не выбирают,  
в них живут и умирают...*

А.Кушнер

**В** 2013 г. исполнилось 150 лет со дня рождения талантливого русского ученого, изобретателя, стоявшего у истоков многих научных направлений, связанных с кристаллами, — Г.В.Вульфа.

На долю этого человека выпали две революции и Первая мировая война. Несмотря на такие события и связанные с ними жизненные трудности, тот фундамент, который был заложен родителями и преподавателями в пору его отрочества и юности, позволил ему развить свой талант и реализовать огромный жизненный потенциал.

Георгий (Юрий) Викторович Вульф родился в г.Нежине Черниговской губернии 10 июня 1863 г. Детство и юность его прошли в Варшаве (в ту пору — части Российской империи).

Родители принадлежали к педагогической интеллигенции, что в значительной степени определяло нравственную и интеллектуальную атмосферу семейной жизни. В 1881 г. Георгий окончил гимназию, директором которой был его отец, Виктор Константинович Вульф. Еще в гимназические годы проявилась склонность мальчика к точным наукам, в первую очередь к математике, а решение геометрических и алгебраических задач стало его страстью. Георгия также интересовало естествознание, особенно те области, где можно было использовать математический подход.

После окончания гимназии он поступил на естественное отделение физико-математического факультета Варшавского университета, который в те годы был одним из лучших в России как по



Г.В.Вульф и его жена В.В.Якунчикова. Начало 1890-х годов.

Здесь и далее (за исключением указанных случаев) фото из книги:  
Сонин А.С. Георгий Викторович Вульф. М., 2001.

уровню преподавания, так и по оснащенности лабораторий. Уже со второго курса Вульф начинает заниматься научной работой под руководством профессоров А.Е.Лагорио (минералогией) и Н.Г.Егорова (физикой). Именно Лагорио Георгий Викторович считал своим учителем в области кристаллографии. А под руководством Егорова он выполнил свою первую научную работу по физике, посвященную исследованиям электрических свойств кристаллов кварца. В серии экспериментов ему удалось показать, что электризация кристаллов при их нагреве связана с пьезоэлектрическим эффектом. Работа студента Вульфа была удостоена золотой медали и опубликована в «Журнале Русского физико-химического общества» и позже в «Варшавских университетских известиях».

По рекомендации профессора Лагорио выпускник университета Георгий Вульф в 1885 г.



(со степенью кандидата) был оставлен при кафедре минералогии «для подготовки к профессорскому званию». Одновременно он был зачислен ассистентом на кафедру физики университета.

В том же году под руководством профессора П.А.Зилова Вульф приступает к изучению оптических свойств кристаллов и их зависимости от кристаллографических характеристик. В этих исследованиях, для проведения которых необходимо было глубокое знание как минералогии и кристаллографии, так и физики, проявилась способность молодого ученого изобретать новые приборы и устройства для оригинальных экспериментов. Ни Егоров, ни Зилов не были выдающимися учеными, зато они были превосходными педагогами, которые сумели раскрыть перед талантливым студентом необыкновенные возможности экспериментальной физики, что привело его к созданию собственного направления в науке, которое позднее получило название «кристаллофизика».

Подход Вульфа сочетал типично кристаллографические методы с физическими, это позволяло связать оптические свойства кристаллов с их внутренней структурой. Но Георгий Викторович был очень разносторонним человеком. Кроме работ по основной тематике он пишет и другие, непосредственно с ней не связанные. В одной из таких статей, например, он описывает метод определения высоты кучевых облаков, основанный на измерении угловых размеров тени, угловой величины облака и положения облака на небосклоне.

В 1888 г. Вульф добился 6-месячной командировки в Санкт-Петербургский университет «для приготовления к профессорской деятельности по кафедре минералогии, без назначения ему содержания», где работал крупный российский кристаллограф Е.С.Федоров, в 1885 г. опубликовавший классическую монографию «Начало учения о фигурах». В этой работе Федоров заложил основы теоретической кристаллографии, на которой базировался последующий вывод всех пространственных групп симметрии кристаллов. Вульф высоко оценил огромное значение исследований Федорова, общение с которым оказало влияние на его становление как ученого. В последующих своих командировках в Европу Георгий Викторович в ряде кристаллографических журналов знакомил зарубежных ученых с пионерскими трудами Федорова. Никаких научных исследований за время пребывания в Петербурге Вульф не опубликовал. Зато в общественно-политическом журнале «Русское богатство» появилась его статья «Роль метеоритов во Вселенной», где шла речь об экзотической гипотезе происхождения звездных систем, выдвинутой известным французским астрономом Д.Локьером, что еще раз свидетельствует о широком кругозоре и неиссякаемом интересе ученого к смежным областям науки.

Подготовка к профессорскому званию предполагала право соискателя на стажировку в луч-

ших университетах Европы. Весь 1889-й и часть 1890 г. Вульф работал в Мюнхене под руководством известного кристаллографа П.Грота и проводил исследования, ставшие вскоре основой его магистерской диссертации. Кроме того, он выполнял обещание, данное Федорову, реферируя его работы на немецком языке. Подготовка публикации рефератов затронула вопрос научного приоритета. Борьба Георгия Викторовича за приоритет русского ученого привела к осложнению его взаимоотношений с Гротом и, как ни странно, самим Федоровым. Тем не менее, в 1890 г. в «Zeitschrift für Krystallographie» были опубликованы пять рефератов Вульфа, передающие содержание работ Федорова.

В 1890 и 1891 гг. Вульф работает в лаборатории академика А.Корню в Политехнической школе Парижа, изучая свойства упругих тел (и в первую очередь, свойства стекла). Общение с Корню позволило ему приобрести ценный опыт экспериментирования — с анализом процедуры эксперимента, с выявлением и анализом всех погрешностей, с достижением предельной точности используемых методов.

В 1891 г. в Париже Георгий Викторович познакомился с Верой Васильевной Якунчиковой, дочерью богатого купца и мецената Василия Ивановича Якунчикова, основателя Русского музыкального общества и одного из организаторов строительства Московской консерватории. У молодых людей оказалось много общих интересов. Их сближению способствовала музыка, но бытовая неустроенность и неопределенность положения Вульфа разъединяла их.

Для упрочения своего положения Георгию Викторовичу пришлось поторопиться с защитой магистерской диссертации. Он скомпоновал ее из уже опубликованных в разное время результатов своих исследований ряда псевдосимметричных кристаллов. В мае 1892 г., вернувшись в Варшаву, Вульф успешно защитил диссертацию, получил степень магистра минералогии и геодезии и отправился в Париж, где его ждала невеста. Они обвенчались в Париже, но жить по многим практическим соображениям решили в Варшаве.

В октябре 1892 г. Георгий Викторович представил ученому совету Варшавского университета свою пробную лекцию для получения звания приват-доцента. Лекция была посвящена новой и необычной теме — жидким кристаллам, в которых ученый увидел модель, позволяющую проследить за начальной стадией зарождения кристаллов. Вульф получил звание приват-доцента и приступил к чтению лекций по минералогии.

В конце 1895 г. Георгий Викторович закончил работу над докторской диссертацией. В ней он сделал попытку связать внешнюю форму и оптические свойства кристаллов с их внутренним строением, с условиями кристаллизации, что разительно отличалось от преобладающего в то время под-

хода к кристаллографии как к науке описательной. Кристаллография рассматривалась как некое приложение к минералогии и сводилась к описанию «габитуса различных минералов, их симметрии и простых форм. Роль химии ограничивалась определением составов минералов, а физика, если и привлекалась, то только для измерения плотности, твердости и показателей преломления... При таком подходе математика вообще не применялась»\* (с.51). С помощью собственной оригинальной методики Вульф провел подробные исследования роста кристаллов из водных растворов — в те времена еще очень слабо развитого научного направления. Он открыл, объяснил и тщательно исследовал с помощью теневого метода Теплера «концентрационные потоки», управляющие ростом кристалла в растворе. Современные биографы Вульфа называют эту работу «самой значимой работой по кристаллографии, выполненной в Варшавском университете». Предварительные результаты данных исследований были доложены на заседании секции физики и химии Варшавского общества естествоиспытателей и напечатаны в его «Трудах». Работа под названием «К вопросу о скоростях роста и растворении кристаллов» публиковалась в пяти номерах «Варшавских университетских известий» (1895—1896) и в журнале «Zeitschrift für Krystallographie» (1901). Установки, использованные для этих исследований, Георгий Викторович сделал собственными руками. «Искусству делать приборы для опытов простыми средствами из дерева, латуни, жести, стержней, трубок, проволоки и т.п. материалов я всецело обязан моему парижскому учителю А.Корню», — писал он. «Такое отношение к экспериментальной установке как “к части экспериментатора” характерно для всей научной деятельности Вульфа» (с.66).

Новаторский подход молодого ученого был неоднозначно принят многими кристаллографами, поэтому диссертация не была принята к защите в родном Варшавском университете. Работа эта «была совершенно нетрадиционной для тогдашнего состояния экспериментальной минералогии, использовавшей при изучении процессов роста лишь качественные, наблюдательные средства и методы. Вульф же подошел к росту кристаллов как физик, введя в проблему количественные характеристики (скорость роста и растворения, капиллярные постоянные)» (с.86). Вульф подал диссертацию в Новороссийский университет в Одессе, где в декабре 1896 г. успешно защитил ее и получил степень доктора минералогии и географии. Приняв предложение Министерства просвещения, он переехал в Казань для работы в качестве экстраординарного профессора на кафедре минералогии и кристаллографии Императорского Казанского университета.

\* Здесь и далее цитируется книга: *Сонин А.С.* Георгий Викторович Вульф. М., 2001.

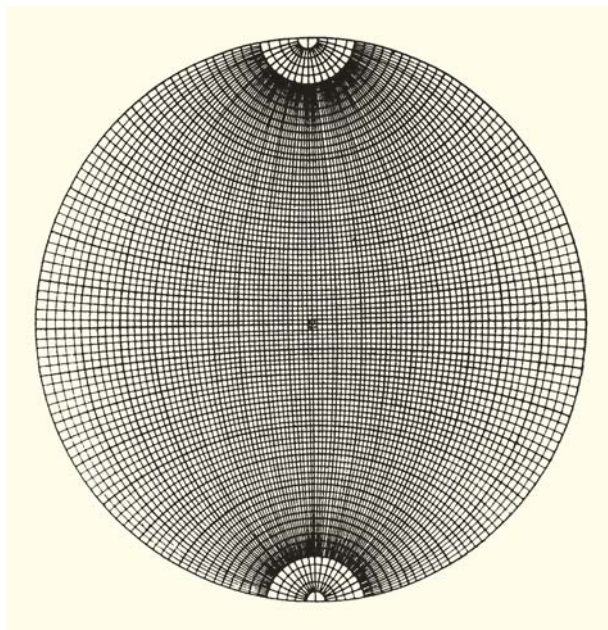


Кристалл дигидрофосфата калия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , KDP), выращенный из водного раствора на точечной затравке методом снижения температуры.

Фотография предоставлена Институтом кристаллографии им.А.В.Шубникова РАН

Георгий Викторович уделял много времени традиционной для минералогов области — геометрической кристаллографии. Это было отчасти связано с его педагогической деятельностью, так как преподавание минералогии и кристаллографии включало в себя как один из главных элементов «измерение кристаллов». Вульф разработал простой метод обработки результатов этих измерений, связанный с изобретенной им в 1897 г. стереографической сеткой. С ее помощью можно графически вычислить символы всех граней кристалла, а также константы кристалла — осевые углы с точностью до  $30'$  и отношения осевых единиц с точностью до третьего знака. В настоящее время сетка Вульфа применяется при всех кристаллографических работах. Он предложил способ вывода всех видов симметрии кристаллов. Для точного вычисления констант кристаллов Георгий Викторович применил метод наименьших квадратов. Одна из самых важных его работ в этой области посвящена анализу погрешностей при измерении с помощью теодолитного гониометра. Исследуя процессы роста, Вульф выявил связь между огранкой кристалла и анизотропией поверхностной энергии — «принцип Кюри—Вульфа». В области кристаллооптики Георгий Викторович занимался изучением явления вращения плоскости поляризации и оптическими аномалиями некоторых кристаллов.

В 1898 г. Вульфу удается вернуться в Варшаву на кафедру минералогии и занять должность ординарного профессора. Особенность преподавания в Варшавском университете состояла в том, что преподаватели имели возможность объявлять необязательные курсы, связанные с их научными интересами. Вульф в полной мере пользовался этой возможностью. Когда он занимался изучением оптических свойств кристаллов, то читал курс



Сетка Вульфа, позволяющая графически, без дополнительных расчетов, решать многие задачи геометрической кристаллографии.

кристаллооптики; когда он исследовал процессы роста и растворения кристаллов, то читал необязательный курс «О явлениях кристаллизации»; в 1896/97 учебном году был объявлен необязательный курс о симметрии кристаллов.

Учение о симметрии кристаллов к концу XIX в. пребывало «в состоянии фундаментальной завершенности». Вульф же предложил перестроить все учение, положив в основу единственный элемент симметрии — плоскость зеркального отражения. Ученый считал, что нашел легкий и простой способ вывода всех видов симметрии, но... современники предпочли обозначения Шенфлиса, а потому разработали свою международную систему.

Последние годы жизни в Варшаве были сложными во всех отношениях. Жена заболела туберкулезом. Георгий Викторович сделал все, что от него зависело, чтобы спасти ее. Он как можно чаще отправлял Веру Васильевну на лечебные курорты. Летом она с детьми жила в горах Швейцарии, куда иногда приезжал и он сам.

После объявления войны Японии по всей России прокатилась волна антивоенных демонстраций. Летом 1904 г. произошли кровавые столкновения полиции с рабочими и студентами в Варшаве. Выступления в Польшу носили ярко выраженный национальный характер. Польша всеми способами боролась за свою независимость, за сохранение самобытности, языка, культуры, науки и искусства. В школах и университетах Польши обучение велось только на русском языке, поэтому польское население начало бойкот учебных заведений. Главные события развернулись весной

1905 г. Грандиозная сходка студентов закончилась погромом. Студенты направили к попечителю Варшавского учебного округа делегацию с требованием полонизации университета.

Профессор Вульф публично поддержал требования студентов, изложив свою позицию в двух статьях, опубликованных в газетах «Сын отечества» и «Наша жизнь» в 1905 и 1906 гг. В газете «Наши дни» в 1905 г. была опубликована записка «Нужды просвещения», в которой вместе с требованием академических свобод содержались требования и свобод политических, а также — полного и коренного изменения государственного строя. Под этой статьей подписались 342 ведущих деятеля отечественной науки и высшей школы (в том числе и Вульф). Позиция Георгия Викторовича вызвала резкое неприятие у многих его коллег и, естественно, у университетского руководства. В 1906 г. в связи со студенческими волнениями занятия были временно приостановлены, и Вульф уехал в Женеву, где тогда жила его семья.

В 1907 г., воспользовавшись приглашением В.И.Вернадского, Вульф переехал в Москву, где занял должность приват-доцента кафедры минералогии Московского университета.

Осенью 1908 г. возобновились занятия в Варшавском университете. Георгий Викторович получил предписание приступить к выполнению своих профессорских обязанностей, и ему, несмотря на неприязнь коллег и руководства, пришлось вернуться в Варшаву. Но по завершении осеннего семестра он все же принял нелегкое решение навсегда попрощаться с Варшавским университетом. Студенты, в отличие от начальства глубоко уважавшие Вульфа, устроили любимому преподавателю торжественные проводы. В своей ответной речи Георгий Викторович обратился к ученикам с такими словами: «Итак, вот вам мое завещание — любите истину и будьте прежде всего людьми в благородном смысле этого слова, и если постигнут вас в жизни невзгоды, то не они возьмут над вами силу, а вы над ними, и сердца ваши не ожесточатся» (с.130).

Вульф вернулся в Москву. При поддержке Вернадского он создает в здании Минералогического института собственную кристаллографическую лабораторию. С 1908 г. Георгий Викторович ведет в Московском университете и в Московском городском народном университете им.А.Л.Шанявского курс кристаллографии. В 1909 и 1910 гг. в Московском университете он читает кристаллографию и кристаллооптику и впервые на практике использует свою кристаллографическую сетку. Здесь же знакомится со студентом А.В.Шубниковым, который вскоре становится одним из лучших его учеников. Научная работа Вульфа в это время развивается в двух направлениях: геометрическая кристаллография и исследования жидких кристаллов.



Забастовки студентов в то время случались довольно часто. Решение проблем университета считалось делом внутренним, поскольку университет обладал автономией. Власть не хотела мириться с такой самостоятельностью. В 1911 г. под предлогом подавления беспорядков, без ведома ректора и совета университета на его территорию была введена полиция. Истинной целью данной акции было лишение университета автономии. Противостояние Министерства внутренних дел и руководства университета привело к отставке ректора и двух проректоров. Чуть позже в знак солидарности подали прошение об отставке и часть преподавателей. Среди них были В.И.Вернадский, П.Н.Лебедев, Н.Д.Зелинский, К.А.Тимирязев, А.Е.Ферсман и Г.В.Вульф.

Покинув университет, Вульф перенес свою лабораторию, для которой он сам закупал приборы и материалы, тратя на это, по его собственным словам, весь свой заработок, в университет Шанявского. Там ученый проводил свои экспериментальные работы, одновременно читая лекции по кристаллографии и минералогии на Московских высших женских курсах.

Лекции Вульфа пользовались большой популярностью, поскольку он старался сделать их наглядными и интересными, демонстрируя остроумные и красивые опыты. С 1912/13 учебного года Георгий Викторович заведует минералогической лабораторией. Вульфу и Ферсману удалось собрать в минералогическом кабинете богатую коллекцию. К 1914 г. она насчитывала почти тысячу образцов минералов.

В апреле 1912 г. произошло эпохальное событие в исследовании кристаллов. В.Фридрих и П.Книппинг, проверяя предположение М.Лауэ, обнаружили дифракцию рентгеновских лучей в кристаллах, обусловленную их пространственной решеткой. Вульф сразу оценил возможности, которые сулило данное открытие, и активно взялся за исследования и расшифровку рентгенограмм кристаллов. Уже в начале 1913 г. он объяснял прохождение рентгеновских лучей через кристалл отражением их от внутренних плоскостей кристаллов. В пояснениях к статьям, опубликованным в январе и июле, Георгий Викторович формулирует следующий вывод: «Каждое пятно на рентгенограмме есть след луча, отразившегося от какой-либо сетчатой плоскости кристалла. Зная расхождение пятен, мы можем точно определить расположение этих плоскостей» (с.175). В 1913 г. независимо от Л.Брэгга Вульф вывел формулу, положившую начало новой науке — рентгеновской кристаллографии. Формула Вульфа—Брэгга дала возможность определить длину волны рентгеновского излучения по периоду кристаллической решетки и характеристикам рентгенограммы кристалла. В том же году Георгий Викторович начал первые в России рентгеноструктурные исследования.

Первая мировая война внесла свои коррективы в работу университета: часть помещений были отданы под лазарет. Ушли на фронт многие сотрудники и преподаватели. Для военных нужд использовалось и университетское оборудование. В частности, в госпитале был оборудован рентгеновский кабинет, где работали Вульф и его сотрудники. В этом кабинете не только обследовали раненых, но и проводили курсы по обучению медицинского персонала госпиталей и лазаретов. В своей лаборатории Георгий Викторович организовал ремонт и откачку рентгеновских трубок.

В эти годы Вульф и его сотрудники разработали новый способ изготовления рентгеновских экранов, которые применяются при медицинских съемках и просвечиваниях. По инициативе Георгия Викторовича производство этих экранов было организовано в России.

В университете Шанявского, несмотря на сложности военного времени, Вульф старался сохранить основные направления своих научных исследований: использование дифракции рентгеновских лучей в кристаллах для изучения их внутреннего строения; выяснение природы жидких кристаллов; изучение процесса роста и образования кристаллов.

Вблизи Тарусы, на берегу Оки, в усадьбе жила семья художника В.Д.Поленова. Наталья Васильевна — жена художника — была сестрой жены Вульфа. Вера Васильевна Вульф с детьми подолгу гостила в доме Поленовых. Супруги Вульфы органично вписались в дружеский круг хозяев дома, который составляли знаменитые художники, писатели, артисты и музыканты. Летом 1913 г. Георгий Викторович арендовал у тарусских властей загородную дачу «Песочное», которую раньше снимал И.В.Цветаев и в которой некоторое время проживал В.Э.Борисов-Мусатов. Этот дом стал не только лабораторией ученого, но и центром культурной жизни Тарусы.

В 1915 г. в журнале «Природа» Вульф публикует работу «Как растут кристаллы», написанную частично по исследованиям 1895—1896 гг. и дополненную новыми опытами и обобщениями. В статье рассказывается об исследованиях роста кристаллов квасцов, проведенных именно на даче. Георгий Викторович в очередной раз проявил себя как весьма изобретательный экспериментатор, поскольку установки для изучения процессов кристаллизации ему пришлось изобретать и изготавливать самому. Для наблюдения кристаллизационных потоков тенью методом Теллера в качестве источника света он использовал керосиновую лампу. В этой работе описан вращающийся кристаллизатор, созданный автором для получения кристаллов равновесной формы, а также другой тип кристаллизатора (где вращался уже сам растущий кристалл), предложенный учеником и ассистентом Вульфа — Шубниковым.



Дача Вульфов в Тарусе.



Домик-лаборатория в Тарусе.

Фото из архива Тарусского краеведческого музея

Алексей Васильевич Шубников\*, такой же энтузиаст и упорный исследователь, как и его учитель, достойно продолжил его дело. В 1925 г. он организовал работы по росту кристаллов в Ленинграде при Минералогическом кабинете. В 1932 г. Шубников организовал лабораторию кристаллографии в Ломоносовском институте геохимии, минералогии и кристаллографии АН СССР (Москва). В 1937 г. он организовал и возглавил Лабораторию кристаллографии АН СССР, которая в 1943 г. переросла в Институт кристаллографии. В настоящее время ИК РАН носит имя А.В.Шубникова. Одной из наиболее важных тематик лаборатории и Института было выращивание кристаллов кварца для раций (радиостанций) и других пьезоэлектрических элементов, которые еще во время своей учебы в университете исследовал Вульф.

В июле 1915 г., во время войны, Вульф выступает с инициативой создания в Тарусе народных домов. Он направляет в городскую думу письмо, в котором ратует за образование и просвещение народа, за организацию досуга рабочего люда. Он пишет: «Город Таруса в борьбе с пьянством был в первых рядах — он неоднократно ходатайствовал о запрещении продажи спиртных напитков навсегда. Большой прилив силы почувствовал русский народ, порвав с пьянством, но надо постараться закрепить и использовать победу над водкой, а для этого необходимо дать народу возможность употребить свой досуг на полезные

и разумные развлечения и на поучительные занятия...» (с.165). В ходатайстве высказано желание об организации в народном доме театра, библиотеки, читальни, музея, воскресной школы и чайной. Вульфы жертвуют на его устройство 4 тыс. руб. Народный дом был создан. В дачный сезон в нем устраивались выступления местных художников, музыкантов, литераторов, а также спектакли. На его сцене была поставлена опера Поленова «Призраки Эллады». В постановке принимал участие и Вульф. Его жена аккомпанировала певцам на рояле.

Вера Васильевна не только участвовала в спектаклях, но и независимо от них устраивала в своем доме «субботники» — музыкальные вечера, на которых давались бесплатные кон-

\* Об Алексее Васильевиче Шубникове и его борьбе за создание Института кристаллографии см.: *Шагина Н.М.* Предыстория Института кристаллографии АН СССР // *Природа*. 2014. №1. С.43—51.



церты классической и народной музыки, а Георгий Викторович пел романсы под аккомпанемент супруги. Концерты Веры Васильевны продолжались почти без перерывов все время послереволюционной разрухи (с 1917 по 1922 г.). Несмотря ни на что каждую субботу звучала в ее доме музыка для всех желающих ее слушать.

Между тем, жизнь в послереволюционные годы была тяжелой. Живя в «Песочном», Вера Васильевна зарабатывала «на кусок хлеба» уроками музыки. Георгий Викторович мог приезжать в деревню только на выходные. С транспортом было плохо. Приходилось идти пешком от железной дороги 17, а то и 34 км (от Серпухова), неся в рюкзаке продукты, свечи, керосин. Вера Васильевна числилась в Комиссии по охране памятников искусства и старины как известная художница. Это спасло семью от «уплотнения». Ей удалось добиться от властей охранной грамоты на квартиру в Москве, которая была признана мастерской, и признания дома в «Песочном» музеем.

В мае 1917 г. Вульф был восстановлен в должности приват-доцента на кафедре минералогии, кристаллографии и петрографии физико-математического факультета Московского университета. Возвратившись в Московский университет, Вульф продолжил преподавание в университете Шанявского и на Высших женских курсах, участвовал в работе организованного А.Ф.Иоффе Государственного рентгенологического и радиологического института в Петрограде, преподавал кристаллографию на физико-механическом факультете Петроградского политехнического института. После Октябрьской революции он активно включился в работу Высшего совета народного хозяйства. Научно-технический отдел ВСНХ занимался организацией новых институтов, в основном прикладных направлений, поскольку такая наука в России отсутствовала вовсе.

В послереволюционные годы всеобщей разрухи преподавать и работать приходилось в тяжелых условиях. На университетских заседаниях не раз обсуждались вопросы бедственного положения ученых. В 1920 г. была создана комиссия под председательством Н.Д.Зелинского для составления докладной записки в советские органы. В ней подробно описывалось катастрофи-



Сцена из спектакля «Призраки Эллады», Вульф — крайний слева. 1915 г.

ческое положение высшей школы и предлагались некоторые меры, способные хоть в какой-то мере выправить положение. Конечно, эта докладная записка ничего не изменила. Тем не менее, в этот последний, самый тяжелый период жизни, Вульф выполнил целый ряд весьма интересных исследований. Он опубликовал ряд обзоров в русских и зарубежных журналах и несколько оригинальных работ в разных областях кристаллографии. В качестве председателя Общества распространения физических наук им. Н.А.Умова Георгий Викторович вел активную (насколько это было возможно в то тяжелое время) просветительскую работу.

В 1918 г. Вульф становится профессором, а в 1921 г. его избирают членом-корреспондентом Российской академии наук.

Так Вульфы прожили самые тяжелые годы. В 1922 г. жизнь начала немного налаживаться. Вера Васильевна стала ездить в Москву, выставлять свои оригинальные работы на Художественно-промышленной выставке и на вернисаже объединения «Союз». Но в 1923 г. в Москве она заболела и скончалась. После смерти супруги Георгий Викторович не изменил свой образ жизни и каждое лето проводил в Тарусе вплоть до своей кончины в декабре 1925 г. После его смерти музей в «Песочном» прекратил свое существование, а сам дом был разрушен. Вульф завещал похоронить его на косогоре, над рекой Окой, рядом с Верой Васильевной. Недалеко покоится и художник В.Э.Борисов-Мусатов. ■



# Эволюция сквозь призму геномики

С.А.Боринская,

доктор биологических наук

Институт общей генетики им.Н.И.Вавилова РАН  
Москва

Эту книгу стоит прочесть каждому интересующемуся современным состоянием науки о происхождении и развитии жизни на Земле. Естественно, со времен Дарвина представления о биологической эволюции значительно изменились. Примерно два десятилетия назад, когда биологи перешли от изучения отдельных признаков и генов к исследованию полных собраний «генетических текстов» — к анализу геномов, появились недоступные ранее возможности для выдвижения и проверки гипотез.

Как известно, первый бактериальный геном был прочтен (секвенирован) в 1995 г., а первый вирусный — почти на 20 лет раньше. С тех пор благодаря бурному развитию технологии секвенирования расшифрованы последовательности нуклеотидов уже тысяч различных организмов (от мелких вирусов и прокариот до крупных геномов высших растений и млекопитающих, включая человека), причем для некоторых видов собрана генетическая информация от множества отдельных особей, что позволяет оценивать внутривидовую изменчивость на уровне ДНК.

Для анализа накопленных массивов данных о структуре геномов, регуляции генов, взаимодействии молекул РНК, белков и метаболитов разработаны изощренные статистические процедуры и методы компьютерного анализа, ставшие ос-

новным инструментом новых направлений науки — сравнительной геномики и системной биологии. Полученные результаты надо обобщить. По мнению одного из пионеров этого направления Е.В.Кунина (автора книги), такое обобщение потребует трудов еще двух научных поколений. Но уже сейчас он сделал попытку наметить черты будущей теории, выявить области эволюционной биологии, в которых накопленные данные противоречат сложившимся ранее представлениям, и предложить некоторые предварительные решения.

Значительная часть книги основана на собственных работах автора. Евгений Викторович — выпускник кафедры вирусологии биологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. В 1983 г. там же защитил кандидатскую диссертацию под руководством известного российского вирусолога В.И.Агола. До 1991 г. работал в московских НИИ, затем переехал в США и ныне возглавляет группу эволюционной геномики в Национальном центре биотехнологической информации (Бетезда, штат Мэриленд).

«Логика случая» сначала вышла на английском языке [1], на русский книга была переведена группой энтузиастов, согласовавших свою работу в социальной сети «Живой журнал». «Люди по-прежнему делают важные дела не за деньги», — пишет в своей рецензии один из переводчиков, Д.Тулинов и от-



**Кунин Е.В.** ЛОГИКА СЛУЧАЯ: О ПРИРОДЕ И ПРОИСХОЖДЕНИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ.

М.: Центрполиграф, 2014.  
527 с.

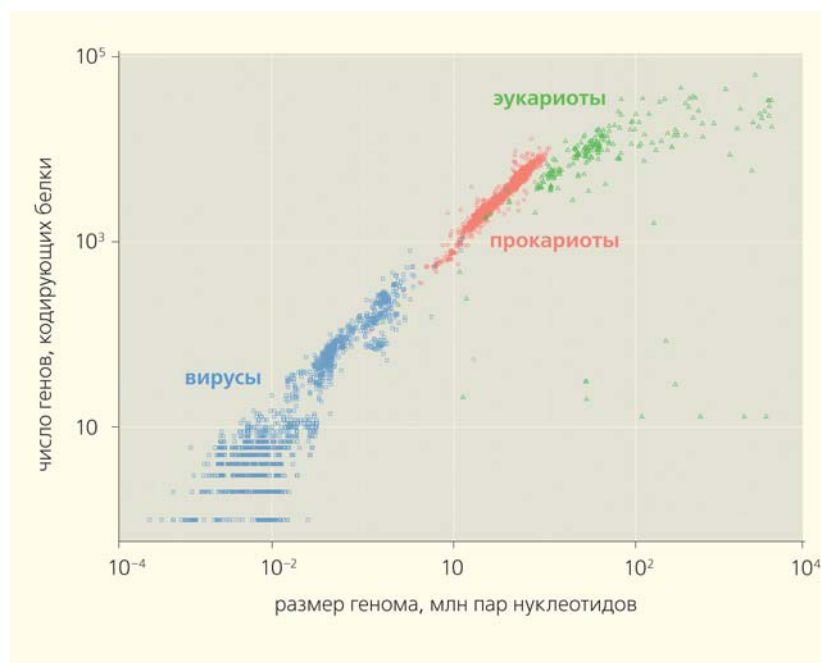
мечает, что, хотя вряд ли такой способ должен становиться правилом, в отношении «Логики случая» он стал следствием ее незаурядности\*. Перевод был отредактирован автором книги и снабжен дополнительными комментариями.

Книга задумана как научно-популярная, но получилась гораздо ближе к научной. Однако язык ее столь ясен, что для понимания основных положений книги требуются лишь базовые знания биологии.

В 13 главах последовательно изложены история и современное состояние эволюционной биологии сквозь призму сравнительной геномики. Основная часть книги дополнена двумя приложениями: философским (о природе и целях научных исследований) и космологическим (описывающим инфляционную модель эволюции Вселенной и теорию «мира многих миров»). Оба приложения автор использует как «контекст», в который он пытается вписать концепцию эволюции жизни.

В предисловии и введении Евгений Викторович признается в своем пристрастии к изучению вирусов, с которых он начал свою научную карьеру, и отмечает ключевые изменения концептуальной структуры биологии, побудивших его написать книгу. К ним относятся отход от представлений о древе жизни как центральной метафоре эволюционной биологии (данные геномики показывают, что в эволюции вирусов и прокариот понятие древа неприменимо), и о любом эволюционном событии как адаптивном (адаптивность надо не подразумевать, а доказывать). Еще одна причина — изменение взглядов на соотношение случайности и закономерности в эволюции. Взаимодействие между случайными и упорядоченными процессами — главная тема книги, и роль

\* Тулинов Д. Эволюция теории эволюции // Троицкий вариант. 2014. №149. С.8.



Общий размер геномов и число генов у вирусов, прокариот и эукариот (в рецензируемой книге см. рис.3-2, с.71). Данные опубликованы на веб-сайте Национального центра биотехнологических исследований (США).

случайности в эволюции в свете современных данных оказывается намного больше, чем это можно было представить ранее.

### Развитие эволюционных концепций

История эволюционного учения изложена в книге столь четко и ясно, что это описание могло бы украсить любой учебник. В первых главах также объясняется, почему необходимы пересмотр и систематизация представлений об эволюции жизни. Автор проводит детальный анализ того, какие положения дарвинизма и более поздних концепций актуальны поныне, а какие следует поместить в музей истории науки. Анализ этот проведен с акцентом на основную тему книги — соотношение роли случайности и закономерности в эволюции, и для каждой концепции указано, какую роль она отводит случайности.

Термин «дарвинизм» Кунин использует только в исторической части, справедливо отмечая,

что термин неудачный — никто не говорит «ньютонизм» или «энштейнизм», а например «морганизм» с различными дополнениями можно найти исключительно в идеологизированном негативном контексте. Называть современную эволюционную биологию дарвинизмом — смысловая и историческая ошибка.

Автор книги формулирует три важных обобщения, сделанных Дарвином. В отличие от теории современников, его естественнонаучное объяснение эволюции не привлекало телеологические силы или стремление к совершенствованию. Дарвин предложил конкретный механизм эволюции, основанный на взаимодействии между наследственной изменчивостью и естественным отбором. Идеи эволюции он расширил на всю историю жизни, которая была представлена древом, восходившим к общему корню. В построениях Ламарка случайность отсутствовала, а по Дарвину изменчивость случайна, а отбор направлен и создает сложность. Противо-

речия, с которыми столкнулась его теория в XIX в., включали оценку возраста Земли (проблема разрешилась в начале XX в. — после открытия радиоактивности оценка была увеличена с сотни миллионов до нескольких миллиардов лет). Другая проблема — эволюция сложных органов. Дарвин предположил, что она идет через серию промежуточных стадий, каждая из которых частично выполняет функцию развивающегося сложного органа. Еще одной серьезной проблемой был «кошмар Дженкина», названный так по имени читателя, обратившего внимание на то, что благоприятные признаки «растворяются» от поколения к поколению. Дискретная природа «наследственных задатков», открытая Менделем, не была известна Дарвину, и он предложил откровенно слабую теорию пангенеза. Эта проблема исчезла после переоткрытия законов генетики и последующего развития синтетической теории эволюции. Удивительно, но сначала считалось, что генетика опровергает теорию Дарвина. Причиной тому было представление о мутациях как скачкообразных процессах, тогда как постепенные изменения, градуализм, считались неотъемлемой частью дарвинизма.

Объединение дарвинизма и генетики произошло в 1920—1950-х годах. Основы были заложены трудами основателей популяционной генетики — Р.Фишера, С.Райта и Дж.Б.Холдейна. Они разработали модели, в которых эволюции были подвержены группы скрещивающихся особей — популяции. Фишер показал, что интенсивность отбора зависит от размера популяции (точнее, ее эффективного размера — той части, которая оставляет потомство). Райт внес понятие «дрейф генов». Этот процесс играет важнейшую роль в эволюции малой популяции, в которой за счет дрейфа могут закрепиться нейтральные или даже вредные мутации. Тем самым Райт указал на то, что случайность

проявляется не только в возникновении изменений, но и в их закреплении. Как формулирует Кунин, дрейф генов забирает у отбора часть ответственности. Однако открытие Райта было упущено в формулировках «современного синтеза». Этот термин, введенный в 1942 г. Дж.Хаксли, используется преимущественно в США, в европейской литературе принято писать «неодарвинизм», в русскоязычной — «синтетическая теория эволюции» (СТЭ). В СТЭ не придавалось значения и еще одной модели, описанной Дж.Мейнардом-Смитом, — случайному закреплению нейтральных или слабо вредных мутаций из-за их сцепления с полезной мутацией.

«Современный синтез» (или формулирование СТЭ) был проведен генетиком Ф.Добржанским, зоологом Э.Майром и палеонтологом Дж.Г.Симпсоном. Симпсон реконструировал картину эволюции на основе палеонтологической летописи и описал периоды стазиса в эволюции многих видов, чередующиеся с периодами быстрой смены доминирующих видов (концепция квантовой эволюции). Однако это представление не вошло в СТЭ. Кунин кратко резюмирует основные принципы эволюции, кодифицированные в СТЭ, следующим образом: случайные мутации — единственный источник эволюционно значимых изменений; естественный отбор (наряду со случайной изменчивостью) — основная движущая сила эволюции. Результат — фиксация редких полезных и элиминация вредных изменений; полезные изменения малы (градуализм); эволюционные процессы не меняются по существу на протяжении истории жизни и на разных уровнях эволюционных изменений; древо рассматривается как метафора эволюции жизни, из чего следует существование единого общего предка или нескольких форм-предшественников.

Позже С.Дж.Гулд и Н.Элдридж собрали обширные данные, по-

казывающие, что история многих видов, восстанавливаемая по палеонтологической летописи, соответствует состоянию стазиса, перемежающемуся внезапным в масштабах летописи исчезновением одних видов и замещением новыми видами. Сформулированная концепция прерывистого равновесия противоречила градуализму. Постепенности изменений противостояла и разработанная С.Оно концепция эволюции путем дубликации гена. В конце 1970-х адапционизм СТЭ был атакован Гулдом и Р.С.Левонтиным, которые призывали не только искать адапционистские объяснения, но и учитывать случайный дрейф, внутренние ограничения и другие факторы.

Отмечая достоинства СТЭ, Кунин называет ее догматичной и удручающе незаконченной теорией, относя к ее недостаткам бездоказательное распространение механизмов и закономерностей микроэволюции на макроэволюционные процессы, а также отсутствие представлений об эволюции микробов и о происхождении жизни. Соотношение достоинств и недостатков СТЭ можно представить с другими акцентами, но именно перечисленные проблемы удастся разрешить (или хотя бы наметить пути решения) с использованием геномных данных.

Переход к геномному подходу в изучении эволюции был заложен открытием двойной спирали ДНК Дж.Уотсоном и Ф.Криком. Как изящно формулирует Кунин, они «вывели из структуры ДНК биологическое воплощение общего принципа цифрового хранения, кодирования и передачи информации». При этом принцип комплементарности, или принцип Чаргаффа (напротив нуклеотида аденина встраивается тимин или его эквивалент урацил, если речь идет о РНК, а напротив гуанина — цитозин), работает и при репликации, и при синтезе любых видов РНК, и при синтезе белка (комплементарность кодона мРНК и антико-



дона тРНК). Из теории информации следует, что «передача информации абсолютно без ошибок невозможна в принципе», а из законов термодинамики — что «снижение уровня ошибок возможно только за счет затраты энергии». Кунин формулирует принцип подверженной ошибкам репликации, впервые описанный М.Эйгеном, в виде обобщения: «Репликация цифровых носителей информации неизбежно подвержена ошибкам, что влечет за собой эволюцию этих носителей путем естественного отбора и случайного дрейфа генов при условии, что уровень ошибок репликации ниже катастрофического порога, имеющего порядок величин от одной до десяти ошибок на геном за один цикл репликации» (с.40). Затем автор обсуждает верхний и нижний пороги ошибок репликации, обеспечивающие, с одной стороны, возможность сохранения жизни, с другой — разнообразие, достаточное для эволюционного процесса.

Далее следует перечисление ключевых открытий и подходов, легших в основу эволюционной геномики. Это концепция «молекулярных часов» Л.Полинга и Э.Цукеркандля; нейтральная теория молекулярной эволюции М.Кимуры; развитие различных подходов к сравнению нуклеотидных последовательностей генов и геномов, начало чему было положено при анализе вирусных

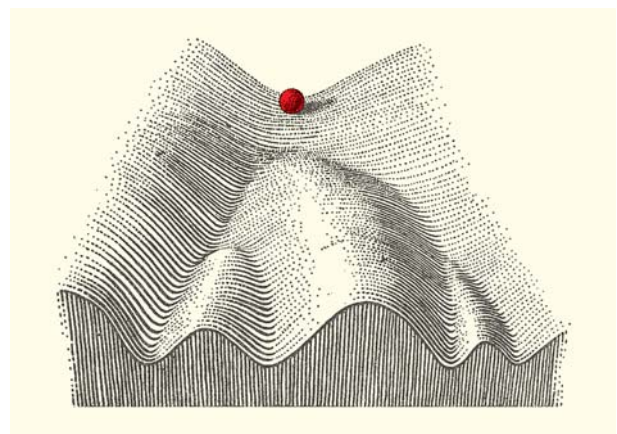
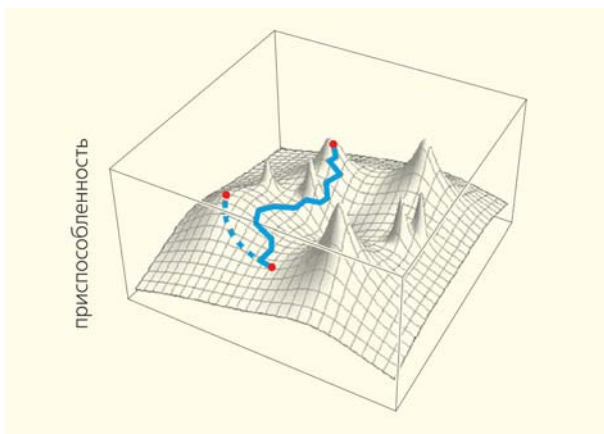
геномов и позже модифицировано при исследовании геномов бактерий для построения филогенетических деревьев; появление критериев, позволяющих выявить действие отбора, при изучении белок-кодирующих последовательностей нуклеотидов (по соотношению замен нуклеотидов, меняющих кодируемую аминокислоту, и так называемых синонимичных замен, не влияющих на последовательность аминокислот). Автор отмечает, что качественная идея Дарвина, выраженная в абстрактной математической форме Фишером и проверенная экспериментально генетиком Добржанским, получила в геномике вид прямо измеряемого статистического параметра, характеризующего последовательность нуклеотидов.

Огромную роль сыграли открытия конца XX в., сделанные К.Вёзе и его коллегами. Они обнаружили консервативность рРНК. Она настолько консервативна, что сходство последовательностей нуклеотидов видно от бактерий до высших организмов. Это позволило построить филогенетическое древо рРНК, отражающее взаимоотношения всех клеточных форм жизни. При этом обнаружилось, что прокариоты разделяются на две группы, названные зубактериями (собственно бактериями) и архебактериями (или археями). Результатом этих работ стало трехдоменное древо жиз-

ни, включающее домен эукариот и два домена прокариот — бактерий и архей.

Филогенетический анализ ДНК из митохондрий и хлоропластов подтвердил симбиотическую теорию происхождения эукариот, развиваемую Л.Маргулис. По митохондриальной ДНК они оказались сходными с альфа-протеобактериями, а по хлоропластной — с цианобактериями. Симбиотическое происхождение хлоропластов предполагали русские исследователи еще в начале XX в., но окончательное подтверждение оно получило при обнаружении сходства геномов этих клеточных оргanelл с геномами прокариот.

Существенными для развития эволюционной биологии были концепции С.Райта и К.Уоддингтона. Райт ввел понятие адаптивного ландшафта, отображающего результаты математического анализа отбора в виде «адаптивных пиков» и разделяющих их долин. В большой популяции эволюционная траектория быстро выходит на пик адаптивности (на рисунке показано сплошной линией), а в малой популяции дрейф генов может «уводить» популяцию от адаптивных пиков (пунктирная линия). Идея эпигенетического ландшафта принадлежит Уоддингтону. Он независимо нашел сходную форму представления возможного пути развития эмбриона, представленного в виде



Адаптивный ландшафт Райта (в рецензируемой книге см. рис. 1-2, с.27) и эпигенетический ландшафт Уоддингтона [2].

шарика на склоне, а глубина каналов соответствует вероятности каждой траектории. Наличие каналов обеспечивает устойчивость развития к возмущениям, вызванным факторами среды или мутациями. Внешнее давление может нарушить канализированное развитие («перебросить» шарик в мелкий канал) и обнаружить скрытую изменчивость.

Кунин отмечает концепцию эгоистичных генов, предложенную в 1976 г. Р.Докинзом. Он пришел к выводу, что естественный отбор может действовать не только на уровне организма в целом, но и на уровне индивидуального гена. Автор «Логика случая» не рассматривает в данном разделе другой полюс действия отбора — группу, или, выражаясь более современным языком, многоуровневый отбор. Концепция группового отбора выпала из основного направления эволюционных исследований [3]. При изучении геномов можно анализировать «эгоистичные гены», но для того чтобы геномика «увидела» групповой отбор, надо предположить, как он может отображаться на уровне нуклеотидных последовательностей. Однако групповой отбор упоминается при описании доклеточных этапов эволюции жизни (глава 11).

Избранные автором книги темы охватывают описание эволюции геномов в целом (глава 3 — «Сравнительная геномика: эволюционирующие геномные ландшафты» и глава 4 — «Геномика, системная биология и универсалии эволюции: эволюция генома как феномен статистической физики); ниспровержение древа жизни как основной презентации хода эволюционного процесса (глава 5 — «Сетевая геномика мира прокариот: вертикальные и горизонтальные потоки генов, мобиломы и динамика пангеномов» и глава 6 — «Филогенетический лес и поиск неуловимого древа жизни в век геномики»); происхождение эукариот в результате симбиоза архей и бактерий, с изложением

оригинальной концепции развития системы внутренних мембран и ряда других характерных для эукариотической клетки особенностей как защиты от инвазии бактериальных генов (глава 7 — «Происхождение эукариот: эндосимбиоз, удивительная история интронов и исключительная важность единичных событий в эволюции»); анализ истоков биологической сложности (глава 8 — «Неадаптивная нулевая гипотеза эволюции геномов и истоки биологической сложности»); эволюцию эволюционности с предложением оригинальной схемы взаимодействия режимов эволюции (глава 9 — «Ламарковский, дарвиновский и райтовский режимы эволюции, эволюция эволюционности, надежность биологических систем и созидательная роль шума в эволюции»); систематизацию мира вирусов и их эволюции с позиций геномики (глава 10 — «Мир вирусов и его эволюция»); происхождение жизни (глава 11 — «Последний универсальный общий предок, происхождение клеток и первичный резервуар генов» и глава 12 — «Происхождение жизни. Возникновение трансляции, репликации, метаболизма и мембран: биологический, геохимический и космологический подходы»). В заключительной главе автор обобщает изложенные им представления об эволюции жизни и очерчивает возможный облик постсовременной теории эволюции. «Постсовременная» (в английском варианте — *post-modern*), подразумевает одновременно и «после СТЭ» (после «Modern Synthesis») и «постмодернистское» (в смысле объединения, казалось бы, взаимоисключающих представлений). В предисловии автор предупреждает, что книга — сборник глав по избранным темам и не претендует быть всеохватывающим трудом.

Рассмотрим нетривиальные факты, эмпирически обоснованные выводы и четко отделенные от них гипотезы, приведен-

ные в книге. Остановимся на самых ярких примерах, которые иллюстрируют возможности геномного подхода к изучению эволюции.

### Развитие геномики и современные эволюционные концепции

Сравнение геномов показало, что сами гены относительно устойчивы (т.е. остаются сходными у различных организмов на протяжении миллиардов лет эволюции), тогда как геновый состав и устройство геномов меняются довольно быстро. Почти во всех геномах клеточных организмов представлено «ядро жизни» примерно из 70 высококонсервативных генов. Их доля в каждом конкретном геноме составляет менее 1—10%. От 10% до 30% приходится на малоконсервативные гены (встречающиеся в узкой группе организмов) и те, которые не найдены в других изученных геномах. Остальное — умеренно консервативные гены примерно из 5000 групп (кластеров). Элементарные события эволюции генов и геномов сходны (и, добавим вслед за высказанным в рецензии М.С.Гельфанда\* сетовании об упущенной лингвистической параллели, соответствуют тем ошибкам, которые делает переписчик в тексте): замене (нуклеотида в гене или замещению одного гена другим в геноме соответственно), потере (делеции), вставке, рекомбинации, дупликации.

Интересное следствие возможности замещения генов (выполнение неродственным геном одной и той же функции) — отсутствие универсального минимального набора генов, обеспечивающего жизнь клетки. Минимальный набор генов может быть реконструирован при сравнении геномов минимального размера (это геномы пара-

\* Гельфанд М. Логика Кунина // Троицкий вариант. 2014. №157. С.10.

зитических бактерий, содержащие немногие сотни генов). Среди них преобладают гены, кодирующие белки трансляции, транскрипции и репликации. Представлены были и белки транспортной системы, и ферменты. Большинство генов из этого списка действительно необходимы для выживания клетки, как показали эксперименты с нокаутом (инактивацией) генов. Но возможность замещения генов приводит к тому, что у разных организмов минимальный набор функций, необходимых для выживания клетки, выполняется самыми разнообразными генными ансамблями.

Анализ обширных массивов данных о строении генов и геномов приводит Кунина к выводу, что общие закономерности эволюции геномов и молекулярных фенотипов описываются стохастическими процессами (вот оно, царство случая!), ограниченными необходимостью сохранять жизнеспособность клетки (поддерживать «существующую общую, но неспецифичную, архитектуру генома и устройства клеток»). Это сохранение обеспечивается очищающим отбором (кто не сохранил, тот вымер). Адаптивным процессам отводится роль модулятора этих стохастических закономерностей. Происходят они в значительной мере за счет добавления к существующему новым частям из уже имеющихся «подручных материалов». Эта идея, сформулированная Ф.Жакобом, отлично подтверждается на геномном уровне.

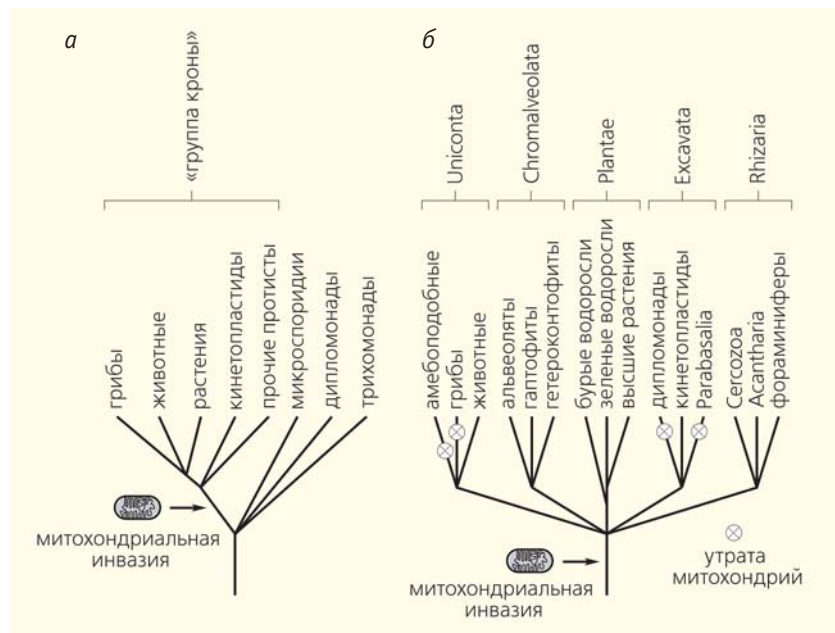
Здесь следует отметить, что понимание эволюции и адаптации теми, кто разглядывает нуклеотидные последовательности, порой значительно отличается от представлений тех, кто судит об эволюции с точки зрения «классических» (наблюдаемых вооруженным различными оптическими приборами глазом) признаков, использовавшихся до «геномного переворота». В поле зрения «классических» биологов вообще не попадают ни синони-

мичные замены нуклеотидов, ни замены аминокислот, не влияющие на функции белка. А занимающиеся геномикой специалисты «видят» как значимые изменения (не всегда имея молекулярные инструменты для оценки их адаптивности или вредности), так и нейтральные, которых на уровне генома, естественно, заметно больше. Здесь Кунин проводит параллель между эволюционной биологией и статистической физикой, отмечая проявление общих статистических принципов в поведении больших ансамблей слабо взаимодействующих объектов. По крайней мере на молекулярном уровне это так и выглядит. А следствия для макроуровня должны обсуждаться дополнительно.

Невозможно не согласиться с автором и в том, что важнейшее достижение эволюции — это появление клетки и что большая часть наиболее эволю-

ционно значимых событий произошла в первые сотни миллионов лет существования жизни на Земле, до появления современного типа клеток. Однако утверждение, что все остальное не так уж важно, — пожалуй, преувеличение. Дом без фундамента невозможен, но живем-то мы в доме, а не в фундаменте. К тому же, если когда-нибудь выяснится, как появились репликаторы на основе нуклеиновых кислот, «самое важное» может сжаться до этого самого появления, так как все остальное — следствие реализации на их основе принципа подверженной ошибкам репликации в условиях ограниченной доступности жизненных ресурсов.

Одним из важных следствий расширения в сторону мира прокариот материала, рассматриваемого в эволюционных исследованиях, стало падение метафоры «древо жизни». Да и у высших эу-



Различные модели происхождения эукариот (в рецензируемой книге см. рис. 7-2, с.209). На «археозойном» древе (а) таксоны «группы кроны» имеют митохондрии, остальные (археозои) считались ранней ветвью эукариот. На «лучевом» древе (б) отсутствие митохондрий в некоторых группах объясняется их утратой (преобразованием в митохондриеподобные органеллы), а не ранним отделением групп. Лишь три супергруппы (Uniconta, Plantae и Chromalveolata) из пяти включают многоклеточные организмы. Хотя животные и растения — наиболее заметные формы жизни, огромное разнообразие эукариот определяется одноклеточными формами.



кариот, как оказалось, основная часть генома состоит из остатков вирусных геномов (у млекопитающих — на две трети). Кунин подробно разбирает различные сочетания представлений о сетевых компонентах (которые были сформулированы, когда стало ясно, что горизонтальный перенос генов у прокариот — не редкое исключение, а общее правило) и о древовидных составляющих эволюционных траекторий. Он отмечает, что инструментарий и концепции для анализа соотношения древовидных и сетевидных процессов в эволюции еще предстоит разработать.

Весьма интересным представляется привлечение геномных данных к реконструкции симбиогенеза, в результате которого появились эукариоты, и попыткам найти корень «эукариотического дерева». Сам процесс эукариогенеза замечательно иллюстрирует роль случая в эволюции (выбор партнеров при захвате археей протомитохондриального эндосимбионта произошел случайно). Кунин описал цепь событий, которые были инициированы симбиогенезом, и для некоторых из них предложил оригинальные объяснения. Это гипотеза «храповика», перетаскивающего гены симбионта в геном хозяина; гипотеза появления структур (ядерной мембраны) и процессов (вырезание интронов), характерных для эукариотической клетки, в результате защиты от вторжения генов симбионта. Возникновение рекомбинации и полового размножения у эукариот заместило утраченную (или, по крайней мере, сильно ограниченную) способность к горизонтальному переносу генов, который обеспечивал генетическое разнообразие, необходимое для эволюции.

Не менее интересна гипотеза о росте сложности генома не в результате адаптации, а в результате «недосмотра» очищающего отбора. На огромных популяциях прокариот такой отбор успевает оптимизировать геномы и убрать из них слабовредные мутации и некодирующий «мусор», поэтому в геномах прокариот «существенная» информация размещена гораздо плотнее. Популяции эукариот имеют более низкую численность,

и очищающий отбор в них слабее. Сохранение элемента в геноме может быть связано с тем, что этот элемент адаптивен, необходим для выживания, а может объясняться и тем, что слабый очищающий отбор не успевает устранить неадаптивные предковые особенности и в их геномах большая доля последовательностей отбору безразлична и потому неконсервативна.

В предложенном Куниним описании не учитывается, что эукариоты возникли и жили в среде, значительно отличающейся от той, в которой произошло становление первичных прокариотических клеток. Прокариоты были не только организмами, из геномов которых компоновались ДНК-последовательности эукариот, но и частью среды (пищей, конкурентами, паразитами, хищниками и т.д.), к которой эукариотам пришлось адаптироваться. Именно присутствие прокариот в среде могло задавать некоторые адаптивные свойства эукариотической клетки (например, размер), реализованные с помощью описанных автором молекулярных механизмов с сильной стохастиче-

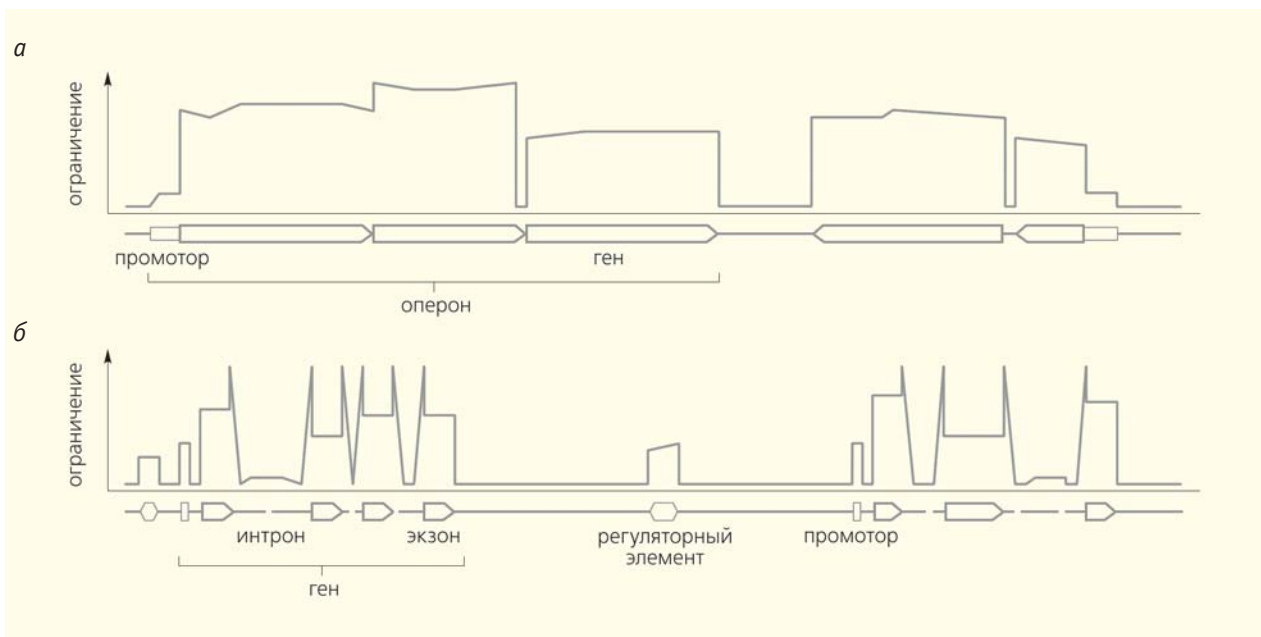
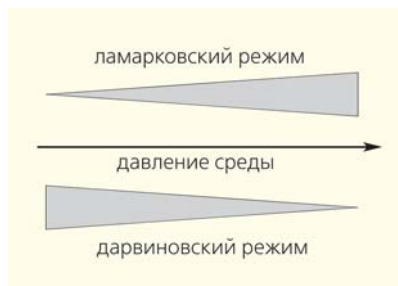


Схема распределения эволюционных ограничений в геномах прокариот (а) и эукариот (б). В геномах эукариот есть протяженные участки, «безразличные» отбору, последовательности нуклеотидов в них высокоизменчивы (см. рис.3-7, с.82).

ской составляющей. Можно было бы порассуждать о взаимоотношениях эволюции эукариот с миром прокариот за рамками симбиогенеза, но ведь автор всеохватывающего труда и не обещал.

Принципиально важны для понимания эволюции утверждение, что «способность эволюционировать тоже эволюционирует» (с.450), и предложенное в книге многофакторное представление эволюционного процесса. В зависимости от давления среды и размера популяции выделены три эволюционных режима. В популяциях малого размера случайные мутации фиксируются случайно, в результате дрейфа (райтовский режим). В больших популяциях факторы среды влияют на отбор. При слабом ее давлении эволюция идет в дарвиновском режиме, при сильном — в (квази)ламарковском. В качестве многочисленных примеров последнего приведены горизонтальный перенос генов, CRISP-система антивирусного иммунитета бактерий и стресс-индуцированный мутагенез. Приставка «квази» означает, что механизм не чисто ламарковский (он кратко и емко описан в главе 9), а такой, в котором стимул из внешней среды используется для изменения генома, а возникающая модификация адаптивна (напрямую влияет на адаптацию к фактору, вызвавшему изменение) и наследуется потомками клетки.



Переход от дарвиновского к (квази)ламарковскому режиму эволюции в зависимости от давления среды (см. рис.9-3, с.312).

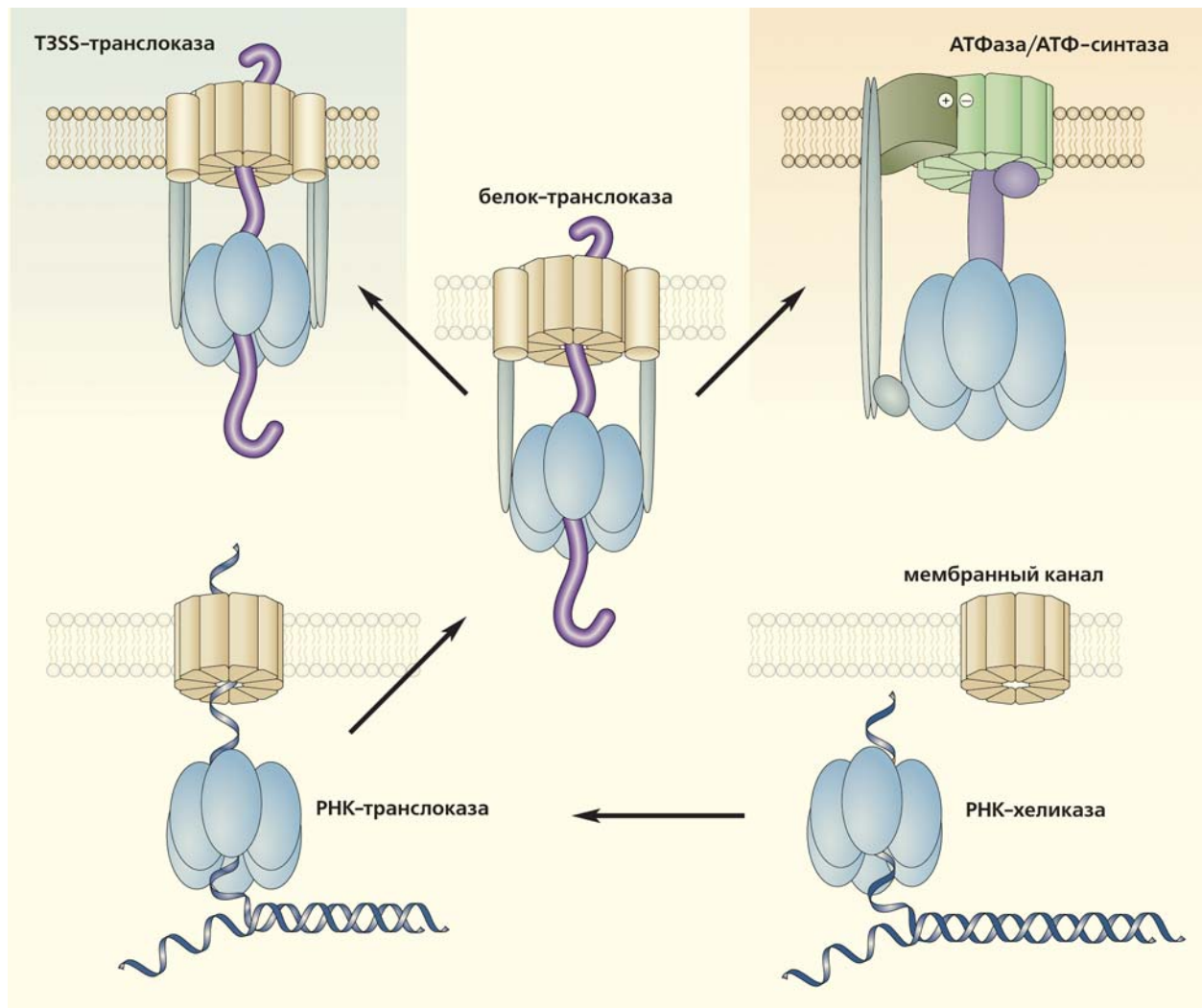
## Происхождение жизни

Сравнение геномов архей и бактерий позволило реконструировать генный репертуар последнего общего предка клеточных форм жизни (Last Universal Common Ancestor, LUCA). В пользу существования LUCA свидетельствуют следующие аргументы: сходство систем трансляции всех организмов — общий генетический код (соответствие нуклеотидных триплетов кодируемым ими аминокислотам); сходная структура рибосом (в их состав входит три универсально консервативных рРНК и несколько десятков белков, из которых 20 универсальны); универсальные компоненты системы трансляции (она включает 30 тРНК, несколько ферментов и других белков). Кроме того, консервативны гены трех субъединиц РНК-полимеразы — молекулярной машины, синтезирующей РНК на матрице ДНК. Помимо этого набора LUCA имел гены, кодирующие ферменты основного энергетического обмена, биосинтеза аминокислот, субъединицы протонной АТФазы и SRP-частиц (частиц узнавания сигналов). Однако в список не попадают ключевые компоненты репликации ДНК и основные ферменты биогенеза мембран, так как они сильно отличаются у бактерий и архей. Это сочетание фактов может объясняться тем, что LUCA был бесклеточным организмом с вирусоподобными РНК-геномами, который реплицировался рибозимами. «Коллекции» РНК-организмов населяли неорганические ячейки и обменивались генетическим материалом. Синтез белка (трансляция) появился позже, синтез ДНК и клеточная мембрана — еще позднее. Кунин отмечает, что одним из центральных моментов появления клеточных форм жизни служит переход от отбора на уровне отдельных генетических элементов к отбору на уровне ансамблей таких элементов. «Важно заметить, что такой переход с одного уровня се-

лекции на другой, по-видимому, лежит в основе многих принципиальных инноваций в эволюции жизни», — пишет Кунин (с.385), при этом он ссылается на знаменитую книгу Дж.Мейнарда-Смита и Э.Сатмари [4]. Английский эволюционный биолог Мейнард-Смит известен развитием концепции эволюционно стабильной стратегии, которая, будучи принята достаточно большим числом членов популяции, не может быть вытеснена никакой другой стратегией. Его венгерский коллега Сатмари разработал математические модели, показывающие возможность группового отбора в ансамблях репликаторов, самовоспроизводящихся в среде, разделенной на ячейки. Кооперация путем разделения функций, согласно цитируемой Куниним работе Дж.Морриса с соавторами [5], — один из главных факторов эволюции микробных сообществ, и такая кооперация могла осуществляться в доклеточных генетических ансамблях. В этом разделе стоило бы также упомянуть книгу нашего выдающегося физика и кибернетика В.Ф.Турчина о метасистемном переходе и его проявлениях в эволюции мира — от простейших одноклеточных организмов до возникновения мышления, развития науки и культуры [6]. Книга была написана, замечу, еще в 1970 г., правда, издана она только в начале 1990-х.

В примечании к русскому переводу Кунин отмечает, что в своей книге он уделил недостаточно внимания переходу селекции с одного уровня на другой и что в следующем издании (если оно состоится) это будет исправлено. На мой взгляд, отсутствие анализа переходов отбора с одного уровня на другой обедняет рассмотренные эволюции и такое дополнение было бы принципиально важным (возможно, ключевым) дополнением в понимании эволюции сложности.

В разделе о происхождении жизни Кунин рассматривает



Модель эволюции молекулярных моторов: происхождение АТФ-синтазы и бактериальных Т3SS-транслоказ из транслоказ, возникших при переходе временного объединения хеликаз с мембранными каналами (при транслокации РНК и белков) в постоянное (см. рис.11-3, с.388). Объяснение в тексте.

различные модели возникновения клеточных форм жизни. Роль вирусов в доклеточной эволюции и в клеточном мире в изложении автора оказывается гораздо весомее привычной. Он также приводит свидетельства в пользу мира РНК, рассказывает о происхождении репликации и трансляции, о природе и возникновении генетического кода, об эволюции белковых доменов, отмечая, что многие из предложенных сценариев остаются гипотетическими и не имеют достаточных экспериментальных подтверждений.

Стоит остановиться на красивом примере, иллюстрирую-

щем возможности тотального сравнения структуры белков, — на сценарии предполагаемого происхождения АТФ-синтазы [7]. Эта своего рода молекулярная динамо-машина превращает разность потенциалов на мембране (трансмембранную разность концентраций протонов или ионов натрия) в механическую работу (вращение ротора молекулярной машины), при которой из АДФ и фосфата синтезируется АТФ. Поиск белков, сходных по структуре с компонентами АТФ-синтазы, позволил предположить, что ее статор (заякоренные в мембране части) происходит из мем-

бранного канала, а ротор — из хеликазы (молекулярной машины, умеющей вращаться). В современных клетках хеликазы участвуют в важных клеточных процессах (репликации, репарации, транскрипции, трансляции, сплайсинге и др.). Они расплетают двунитевые участки ДНК или РНК, вращаясь вокруг расплетаемых молекул и обеспечивая свою работу гидролизом АТФ или ГТФ. Хеликазоподобная конструкция предположительно послужила основой транслоказы, объединяясь с мембранным каналом во время транслокации РНК или белка через древние мембраны. Затем,



с небольшими модификациями, транслоказа могла быть использована для выполнения другой функции, тоже требовавшей вращения. При этом временная конструкция из трех компонентов стала постоянной — вместо транслоцируемых молекул статор и ротор АТФ-синтазы соединены белковыми субъединицами.

В целом прекрасное изложение гипотез происхождения жизни и их пока далекого от исчерпывающего эмпирического обоснования приводит на память легендарный совет Н.В.Тимофеева-Ресовского обращаться за детальными описаниями происхождения жизни к А.И.Опарину, поскольку сам он «был тогда еще маленький» и не помнит. Теперь становится ясно, что за этими описаниями надо обращаться к Е.В.Кунину.

Значительный интерес представляют разделы «Происхождение жизни с точки зрения химии и геохимии» и «Радикальная альтернатива: космология вечной инфляции, переход от случайности к биологической эволюции в истории жизни и переоценка роли крайне редких событий в эволюции». Содержание разделов следует из их названия. По поводу последнего автор пишет в примечании, что изложенные в этом разделе идеи могут показаться читателям противоречащими здравому смыслу и представлением о научном методе, но тем не менее считает их важными (хотя и не главными) для обсуждения новых представлений обо всем эволюционном процессе. Понять этот раздел до та-

кой степени, чтобы кратко пересказать, удалось Г.Ю.Любарскому, к рецензии\* которого могут обратиться те, у кого возникнет желание ознакомиться с более простым, чем в книге, изложением связи происхождения жизни и современной космологии.

Среди прочего Кунин отмечает, что появлению первых репликаторов, ознаменовавшему начало эволюции путем естественного отбора (и дрейфа) предшествовала череда шагов химической эволюции, на которых биологические эволюционные механизмы еще не действовали. В приложении II он дает грубую оценку вероятности появления первых репликаторов — она оказывается очень низкой. Однако здесь можно не согласиться с автором. Представление, что эволюция путем естественного отбора (и дрейфа) началось только с появлением знакомых нам форм репликаторов вполне дискуссионно. Мы просто пока не знаем, какими могли быть репликаторы до появления нуклеиновых кислот. Гипотеза донуклеиновых репликаторов повышает вероятность известного нам результата химической эволюции. Можно попытаться рассматривать не мономеры и олигомеры — предшественники нуклеиновых кислот, а процессы, субстраты которых могли потом заместиться нуклеиновыми кислотами. Впрочем, эмпирических оснований для таких фан-

\*Любарский Г.Ю. Третий эволюционный синтез // Химия и жизнь. 2014. №5. С.40—44.

тазий пока существенно меньше, чем для гипотез, высказанных автором книги.

## На пути к третьему синтезу

«Логика случая» убедительно обосновывает необходимость третьего эволюционного синтеза, описывает полученные в экспериментах факты и их интерпретации, приведшие к смене парадигм, и ясно демонстрирует логику и возможности современного научного исследования и очерчивает широкую исследовательскую программу в области эволюционной биологии. «Понимание простых принципов эволюционной теории незаменимо для самых актуальных и практически важных исследований в современной биологии», — пишет Кунин. В том числе и для медицинских приложений геномных исследований, поскольку, как неоднократно подчеркивается в книге, геном не детерминирует фенотип и связь между ними достаточно сложна, что еще предстоит изучить и понять.

Даже если часть идей, высказанных в этой книге, будет со временем опровергнута, обойти труд Кунина в грядущем синтезе невозможно. Можно высказать замечания по содержанию книги (помимо немногих приведенных здесь, см. рецензию Гельфанда) и оформлению (например, понимать текст было бы легче, если бы книга содержала список сокращений), но сам выход книги такого масштаба — большое событие в российском интеллектуальном пространстве. ■

## Литература

1. Koonin E.V. The Logic of Chance: The Nature and Origin of Biological Evolution. New Jersey, 2011.
2. Waddington C.H. The Strategy of the Genes. L., 1957.
3. Wilson D.S., Wilson E.O. Evolution «for the good of the group» // American Scientist. 2008. V.96. №5. P.380—389.
4. Maynard Smith J., Szathmáry E. The Major Transitions in Evolution. Oxford, 1995.
5. Morris J.J., Lenski R.E., Zinser E.R. The Black Queen Hypothesis: evolution of dependencies through adaptive gene loss // Mbio. 2012. V.3. №2. e00036-12.
6. Турчин В.Ф. Феномен науки: кибернетический подход к эволюции. М., 1993.
7. Mulkiđjanian A.Y., Makarova K.S., Galperin M.Y., Koonin E.V. Inventing the dynamo machine: the evolution of the F-type and V-type ATPases // Nature Rev. Microbiol. 2007. №5. P.892—899.

## Метеорология. Физика атмосферы

**С.С.Зилитинкевич.** АТМОСФЕРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ПЛАНЕТАРНЫЕ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ. М.: Физматлит, 2013. 252 с.

Турбулентность свойственна практически всей атмосфере. Человечество занимает как раз планетарный пограничный слой, непосредственно испытывающий динамические и термические взаимодействия с земной поверхностью. В их числе трение ветра о поверхность и конвекция над нагретыми участками суши или моря. Эти два процесса и создают интенсивную турбулентность.

Основой книги стали статьи автора (многие исследования были проведены им совместно с коллегами), опубликованные за последнее десятилетие, главным образом в англоязычных журналах. В пяти главах рассмотрены ключевые физические проблемы, связанные с ролью пограничных слоев как связующих звеньев между геосферами в глобальной климатической системе: законы сопротивления и тепло/массообмена, уравнения турбулентного вовлечения (определяющие аналогичные потоки на внешней границе планетарного пограничного слоя) и уравнения для высоты пограничного слоя при различных условиях стратификации плотности. Автор разработал как новые подходы к расчету планетарного пограничного слоя, так и новую иерархию моделей турбулентного замыкания и новые методы расчета турбулентности в свободной атмосфере. Особое внимание уделено взаимодействию турбулентности с внутренними волнами в устойчиво стратифицированных течениях и самоорганизации турбулентности в форме долгоживущих крупномасштабных структур в конвективных слоях.



## Материаловедение

**А.М.Глезер, Н.А.Шурыгина.** АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ. М.: Физматлит, 2013. 452 с.

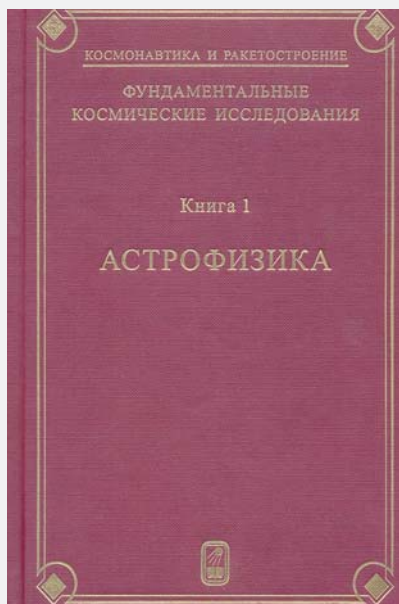


Аморфно-нанокристаллические сплавы — это новый класс материалов, родившихся на рубеже XX и XXI вв. в результате развития новых технологий, в особенности нанотехнологии. Необычность этих сплавов состоит прежде всего в том, что структурно-фазовые составляющие такой двухфазовой системы кардинальным образом различаются между собой по характеру атомной структуры.

В монографии последовательно рассмотрены способы получения аморфно-нанокристаллических материалов (закалка из расплава, контролируемая кристаллизация, деформационное воздействие, импульсная — фотонная, лазерная и ультразвуковая — обработка, напыление тонких пленок, ионная имплантация). Содержание книги выстроено так, что вначале представлены основные характеристики аморфных металлических материалов, далее — нанокристаллических. И только на завершающем этапе подробно описаны структура и физико-механические свойства композитных материалов. Дана подробная информация о структурных особенностях перехода из аморфного состояния в нанокристаллическое при тепловых и деформационных воздействиях. Проанализированы теоретические и экспериментальные исследования, в которых описаны механизмы пластической деформации и особенности формирующихся при этом физико-химических свойств.

## Астрономия. Физика

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: В 2 кн. Кн.1: АСТРОФИЗИКА /  
Под. ред. Г.Г.Райкунова. М.: Физматлит, 2014. 452 с.



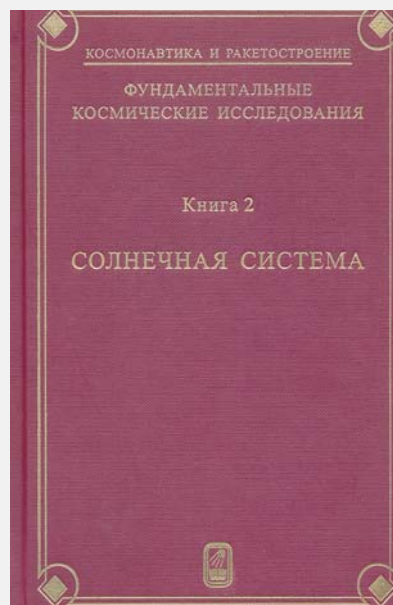
Главная задача космических исследований — получение новых знаний о Вселенной. Современные астрофизические методы позволяют получать уникальные данные об объектах и процессах, которые не могут быть воссозданы и изучены в земных лабораториях. Двухтомная монография написана коллективом из 50 ведущих специалистов. Она посвящена рассмотрению всей совокупности вопросов, касающихся фундаментальных научных проблем, их истории, современному состоянию и перспективам исследований до 2050 г., а также, что особенно важно, практическому применению современных и перспективных технических средств исследования.

В первой книге описаны достижения и перспективы внеатмосферной астрономии (астрофизики). Предлагаемые читателям сведения касаются как истории развития различных технологических подходов и их современного состояния, так и описания перспективных задач. Отдельные главы посвящены физике космических лучей, гамма- и рентгеновской астрономии, исследованиям в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах, радиоастрономическим космическим комплексам и лабораторной астрофизике. Рассмотрены также проблемы современной космологии, среди которых особое внимание уделено работам в области изучения гравитации.

## Астрономия. Физика

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: В 2 кн. Кн.2: СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА /  
Под. ред. Г.Г.Райкунова. М.: Физматлит, 2014. 456 с.

Вторая книга двухтомной монографии посвящена достижениям и перспективам в изучении Солнечной системы. Отдельные главы книги посвящены Солнцу и солнечно-земным связям, Луне, Марсу и его спутникам, Венере, Меркурию, планетам-гигантам и их спутникам, астероидам и кометам. Научная значимость исследований Солнца и солнечно-земных связей определяется возможностью существенно развить наши представления о физике плазмы, космических лучей и др. Принципиально важно изучение воздействия Солнца на работу технических систем (радиосвязи, энергосетей, электрических токов в трубопроводах и т.п.). Планетарные исследования имеют первостепенное значение для понимания процессов возникновения и развития Солнечной системы и, прежде всего, дают ключ к познанию возможных путей будущей эволюции нашей планеты. Изучение планет, их спутников, астероидов и комет включает в себя поиски жизни или ее следов. В XXI в. неизбежно будут реализованы пилотируемые полеты к ближайшим космическим телам. Для их подготовки необходима подробнейшая информация о физических и химических условиях на планетах и их спутниках. В отдаленной перспективе может оказаться необходимым изучение возможности искусственного изменения среды на других планетах для расселения там наших отдаленных потомков.





**Физика. Механика. Астрономия**

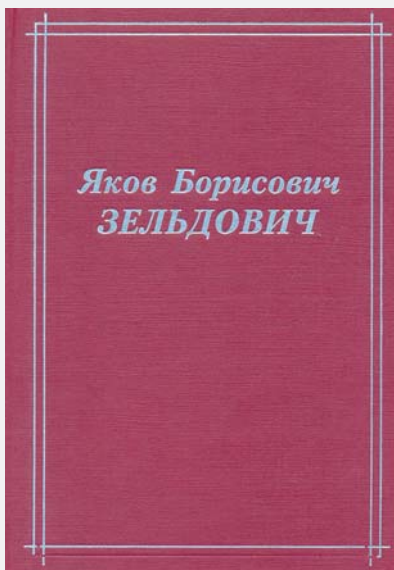
**И.Ньютон.** МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ / Пер. с лат. Изд. стереотип. М.: URSS, 2014. 704 с.

Эта книга — одно из величайших произведений в истории естествознания. Она заложила основы механики, физики и астрономии. В ней сформулирована программа развития этих областей науки, которая оставалась определяющей на протяжении более полутора веков. Труд, озаглавленный автором «Математические начала натуральной философии», состоит из трех книг. Первая — «О движении тел» — была окончена 28 апреля 1686 г. и в этот же день представлена Лондонскому королевскому обществу. Затем была написана вторая книга, носящая такое же название, и, наконец, третья — «О системе мира», при создании которой Ньютон очень опасался задержек со стороны «наглой и сутяжной леди философии» (в тогдашнем понимании этого слова). В середине лета 1687 г. «Начала» были опубликованы. Ньютоновская наука и поныне занимает особое место — многие из введенных в ней величин, понятий и сформулированных законов используются до наших дней, являясь элементами современной научной картины мира и служат основой развития многочисленных технологий, выдержав преобразования и изменения, которые произошли в естествознании со времен Ньютона.

Настоящее издание является факсимильным воспроизведением книги И.Ньютона в переводе с латинского и с комментариями академика А.Н.Крылова. В книгу включен также предметный указатель, составленный Ньютоном и впервые опубликованный на русском языке во втором издании.

**История науки**

**ЯКОВ БОРИСОВИЧ ЗЕЛЬДОВИЧ (ВОСПОМИНАНИЯ, ПИСЬМА, ДОКУМЕНТЫ)** / Под. ред. С.С.Герштейна и Р.А.Сюняева. Изд. 3-е, стереотип. М.: Физматлит, 2014. 416 с.



К столетию со дня рождения Я.Б.Зельдовича — выдающегося ученого XX в., внесшего огромный вклад во многие области науки и техники, — переиздана книга воспоминаний о нем. Повторено второе ее издание, вышедшее в свет в 2008 г., которое по сравнению с первым было существенно дополнено большим количеством статей и обзоров, в которых подробно освещались ранее засекреченные материалы, относящиеся к созданию советского ядерного оружия и непосредственно к роли Зельдовича в этой работе. Вклад Зельдовича в развитие фундаментальной науки, как известно, получил широчайшее международное признание. Его имя как звучало, так и продолжает звучать на международных конференциях по астрофизике и космологии, экологии, физике горения и физике ударных волн. Историков по-прежнему интересует ход работ и формирование идей по созданию ядерного оружия. Новое, пусть и стереотипное, издание книги позволяет сохранить для будущих поколений яркий облик одного из известнейших физиков. Не попавшие в книгу воспоминания о Зельдовиче и материалы о конференции в его память, прошедшей в Государственном астрономическом институте им.П.К.Штернберга МГУ 20 и 21 марта 2014 г., см. в нашем журнале (Природа. 2014, №6. С.63–79).

# Ртуть — грозный убийца

А.М.Портнов,

доктор геолого-минералогических наук

Московский государственный геологоразведочный университет им.С.Орджоникидзе  
Москва

Среди русских государей династии Рюриковичей Иван Грозный — самый известный. Слава его в немалой степени обусловлена странностями характера. Этот царь удивительным образом совмещал ум, начитанность и образованность с дикими выходками и невероятной жестокостью, заставляющими сомневаться в его здравом рассудке.

А ведь в молодости Иван IV был способен говорить так, что дьяки и бояре плакали от радости, слушая своего разумного государя. По его указанию исправили и дополнили свод законов — «Судебник», составили сборник правил церковного порядка — «Стоглав». Было дано широкое самоуправление областям государства, во главе которых стояли выбранные народом губные старосты. В 1552 г., когда царю было всего 22 года, он завоевал Казанское царство, а в 1556 г. — Астраханское.

Иван IV находился под сильным влиянием своей любимой жены Анастасии. Его окружали талантливые молодые люди — священник Сильвестр, постельничий боярин Алексей Адашев, князь Андрей Курбский. Согласие царя с этой, по выражению Курбского, «избранной радой» продолжалось до 1553 г. Тогда Иван IV тяжело заболел горячкой и, не надеясь выздороветь, приказал составить завещание, по которому царство оставалось сыну Димитрию, а фактически царице и ее родне. Совершенно неожиданно «избранная рада» категорически высказалась против желания умирающего. Сильвестр, Адашев и бояре хотели видеть на престоле не малолетнего Димитрия, а двоюродного брата Ивана — князя Владимира Старицкого.

Но царь прекрасно понимал, что в соответствии с законами борьбы за власть на Руси его семейству грозит верная гибель. Он нашел силы заставить взбунтовавшихся бояр «целовать крест» на верность Димитрию, а по выздоровлении удалил от себя всех недавних близких советников, предавших его. Сильвестра и Адашева сослали, а Иван собрался на богомолье в Кирилло-Белозерский монастырь — во исполнение обета, данного им во время болезни.

По пути, в Троицком монастыре, встретил он ссыльного монаха Максима Грека, близкого советника Василия III. Отличавшийся независимос-



Киноварь (HgS) — главный источник ртути в природе.

тью суждений, Максим Грек после смерти отца Ивана IV был сослан боярами за раздражавшие их «обличения и поучения». Однако ссылка не изменила строптивого монаха, характер у него остался прежним. Он смело заявил царю, что вместо богомолья ему надо пожаловать и утешить многочисленных вдов, сирот и матерей, потерявших своих кормильцев во время взятия Казани. И добавил, что, если царь его не послушается, малолетний наследник умрет в дороге.

Но Иван двинулся дальше. Димитрий же действительно заболел и вскоре скончался от простуды. Болезнь, измена близких бояр, неожиданная смерть сына — все эти трагические события сильно повлияли на молодого царя. Как лечили его, неизвестно, но в письме к Курбскому он пишет: «Душевного спасения и телесного здравия... всего этого мы были лишены лукавым умыслом... о человеческих же средствах, о лекарствах во время болезни и помину никогда не было...»

Пребывая в таких жестоких скорбях, не будучи в состоянии сносить такой тягости, превышающей силы человеческие... и сыскав измены собаки

Алексея Адашева и всех его советников, мы наказали их милостиво: смертною казнию не казнили никого, но по разным местам разослали... Поп Сильвестр, видя своих советников в опале, ушел по своей воле, и мы отпустили его не потому, что устыдились его, но потому что не хотели судить его здесь [т.е. на земле. — АЛ.]... а сын его в благоденствии пребывает»\*.

Как видим, молодой Иван IV очень мягко обошелся с самыми настоящими изменниками и заговорщиками. За такие проступки во Франции или в Англии в те времена виновных немедленно судили и казнили.

В 1554 г. у Анастасии родился сын Иван. Он вырос здоровым и сильным человеком, который, по свидетельству Джерома Горсея, англичанина, близкого к царскому двору, даже управлял государством при отъездах царя из Москвы.

Но через несколько лет после болезни и разгона боярской «избранной рады» над царем Иваном и его семьей словно нависает рок. И первое свидетельство тому — рождение в 1557 г. слабоумного сына Феодора. Вскоре заболевает молодая и любимая жена Анастасия. В 1560 г. она умирает. Затем катастрофически быстро начинает меняться характер самого царя. Он превращается в жестокого садиста, маньяка, одержимого манией преследования. Его мучают галлюцинации, прежние светлые мысли начисто улечиваются. Начинаются казни.

В конце 1564 г. происходит нечто, доселе невиданное. Иван IV с семьей, казной и приближенными выезжает из Москвы: сначала в село Коломенское, потом — в Тайнинское, оттуда — к Троице, а затем — в Александровскую слободу. Митрополит, бояре, народ — все в недоумении. В январе 1565 г. царь присылает в Москву длинный список своих претензий к боярам, дьякам, казначеям, приказным людям, обвиняя их в расхищении государственной казны, изменах и в том, что их действия вынуждают его отказаться от престола. Народ в ужасе завывает: «Увы, горе нам! Как могут овцы без пастыря?»

Бояре и духовенство явились в Александровскую слободу молить царя вновь принять правление. Иван IV вернулся в Москву, но это уже был совсем другой человек. Он постарел, облысел, борода поредела... И самое главное, за короткий срок резко изменился его характер. Начался страшный период опричнины, формальной задачей которой был поиск государевых врагов и изменников. Тогда происходили массовые беззакония: казни, убийства, был разграблен и уничтожен древний русский город Новгород. С того времени на Руси правит Иван Грозный.

При дворе огромным влиянием пользуется окончивший Кембриджский университет англий-

ский лекарь и колдун Елисей Бомелий (Элизиус Бомелиус), знаток ядов, отравивший по приказу царя только в 1572 г. целую сотню опричников. (Правда, в 1579 г. опытные палачи выпустили из него кровь и поджарили живьем на вертеле. И тоже по царской воле.)

А как чувствует себя сам Иван Грозный с таким лекарем? В своей духовной грамоте, а в современном понимании — завещании, составленном летом 1571 г., он горько жалуется на свое тяжелейшее состояние: «Тело изнемогло, болзнет дух, струпы душевные и телесные умножились, и нет врача, который бы меня исцелил; утешающих я не сыскал»\*\*.

Что же случилось с государем Всея Руси? Чем он болел? Какая причина вызвала страшное помрачение его сознания, галлюцинации, манию преследования, дикую жестокость и мнительность, проявившиеся в бесконечном поиске врагов и предателей? Ответы на эти вопросы были затруднены вплоть до 1963 г., когда специальная комиссия Министерства культуры СССР произвела вскрытие гробниц Ивана Грозного, его сына Ивана Ивановича, убитого царем в 1581 г., а также царя Феодора Ивановича и воеводы Скопина-Шуйского.

Анализ останков Ивана Грозного показал, что в них резко повышена концентрация одного из самых ядовитых для человека металлов — ртути! Ее содержание достигало 13 г/т. В живом веществе среднее содержание этого металла — всего лишь 5 мг/т, а земной коре — 45 мг/т!

В те времена в Европе была известна «болезнь сумасшедшего шляпника», распространенная среди мастеров-шляпников, которые использовали ртутные соединения при изготовлении фетра. Неслучайно Льюис Кэрролл выводит среди персонажей «Алисы в стране чудес» шляпника, совершающего нелепые поступки.

В XX в. массовое отравление ртутью произошло в Японии, где на о.Кюсю в г.Минамата работал химический комбинат, сливавший отходы в море. Тысячи японцев отравились и умерли, используя в пищу моллюсков и рыб, выловленных в заливе. Эта болезнь получила название «болезнь Минамата». Ее симптомы — депрессия, бессонница, угнетенное состояние, мания преследования, галлюцинации, бредовые идеи, сумасшествие. Самое страшное ее свойство проявляется в том, что она поражает генный аппарат!

Давайте вспомним детей Ивана Грозного. Первый сын — Димитрий был нормальным ребенком и умер от простуды. Иван Иванович родился в 1554 г., когда царю было 24 года. Вскрытие гробницы показало, что это был высокий крепкий человек, хотя концентрация ртути в его костях оказалась заметно выше нормы — несколько граммов на тонну. А вот слабоумный Феодор Ио-

\* Переписка Ивана Грозного с Андреем Курбским. Л., 1979. С.142—143.

\*\* Соловьев С.М. Сочинения. Т.5—6. Кн.III. С.543.



аннович был уродливым карликом с маленькой головкой на ширококостном скелете, с торчащим длинным орлиным носом. Ртуть в его костях не обнаружили!

Имеются серьезные основания думать, что Иван IV получил хорошую дозу яда на основе ртути в интервале между 1554 и 1557 гг. Тогда получается, что генетическое уродство сына Феодора, родившегося в 1557 г., — не случайное. А ведь смерть царицы Анастасии в 1560 г. тоже была странной. Иван IV не сомневался, что ее отравили и подозревал затаившихся сторонников разогнанной им «избранной рады» в уголовщине.

Подозрения царя подтвердились только в 2000 г., когда провели анализы останков Анастасии. Содержание ртути в них оказалось просто чудовищным — до 50 г/т! Скорее всего, царицу убили сулемой. Иначе говоря, хлорной ртутью (HgCl<sub>2</sub>) — любимым ядом средневековых отравителей. Высокая концентрация ртути оказалась и в останках скоропостижно скончавшейся царицы Елены Глинской, жены Василия III и матери Ивана Грозного. Выходит, что сулемой в Кремле пользовались испокон веков... Вспомним пушкинского «Скупого рыцаря»:

*В стакан воды подлить... трех капель будет,  
Ни вкуса в них, ни цвета не заметно;  
А человек без рези в животе,  
Без тошноты, без боли умирает.*

Правда, исследователи полагают, что высокая концентрация ртути в костях царя и убитого им наследника — результат лечения ртутными мазями. Возможно, это действительно так. Но независимо от того, была ли ртуть отравой или составной частью лекарства, в организме царя ее накопилось так много, что он просто не мог обладать нормальным рассудком.

Не мешает вспомнить, что последний сын Ивана Грозного от Марии Нагой — царевич Димитрий, родившийся в 1582 г. и убитый в 1591 г., тоже не был здоровым ребенком и страдал «падучей болезнью». Говоря современным языком, он был эпилептиком.

Характерное изменение психики человека под действием ртутного отравления проследили исследователи жизни великого английского ученого Исаака Ньютона. Как известно, Ньютон тяжело заболел в 1692 г., когда ему было 50 лет. Биографы называют этот период «черным временем» в жизни ученого. Он полностью потерял интерес к научным исследованиям, начались провалы в памяти, пропали сон и аппетит. Он стал мистиком, ему чудились призраки, появилась мания преследования. Ньютон писал странные письма к Богу и пытался пересмотреть всю хронологию человечества.

В 1979 г. английские и американские ученые решили проверить версию о ртутном отравлении Ньютона, увлекавшегося алхимией и прово-

дившего многочисленные опыты с использованием этого элемента. Крайне высокочувствительным нейтронно-активационным методом изучались волосы из сохранившейся пряди ученого. Анализ показал, что в них содержится невероятно высокое количество ртути — от 75 до 200 г/т! Правда, волосы обладают способностью концентрировать ртуть. Но стало ясно, что Ньютон действительно испытал тяжелое ртутное отравление за счет неосторожного обращения с ее препаратами.

К сожалению, при вскрытии гробницы Ивана Грозного его волосы не изучались. Но в головах у царя стоял замечательный синий стеклянный кубок. В нем сохранились остатки масла. И тоже с примесью ртути!..

Однако даже установленного содержания (13 г/т) более чем достаточно для тяжелейшего отравления, изменения психики и структуры гена. Можно сказать, что ртуть сыграла зловещую роль в истории Древней Руси. Она сделала царя сумасшедшим со всеми вытекающими последствиями для внешней и внутренней политики страны, а также привела к вырождению царского рода Рюриковичей.

Проблема ртутного отравления остается актуальной и в наше время. Например, в СССР ежегодно выпускались десятки миллионов люминесцентных ламп-трубок с содержанием ртути до 0.1 г. Заводы по переработке отслуживших свой срок ламп не работают. Люминесцентные лампы могут быть причиной ртутного отравления городов и городских свалок, поскольку трубки легко бьются, а ртуть остается в почве. Анализы показали резко повышенную концентрацию этого металла в центре Москвы, вокруг Кремля, по Садовому кольцу, по радиальным магистралям столицы — везде, где периодически разбиваются мощные ртутные лампы. А резкое (в 2—2.5 раза) увеличение психических заболеваний в Москве за последние 10 лет? Не связано ли оно в какой-то мере с концентрацией в приземной атмосфере столицы паров ртути?

Ртуть постоянно выделяется из глубин нашей планеты. Ежегодно в атмосферу с вулканическими извержениями и тепловыми потоками, по разным оценкам, поступает от 8 до 35 тыс. т. Столько же ртути, рассеянной в рудах, выбрасывают металлургические заводы планеты, производящие железо, медь, никель, цинк, свинец. Тысячи тонн ртути улетучиваются в атмосферу при сжигании человечеством 10 млрд т органического топлива в год. Пары ртути невидимым отравителем приходят в наши квартиры в виде постоянной примеси к газу, которым мы ежедневно пользуемся на кухнях.

Но аналитические работы по экологии ртути практически не проводятся, о ее ядовитости все как-то забыли. А жаль. Ртуть — убийца незаметный, коварный и ошибок не прощает. ■

# 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 19.09.2014  
Формат 60×88 1/8  
Офсетная печать  
Заказ 612  
Набрано и сверстано в редакции

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