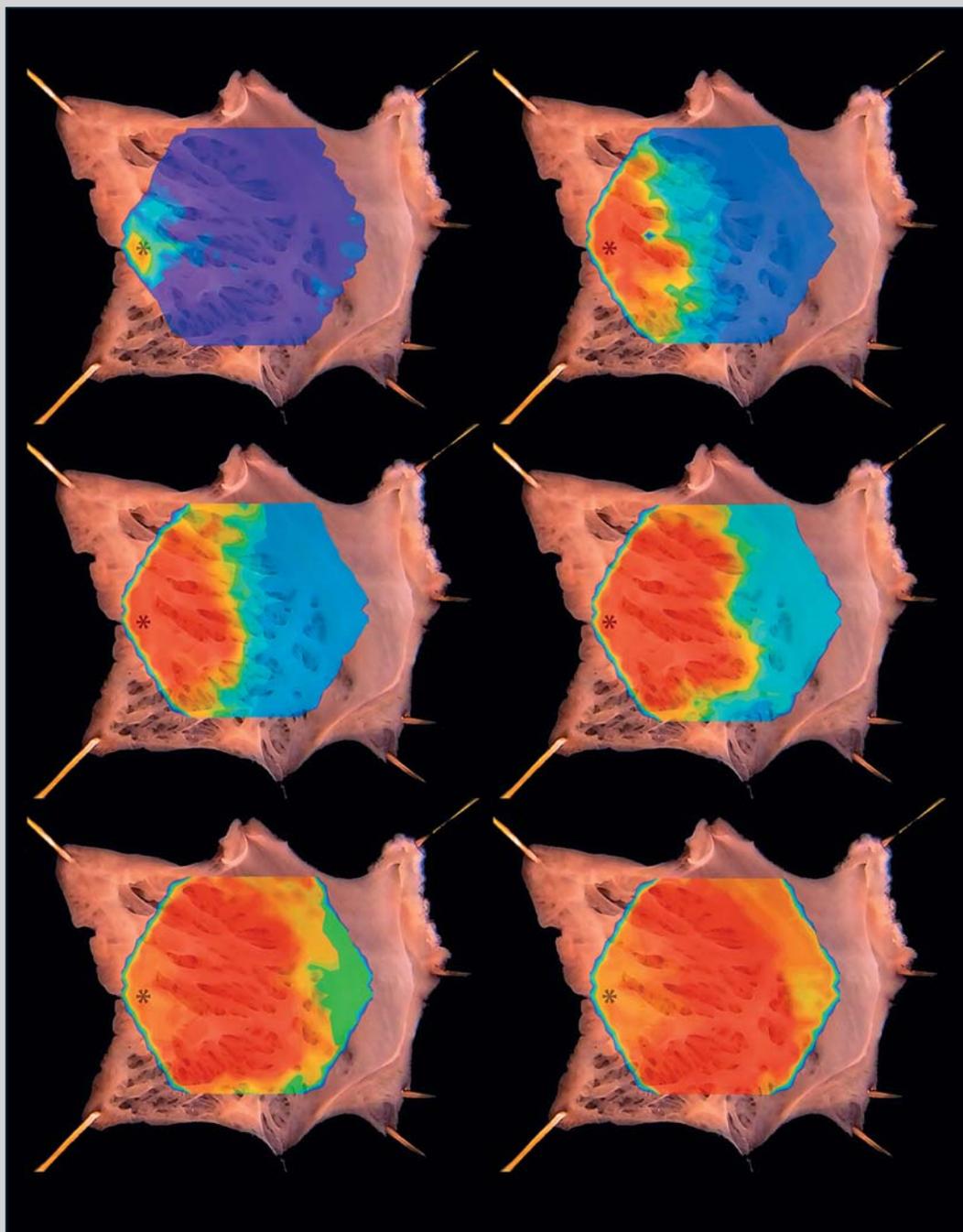


ПРОДА

8 12



В НОМЕРЕ:**3 Щеголев В.А.****Новые имена на карте элементов**

Только что присвоены имена двум новым химическим элементам — №114 и №116. Один назван в честь Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флёрова ОИЯИ, другой — в честь Ливерморской национальной лаборатории (США).

10 Розенштраух Л.В.**Экспериментальная электрофизиология в создании новых препаратов**

В последнее десятилетие знания о механизмах нарушений сердечного ритма значительно расширились, что позволило найти эффективный и безопасный путь его восстановления. Недавно созданный препарат ниферидил эффективно купирует фибрилляцию предсердий в низких дозах (всего 10–30 мкг/кг) и, как показали первые клинические испытания, не обладает побочным действием.

17 Белушкин М.А., Фоффи Дж.**Цвет броуновского движения**

Феномен случайного движения взвешенных частиц в жидкости или газе известен очень давно, но вопросы до сих пор остаются. Так ли независимы друг от друга последовательные столкновения взвешенной частицы и частиц среды?

23 Любушин А.А.**Прогноз Великого Японского землетрясения**

Великое Японское землетрясение, произошедшее в марте прошлого года, стало знаменательным и в научном плане, поскольку был сделан заблаговременный прогноз времени и силы ожидаемой катастрофы.

34 Голимбет В.Е., Алфимова М.В.**Серотонин и шизофрения**

Гипотеза о роли серотонина в развитии шизофрении впервые появилась в 50-х годах прошлого столетия. Сегодня изучение полиморфизма генов серотониновой системы позволяет прогнозировать терапевтический эффект антипсихических препаратов.

39 Белоусов Ю.А., Дроздов А.А.**Люминесцентные комплексы лантанидов**

Эксперименты, связанные с демонстрацией люминесценции, одни из самых эффектных в химии, однако физические основы этого явления малоизвестны неспециалистам. На примере комплексов лантанидов в статье рассказано, как химики и инженеры конструируют люминесцентные устройства и где они применяются.

46 Кривоногов С.К.**Арал умер. Да здравствует Арал!**

За время своего существования Аральское море испытывало значительные колебания уровня, вплоть до катастрофических понижений, подобных современному. Во времена регрессий на осушенном морском дне возникали человеческие поселения.

Вести из экспедиций**54 Пастернак Р.К.****Моя первая экспедиция****Заметки и наблюдения****63 Докучаев Н.Е.****Запасливые полевки****Биография современника****67 Фет В.****Непрямые истины Линн Маргулис****72****Новости науки**

Антарктический нейтринный телескоп уточняет гипотезы астрофизиков (72). Простой путь к сложности (73). Новый уровень пространственной организации хромосом (75). Малый ледниковый период был вызван вулканами? (75)

Рецензии**77 Губарев В.С.****Разгаданная «тайна» академика Королева**

(на кн.: Н.С.Королева. С.П.Королев: Отец. К 100-летию со дня рождения)

79**Новые книги****Встречи с забытым****80 Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.****Первый русский вулканолог — В.А.Петрушевский****В конце номера****90 Чесноков В.С.****Поселок Борок и его музей**

CONTENTS:**3 Shchegolev V.A.****New Names on the Map of Elements**

Recently two new chemical elements were named: №114 and №116. The first was named after G.N.Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of Joint Institute of Nuclear Research, the second after Lawrence Livermore National Laboratory (USA).

10 Rozenshtaukh L.V.**Experimental Electrophysiology in New Drug Research**

During the last decade experimental electrophysiology of heart has been enriched by new techniques which enabled not only to expand our basic knowledge of mechanisms of cardiac rhythm disturbances but also to find more effective and safe ways of its restoration. Recently synthesized drug Niferidil efficiently terminates atrial flutter and fibrillation in very low doses (10–30 mcg / kg, i.v.). Pilot clinical tests demonstrated about 90% efficiency and very low side effects.

17 Belushkin M.A., Foffi G.**Color of Brownian Motion**

The notion of random motion of particles suspended in a liquid or gaseous medium has long been known, but many questions still remain. Are subsequent collisions between the solute and solvent particles really independent?

23 Lyubushin A.A.**Prediction of the Great Japanese Earthquake**

The Great Japanese Earthquake which occurred last year in March became significant for science too, because the time and magnitude of the expected catastrophe were predicted.

34 Golimbet V.E., Alfimova M.V.**Serotonin and Schizophrenia**

The hypothesis on the role of serotonin in development of schizophrenia was proposed first in 1950s. Today studies of genetic polymorphisms of serotonin system allows prediction of therapeutic effect of antipsychotic drugs.

39 Belousov Yu.A., Drozdov A.A.**Luminescent Complexes of Lanthanides**

Experiments involving demonstration of luminescence are among the most spectacular in chemistry, but the basic physics of this phenomenon is little-known to non-specialists. On an example of complexes of lanthanides it is shown how chemists and engineers design luminescent gadgets and where they are applied.

46 Krivonogov S.K.**Aral Is Dead. Long Live Aral!**

In its history Aral sea had seen significant level fluctuation up to catastrophic regressions alike the modern one. During these regressions at the drained seabed human settlements were established.

Notes from Expeditions**54 Pasternak R.K.****My First Expedition****Notes and Observations****63 Dokuchaev N.E.****Thrifty Voles****Biography of Our Contemporary****67 Fet V.****Non-straightforward Truths of Lynn Margulis****72 Science News**

Antarctic Neutrino Telescope Places More Strict Boundaries on Hypotheses of Astrophysics (72). A Simple Rout to Complexity (73). New Level of Spatial Organization of Chromosomes (75). Was Little Ice Age Triggered by Volcanic Eruptions? (75).

Book Reviews**77 Gubarev V.S.****Unraveled «Mystery» of Academician Korolev**

(on book: N.S.Koroleva. S.P.Korolev: Father. To the Centenary.)

79 New Books**Encounters with Forgotten****80 Belousov A.B., Belousova M.G.****The First Russian Vulcanologist: V.A.Petrushevsky****End of the Issue****90 Chesnokov V.S.****Settlement Borok and its Museums**

Новые имена на карте элементов

В мае 2012 г. Международный союз чистой и прикладной химии (IUPAC) официально присвоил наименования двум новым химическим элементам Периодической системы Д.И.Менделеева — с атомными номерами 114 и 116. Элемент №114 назван флеровием с символом Fl, элемент №116 — ливерморием с символом Lv.

В.А.Щеголев,

кандидат физико-математических наук

Объединенный институт ядерных исследований

Дубна

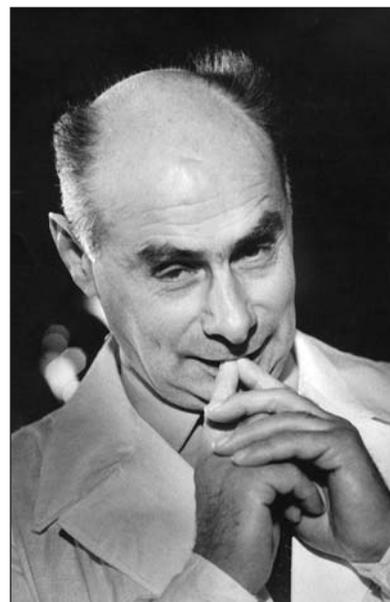
Только что утвержденные имена новых элементов отражают тот факт, что они были синтезированы (первый — в 1999 г. [1], второй — в 2000-м [2]) в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флёрва (ЛЯР) Объединенного института ядерных исследований в Дубне (ОИЯИ) при участии Ливерморской национальной лаборатории им.Лоуренса Калифорнийского университета (США), с которой институт имеет соглашение о научном сотрудничестве.

Как выбирают имена?

У читателя может возникнуть естественный вопрос: почему названия в ячейки периодической таблицы вписали с десятилетней задержкой? Этому предшествовала некоторая история. С давних пор сложилась традиция давать имена химическим элементам, существующим в природе, но неизвестным до определенного времени, по желанию их первооткрывателей. Эти названия сами собой закреплялись в научной литературе и справочниках. В 40-х и 50-х годах группа американских ученых под руководством лауреата Нобелевской премии Г.Т.Сиборга разработала ядерно-физичес-

кие методы синтеза искусственных трансурановых химических элементов, следующих по атомным номерам за ураном (U, №92, последним, встречающимся на Земле) [3]. Сложилась практика наименования этих элементов: сначала согласно планетарной модели Солнечной системы (нептуний Np, №93; плутоний Pu, №94), затем в честь великих ученых и географических мест, где были сделаны открытия (америций Am, №95; кюрий Cm, №96 — в честь Пьера и Марии Кюри; берклий Bk, №97 — по названию г.Беркли; калифорний Cf, №98 — по имени штата Калифорния; эйнштейний Es, №99; фермий Fm, №100; менделевий Md, №101 — соответственно, в честь А.Эйнштейна, Э.Ферми, Д.Менделеева).

Но в 60-х годах ситуация с присвоением имен элементам изменилась. В трансурановую гонку включились советские физики во главе с академиком Г.Н.Флёровым. В созданной им в 1957 г. Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ были синтезированы элементы с атомными номерами 102—107, и работы претендовали на приоритет открытия. Однако синтезом этих элементов в то же время занимались американские исследователи в Радиационной лаборатории им.Лоуренса в Беркли под руководством А.Гиорсо. Разгорелась



Георгий Николаевич Флёрв
(1913—1990).

Здесь и далее фото Ю.А.Туманова

острая конкуренция за право считаться первыми. Каждая группа присваивала открытым элементам свои названия. Появились параллельные редакции периодической таблицы. Следует сказать, что эксперименты по синтезу очень сложны и иногда случаются ошибки и неточности. Это только обостряло конкурентную борьбу. Необходимо было внести ясность, чтобы не вводить в заблуждение мировую научную общественность.

Флёрв не однократно обращался в Номенклатурную комиссию IUPAC, ответственную за наименование химических веществ, с просьбами рассмотреть вопросы приоритета. Но комиссия под разными предложениями уклонялась от решения возникшей проблемы.

Создавшуюся ситуацию помог разрешить А.Бромли, президент Международного союза чистой и прикладной физики (IUPAP). Известный ученый и влиятельный человек, он относился с уважением к советской науке и взял на себя инициативу покончить с ее дискриминацией. Он создал совместную комиссию IUPAC и IUPAP из авторитетных и независимых специалистов из разных стран (одну половину составляли представители стран социалистического лагеря, в другой половине были западники; возглавлял комиссию англичанин, профессор Д.Вилкинсон, секретарем был голландец, профессор А.Вапстра). За три года комиссия проделала огромную работу, изучив многочисленные публикации по теме, посетив научные центры в Дубне, Беркли и Дармштадте, побеседовав с участниками работ по синтезу и выслушав их аргументы.

В итоге комиссия выработала следующие положения, придав им статус официального документа.

1. Открытие нового элемента признается, если удовлетворяет определенным критериям, обеспечивающим убедительность с научной точки зрения.

2. Результаты первой работы, претендующей на приоритет, должны быть подтверждены в работах другого научного центра.

3. Авторы приоритетной работы вносят свои предложения по наименованию нового элемента на рассмотрение Номенклатурной комиссии IUPAC. Названия элементов в честь великих ученых присваиваются только для тех, кто уже ушел из жизни. Не допускается дублиро-

вание названий, уже встречающихся в научном словаре (например, нельзя назвать элемент в честь Ньютона, потому что есть физическая величина ньютон — единица силы). Свое решение Номенклатурная комиссия выносит на утверждение Конгресса IUPAC [4].

Сформулировав таким образом общую процедуру, комиссия Вилкинсона поставила точку и в вопросе о приоритетах уже сделанных открытий. Не все авторы (и мы, и американцы) были удовлетворены этим решением. Но в такого рода сложных ситуациях компромиссы неизбежны, и в конце концов предложение комиссии было одобрено. В частности, приоритет открытия 102-го элемента был полностью закреплен за Дубной, но название «нобелий» (символ No) было сохранено, несмотря на ошибочность шведской работы [5], претендовавшей на приоритет (перевесил авторитет нобелевских премий, о которых мечтают все ученые). Элемент №105 получил название «дубний» (символ Db) с приоритетом Дубны. Элемент №106 был назван «сиборгий» (символ Sg), хотя Сиборг был тогда еще жив (его вклад в синтез новых трансуранных элементов был столь значителен, что комиссия хотела сразу же увековечить его имя). Для некоторых других элементов был установлен совместный приоритет открытия. Это относилось к элементам: №103 (лоуренсий Lr), №104 (резерфордий Rf), №107 (борий Bh).

Решение комиссии было утверждено на Конгрессе IUPAC в августе 1997 г. [6] и остается единственно законным по сей день.

Как синтезируются новые элементы?

Индивидуальность каждого химического элемента определяется числом протонов Z , заключенных в соответствующем атомном ядре; оно совпадает

с атомным номером элемента в периодической таблице. Имея фиксированное число протонов, ядра могут различаться по количеству нейтронов N — тогда элемент представляется рядом изотопов, которые химически неразличимы. Есть элементы, имеющие только один стабильный изотоп (например, родий $^{103}_{45}\text{Rh}$: $Z = 45$, $N = 58$, сумма $Z + N = 103 = A$ называется массовым числом). Есть элементы, имеющие несколько стабильных изотопов (например, у олова их десять). Стабильные изотопы всех элементов от водорода ($Z = 1$) до висмута ($Z = 83$) образуют так называемую долину стабильности. Вне этой долины ядра испытывают радиоактивный распад и имеют определенное время жизни, которое характеризуется величиной $T_{1/2}$, периодом полураспада. Чем дальше отстоит изотоп от долины стабильности, тем короче его время жизни. Это относится и ко всем элементам с $Z > 83$. Из наиболее долгоживущими оказываются торий ($^{235}_{90}\text{Th}$, $T_{1/2} = 14 \cdot 10^9$ лет) и уран ($^{238}_{92}\text{U}$, $T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ лет). Изотопы всех элементов с $Z > 92$ имеют значительно меньшее время жизни, и они не сохранились в составе материи Солнечной системы за время ее существования (~5 млрд лет).

Задача синтеза новых элементов сводится к увеличению числа протонов в ядрах, и для этого было разработано несколько способов.

В 40-х и 50-х годах группа Сиборга синтезировала элементы вплоть до калифорния ($Z = 98$), используя атомные реакторы, генерирующие мощные потоки нейтронов. Метод был основан на следующем. Если ядро-мишень захватывает нейтрон, оно уходит с линии относительной стабильности, задаваемой определенным соотношением нейтронов и протонов. Лишний нейтрон ядру «не по душе», и оно стремится восстановить равновесие, превращая избыточный нейтрон в протон (бета-распад) и тем самым уве-

личивая число протонов в своем составе на единицу. А это означает, что ядро стало принадлежать новому элементу с $Z + 1$. В такой последовательности можно получать элементы со все большим значением Z : от урана ($Z = 92$) к нептунью ($Z = 93$), от нептуния к плутонию ($Z = 94$) и т.д. Но поскольку с увеличением атомного номера времена жизни новых элементов резко убывают, такая схема действует все хуже: промежуточные ядра-мишени просто не успевают дожидаться, когда в них попадет следующий нейтрон.

С появлением водородных бомб, которые давали мощный импульсный поток нейтронов в течение примерно одной микросекунды, возникла идея вбивать в ядро урана сразу до 20 нейтронов. А потом оно путем последовательных бета-распадов должно добраться до Z с таким соотношением протонов и нейтронов, что будет обладать временем жизни, приемлемым для экспериментатора с его техническими возможностями. Этим способом были получены эйнштейний ($Z = 99$) и фермий ($Z = 100$). При взрыве водородной бомбы на атолле Бикини в 1952 г. в образовавшееся облако были запущены беспилотники с промокашками на крыльях для сбора продуктов ядерных реакций при мгновенном захвате нейтронов. Но дальше фермия этот метод не сработал.

Был и другой метод синтеза — в качестве бомбардирующих снарядов вбивать в ядро-мишень протоны или ядра гелия ($Z = 2$). Правда, для этого нужно было преодолеть электрическое (кулоновское) отталкивание протонов ядра-мишени и протонов снаряда. Задача решалась с помощью ускорителей (циклотронов), способных ускорять бомбардирующие снаряды до энергий, при которых кулоновское отталкивание преодолевалось и происходило слияние двух ядер в одно составное ядро

с большим Z . Так в реакции эйнштейний + гелий был синтезирован менделевий ($Z = 101$). Идентификация Md была проведена всего по девяти атомам. Стало ясно, что продвигаться дальше было бессмысленно.

В середине 50-х вызрела идея использовать в качестве бомбардирующих снарядов атомы с большим Z (углерод $C_{Z=6}$, кислород $O_{Z=8}$, неон $Ne_{Z=10}$ и т.д.). Но для этого требовалось создать новые ускорители (ускорители тяжелых ионов), что само по себе было нетривиальным. В Беркли построили линейный ускоритель NILAC (1955), в Дубне — на более мощный в то время циклотрон тяжелых ионов У-300 (1960). В 1978 г. в Германии (г.Дармштадт) в научном центре GSI был запущен линейный ускоритель UNILAC.

Задача синтеза новых элементов с $Z > 101$ с использованием ядерных реакций на тяжелых ионах очень сложна. Основная цель — получить составное ядро атома нового элемента при слиянии ядра-мишени с ядром бомбардирующего иона. Но при этом в составное ядро вносится большая энергия возбуждения, и оно обычно предпочитает разделиться на две части, а не оставаться целым. Кроме того, побочные реакции порождают в большом количестве продукты с Z , меньшим Z составного ядра. Эти «нежелательные» элементы создают огромный фон, превышающий искомый эффект образования ядер элемента в 10^8 – 10^{12} раз. Разрабатываются специальные экспериментальные методы и аппаратура, позволяющие отделить атомы нового элемента от фоновых продуктов и изучить их свойства. Конечный выход очень мал. Например, в первых опытах при синтезе 114-го элемента было получено всего около десятка атомов за несколько месяцев непрерывного эксперимента. Это требовало от аппаратуры большой чувствительности, стабильности и надежности.

Зачем все это?

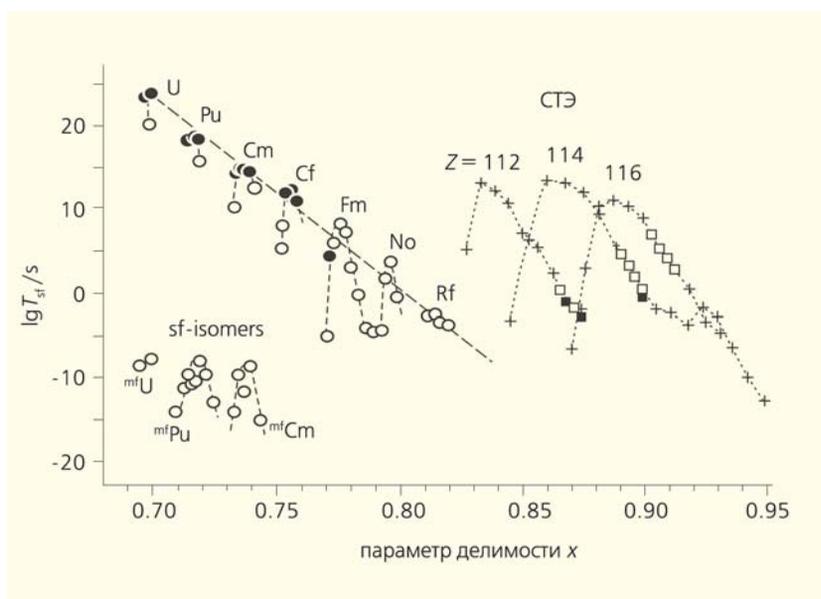
Когда физики убедились, что время жизни трансурановых элементов резко убывает по мере возрастания Z , встал вопрос: существует ли край Периодической системы элементов? Этот вопрос имел и космологический аспект, связанный с образованием химических элементов в звездном нуклеосинтезе и их распространенностью в природе. Теория, основанная на капельной модели ядра Бора и Уиллера [7], предсказывала, что уже элемент №102 должен жить не более 0.02 с, а время жизни элементов с большим Z будет убывать экспоненциально.

Но были и иные мнения. В мае 1957 г. Флёрв, выступая на сессии ученого совета ОИЯИ по программе научных исследований в Лаборатории ядерных реакций, сказал: *«Мы надеемся вместе с американскими коллегами, что имеется экспериментальная возможность, которая может преподнести приятный сюрприз, т.е. может появиться область условной стабильности. Это связано с тем, что сейчас мы имеем дело с вытянутыми деформированными ядрами, которые очень охотно делятся спонтанно, но в новой области должны появиться ядра с формой, близкой к сферической, что уменьшит вероятность их спонтанного деления. Это даст возможность получить еще ряд новых элементов»* [8]. И предвидение сбылось, что подтверждает удивительную интуицию Георгия Николаевича.

На протяжении последующих десятилетий в Лаборатории ядерных реакций была воплощена в жизнь широкая научная программа. В ее рамках, изучая ядерные превращения, пытались установить границы ядерной стабильности и открыть новые виды радиоактивности, ученые смогли реализовать исключительные и многообразные возможности ядерных реакций на тяжелых ионах. Цели программы были определены Флёрвым



Ю.Ц.Оганесян (слева) и Г.Н.Флеров.



Периоды полураспада по спонтанному делению T_{sf} в зависимости от параметра делимости $x = (Z^2/A)/(Z^2/A)_{крит}$ (по мере роста отношения Z^2/A время жизни ядра падает, и при его критическом значении ядра не могут существовать в принципе). Черные точки и светлые кружки обозначают экспериментальные величины T_{sf} для спонтанного деления четно-четных ядер (для ядер с четными N и Z теория работает лучше). Штриховая линия — экстраполяция в транс-актинидную область согласно жидко-капельной (макроскопической) модели. Указания на присутствие острова стабильности в области сверхтяжелых элементов, противоречащее макроскопической модели, заставили разработать новую макро-микроскопическую теорию, учитывающую структурные факторы. Крестики представляют теоретические значения $T_{sf}(теор)$ для четно-четных изотопов элементов №114 и №116, рассчитанные по новой модели, а светлые квадраты — $T_{sf}(теор)$ для тех изотопов, которые получаются в реакциях $^{242,244}\text{Pu}$, $^{245,248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$. Черные квадраты дают значения $T_{sf}(эксп)$, которые удалось пока измерить [14].

так: «Чем дальше отстоит изотоп от области стабильности, тем больше информации о строении ядра он может нам дать. Исследование вещества в экстремальном состоянии, в экстремальных условиях его существования, — общий методологический подход, который используется в физических исследованиях. Изотопы, далекие от области стабильности, — экстремальный объект исследования, дающий возможность получить максимум информации о строении ядра» [9].

Открытия, сделанные в Лаборатории ядерных реакций, дали толчок для пересмотра существовавших представлений о природе ядерной материи в области тяжелых элементов. В теоретическую модель ядра, представляющую его как жидкую каплю [7], были внесены изменения, учитывающие структурные факторы, ответственные за увеличение стабильности ядер [10, 11]. Родилась гипотеза о возможном существовании острова стабильности в области элемента №114 [12]. Ю.Ц.Оганесян, ученик и преемник Флёрова, предложил и осуществил метод так называемого холодного синтеза новых элементов, позволивший в тысячи раз увеличить выход реакций синтеза. Используя этот метод, немецкие физики в дармштадском GSI синтезировали пять новых элементов: №108, хассий Hs (латинское название германской области Гессен); №109, мейтнерий Mt (в честь Лизы Мейтнер, создавшей оболочечную модель ядра на основе «магических чисел»); №110, дармштатий Ds (от названия города); №111, рентгений Rg (в честь К.Рентгена); №112, коперникий Cn (в честь Н.Коперника) [13].

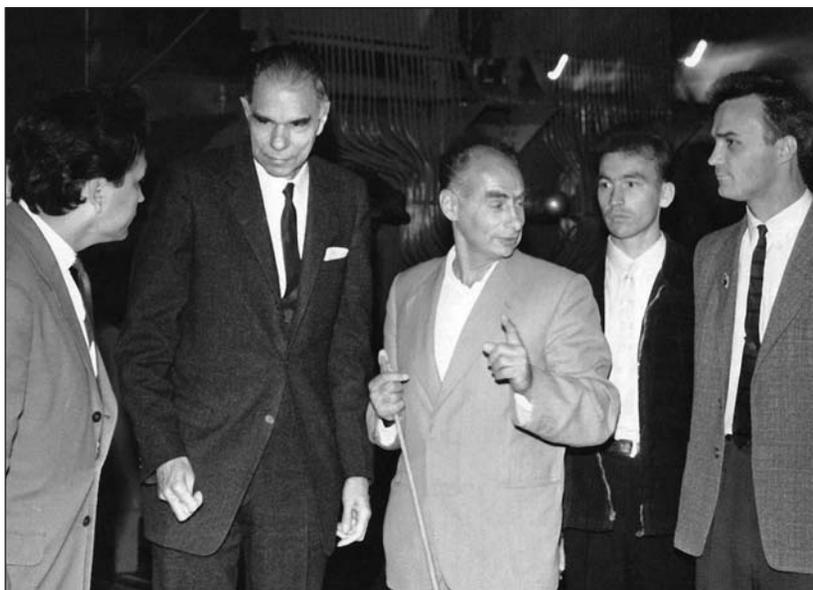
Но прорыв в область сверхтяжелых элементов (№№113—118) был сделан все же в Лаборатории ядерных реакций в 1998—2009 гг. под руководством академика Ю.Ц.Оганесяна. В его монографии [14] дан подробный и исчерпывающий анализ про-

блемы синтеза сверхтяжелых элементов с экспериментальной и теоретической точек зрения. Полученные результаты по синтезу указанных элементов неопровержимо доказали существование нового острова стабильности в этой области, предсказанное Флёрвым еще в 1957 г. Успех был достигнут за счет рекордного увеличения чувствительности регистрирующей аппаратуры, использования в качестве бомбардирующих частиц ускоренных ионов ^{48}Ca при рекордной интенсивности пучка, существенного снижения фона от побочных продуктов ядерных реакций. В итоге эффективность регистрации фактов синтеза изотопов сверхтяжелых элементов оказалась примерно в 1000 раз больше, чем в известных ранее методах.

Так было зафиксировано несколько десятков изотопов сверхтяжелых элементов и определены их радиоактивные характеристики (тип распада, энергия альфа-распада и время жизни). Времена жизни — в диапазоне от миллисекунд до десятков часов — почти на 30 порядков превышали значения, предсказываемые жидко-капельной моделью, что и придало гипотезе о существовании нового острова стабильности статус проверенной. Результаты по синтезу элементов №114 и №116 были подтверждены в экспериментах, проведенных в GSI [15, 16]. Синтез сверхтяжелых элементов, осуществленный в Лаборатории ядерных реакций, стал самым значимым результатом в ядерной физике за последние 50 лет.

Сотрудничество лучше, чем соперничество

Следует сказать, что соперничество групп исследователей в Дубне и Беркли не исключало взаимного интереса и обмена опытом. В 1963 г. Сиборг приехал в Москву для подписания договора о запрете испытаний



Визит Г.Сиборга в Дубну в 1963 г. Слева направо: В.С.Щербаков, Г.Сиборг, Г.Н.Флёрв, В.А.Щеголев, Е.Д.Донец.

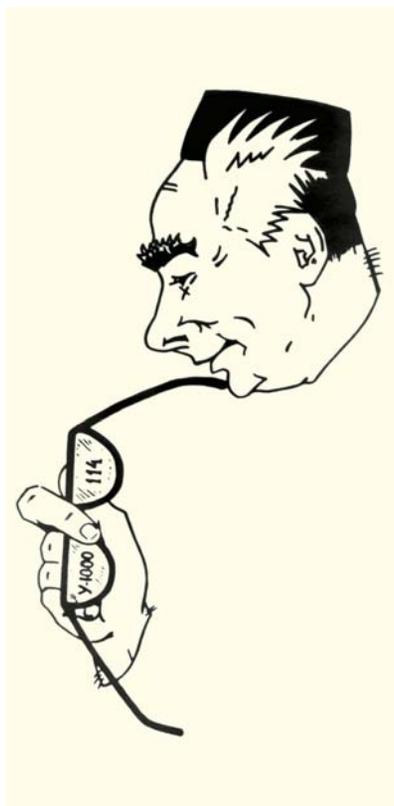
ядерного оружия в атмосфере и посетил Дубну, где в то время был уже синтезирован изотоп элемента №102 (^{256}Nb). Он убедился в высоком научном уровне проведенных экспериментов и их конкурентной значимости. В последующие годы визиты

американских коллег стали регулярными.

Позже наладилось сотрудничество с немецкими физиками из GSI, также занимавшимися синтезом новых элементов. В исследованиях, позволивших синтезировать элементы №111



Плеяда первооткрывателей новых элементов (Дубна, 1970 г.). Слева направо: Ю.Ц.Оганесян, Г.Н.Флёрв, В.А.Друин, А.Гиорсо, Г.Сиборг, К.Хьюлет.



Дружеские шаржи на К.Хьюлета (слева) и Г.Н.Флёрова (справа). Рисунки Е.А.Минина.

(рентгений) и №112 (коперникий), приняли участие сотрудники ЛЯР А.Г.Попеко, А.В.Еремин, А.Н.Андреев.

Синтез элементов №№113—118 был осуществлен в ЛЯР при тесном взаимодействии с американскими научными центрами — Ливерморской (LLNL) и Ок-Риджской (ORNL) национальными лабораториями.

В одной из американских популярных статей [17] это сотрудничество представлено так: «Оно началось в 1989 г., когда Кен Хьюлет и профессор Флёров встретились на конференции и договорились работать вместе над синтезом сверхтяжелых элементов. Известно, что ученые часто преодолевают национальные границы и междоусобные споры в интересах развития науки. Но это партнерство стало особенно примечательным. Как сказал один из участников этих работ Кен Муди: «Сотрудничество в синтезе

сверхтяжелых элементов лучше, чем бессмысленное соперничество». Итогом этого сотрудничества было открытие шести элементов Периодической системы с атомными номерами от 113 до 118. Последним из них был синтезирован элемент 117 — в 2010 г.»

Вкладом американских ученых в совместные исследования была поставка в Дубну редких изотопов трансурановых элементов ^{244}Pu , ^{243}Am , ^{248}Cm , ^{249}Cf , ^{249}Bk , которые использовались как мишени. Изотопы эти получались на самом мощном в мире атомном реакторе HFIR (High Flux Isotope Reactor). То была очень сложная и кропотливая работа. Например, изотоп ^{249}Bk в количестве 22 мг нарабатывался в реакторе в течение 250 дней, а затем еще требовалась химическая очистка от примесей других трансурановых изотопов. С поставленной задачей американцы

справились великолепно. Вдохновляющим стимулом было открытие новых элементов в периодической таблице элементов. Они заслуженно получили право предложить назвать элемент №116 «ливорморием».

Чем гордимся

Мы, физики Дубны, гордимся нашими достижениями. Результаты по синтезу сверхтяжелых элементов очень важны и существенны для дальнейшего развития ядерной физики. Обнаружение нового острова стабильности еще раз подтверждает представление о периодичности свойств материи, введенное великим ученым Д.И.Менделеевым.

Наши открытия признаны мировым научным сообществом. Многочисленные положительные отклики в прессе, в том числе американской, и письма в наш адрес свидетельствуют о большом общественном интересе. Как пример можно привести выдержку из частного письма профессора Института им.Н.Бора С.Бьернхольма к академику Ю.Ц.Оганесяну, возглавляющему работы по синтезу сверхтяжелых элементов.

«Дорогой Юрий! Ты оказался единственным человеком из всех, кто проявил интуицию и мужество и подверг сомнению существовавшие представления; кроме того, ты обладал техническим мастерством и пониманием проблемы, необходимыми для постановки нужных экспериментов. Не могу себе представить более заслуженного и более полного успеха! Одним махом ты пополнил таблицу элементов новым островом стабильности, который был давно предсказан теорией. ЭТО ПРЕКРАСНО! У тебя есть основания гордиться этим, потому что Дубна, наконец, стала тем местом, где должен воцариться Ангел Успеха. В конце концов, у Дубны всегда было много препятствий, и долгое время каза-

лось, что ей уготовано лишь второе место. Все это теперь история. Ясно, что ты — победитель. Я разделяю с тобой твою радость и хочу от всего сердца поздравить тебя и лабораторию с этим решающим и монументальным вкладом в нашу науку».

Нужно осознавать, что периодическая таблица элементов Менделеева есть средоточие наших знаний о природе. Она отражает не только химические, но также и ядерные, и физические свойства материи. Несомненно, она будет продолжать пополняться и развиваться, а вписанные в нее имена великих ученых останутся навеки в памяти человечества.

Мы предложили назвать элемент №114 «флеровием» в честь академика Флёрва, основателя Лаборатории ядерных реакций.

Он был нашим руководителем в течение 30 лет, и за эти годы наша лаборатория стала научным центром мирового уровня. Деятельность Флёрва начиная с 30-х годов была связана с развитием ядерной физики. Создание оригинальных научных направлений, важные открытия в области деления ядер, синтез новых химических элементов, обнаружение новых видов радиоактивности — внушительный вклад выдающегося ученого нашего времени, обогатившего мировую науку.

Георгий Николаевич обладал исключительным талантом физика-экспериментатора, удивительной интуицией, смелостью при постановке оригинальных экспериментов, острым критическим подходом, умением четко анализировать совокупность сложных экспериментальных



Юрий Цолакович Оганесян.

фактов, глубоким пониманием сущности физических явлений, необычайной энергией и умением довести до завершения свои замыслы. ■

Литература

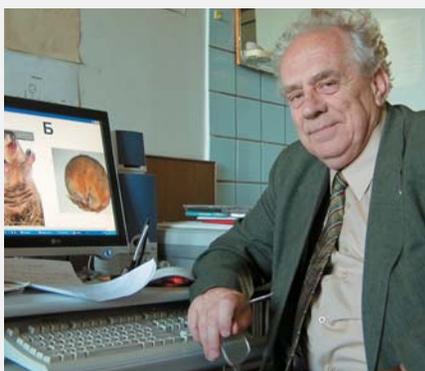
1. *Oganesian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* Synthesis of superheavy element 114 in reaction induced by ^{48}Ca // *Nature*. 1999. V.400. P.242—245.
2. *Oganesian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* Nuclei from island of stability of superheavy elements // *Phys. Rev.* 2000. V.C63. P.011301.
3. *Seaborg G.T.* // *Man-made transuranium elements*. N.Y., 1963.
4. *Wapstra A.H., Wilkinson D.H.* IUPAC Provisional recommendations // *Pure Appl. Chem.* 1991, V.63. P.879—886.
5. *Fields P.R., Friedman A.M., Misted J. et al.* Production of the new element 102 // *Phys. Rev.* 1957. V.107. P.1460—1465.
6. IUPAC http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chemical_elements_naming_controversies
7. *Bohr N., Wheeler J.A.* Mechanism of nuclear fission // *Phys. Rev.* 1939. V.56. P.426—435.
8. *Флёрв Г.Н.* // Доклад на заседания 2-й сессии ученого совета ОИЯИ 15 мая 1957 г. (выписка из стенограммы).
9. *Flerov G.N., Ter-Akopian G.M.* Superheavy nuclei // *Rep. Prog. Phys.* 1983. V.46. P.817—829.
10. *Strutinsky V.M.* Shell-correction method in nuclear physics // *Nucl. Phys.* 1967. A95. P.420—425.
11. *Nilsson S.G., Tsang C.F., Sobiczewski A.* On the nuclear structure and stability of heavy and superheavy elements // *Nucl. Phys.* 1969. V.A131. P.1—12.
12. *Sobiczewski A., Gareev F.A., Kalinkin B.N.* Closed shells for diffuse potential well // *Phys. Rev. Lett.* 1966. V.22. P.500—502.
13. *Хофманн З.* Синтез сверхтяжелых элементов методом холодного слияния // *Успехи химии*. 2009. Т.78. №12. С.1—17.
14. *Oganesian Yu.Ts.* Heaviest nuclei from ^{48}Ca -induced reactions // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2007. V.34. P.R165—R242.
15. *Gates M., Düllmann Ch. E., Schubel M. et al.* First superheavy element experiments at the GSI recoil separator TAACA: The production and decay of element 114 in the $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3-4n)$ reaction // *Phys. Rev.* 2011. V.C83. P.054618.
16. *Hofmann S., Heinz S. Mann R. et al.* // The reaction $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{296}116$ studied at the GSI SHIP // GSI Scientific Report. 2010.
17. *Walter K.* <https://str.llnl.gov/OctNov10/pdfs/10.10.7.pdf>

Экспериментальная электрофизиология сердца в создании новых препаратов

Л.В.Розенштраух

По оценкам Всемирной организации здравоохранения, ни по какой другой причине не умирает ежегодно столько людей, сколько от сердечно-сосудистых заболеваний, причем в большинстве случаев причиной смерти становится нарушение сердечного ритма (аритмия). Согласно результатам недавно завершеного международного регистра Record AF, самый распространенный во всем мире, включая Россию, метод восстановления ритма — нанесение электрического разряда в определенную фазу сердечного цикла. Этот метод, называемый на языке специалистов электрической кардиоверсией (ЭКВ), все еще остается «золотым стандартом», так как он гораздо эффективнее лекарственной терапии, или медикаментозной кардиоверсии (МКВ). Например, при персистирующей (хронической) форме фибрилляции или трепетания предсердий эффективность ЭКВ может превышать 90%.

Однако многим пациентам нелегко решиться на эту процедуру, поскольку она сопряжена с возможным повреждением тканей грудной клетки и самого сердца. Кроме того, внутри предсердий могут образоваться плохо фиксированные тромбы (в таком случае могут возникнуть тромбоэмболии). Тяжелые



Леонид Валентинович Розенштраух, академик РАН и член-корреспондент РАМН, заведующий лабораторией электрофизиологии сердца НИИ экспериментальной кардиологии ФГУ Российского кардиологического научно-производственного комплекса Минздравсоцразвития РФ, президент российской секции Меж-

дународного общества исследователей сердца, член Нью-Йоркской академии наук и Международной академии сердечно-сосудистых наук (Канада). Дважды лауреат Государственной премии СССР «за цикл работ по молекулярным и клеточным механизмам функционирования сердечной мышцы в норме и патологии» (1978) и «за создание и внедрение в медицинскую практику высокоэффективных лекарственных препаратов для профилактики и лечения нарушений сердечного ритма» (1987), лауреат Государственной премии РФ «за создание и внедрение в практику нового оригинального антиаритмического препарата нибентан» (2003) и первой национальной премии «Призвание» «за вклад в развитие медицины представителями немедицинских специальностей» (2001).

Мы поздравляем Леонида Валентиновича с 75-летием и благодарим за многолетнее и деятельное участие в жизни нашего журнала.

осложнения может вызвать и наркоз, который необходим при выполнении ЭКВ. И наконец, ЭКВ может прервать аритмию, но не предотвратить ее повторное возникновение. Антиаритмические средства лишены этих

недостатков, тем не менее МКВ долгое время воспринималась весьма призрачной альтернативой ЭКВ. И дело тут не только в невысокой эффективности лекарств, но и в том, что они сами могут вызывать разные формы

аритмий, в том числе смертельно опасные, например так называемую полиморфную желудочковую тахикардию «пируэт», или *torsade de pointes* (TdP), приводящую к внезапной остановке сердца. Больше всего таких осложнений наблюдалось при использовании препаратов, созданных в 70–80-х годах прошлого столетия.

В последние десятилетия фундаментальная наука обогатилась методами, позволившими значительно расширить не только знания в химии, биологии, медицине и т.д., но и возможности фармацевтической индустрии*. Отразилось это и на поиске безопасных и эффективных кардиотропных средств, в том числе антиаритмических, в создании которых важное место занимает экспериментальная электрофизиология сердца. Подтверждение тому — недавно созданный препарат ниферидил, эффективно купирующий фибрилляцию предсердий в низких дозах (всего 10–30 мкг/кг) и, судя по результатам первых клинических испытаний, не обладающий побочным действием.

Краткая предыстория

Как известно, на вероятность возникновения мерцания и трепетания предсердий, перешагнувших по распространенности эпидемический барьер, влияет изменение параметров динамики возбуждения/расслабления клеток сердечной мышцы (кардиомиоцитов)**. В исправно работающем сердце они циклически сокращаются и расслабляются в зависимости от степени поляризации их клеточной мембраны и передают эту поляриза-

цию соседним клеткам. Невозбужденные кардиомиоциты обладают потенциалом покоя, который меняется под действием различных стимулов. Входящие в клетку катионы (преимущественно Na^+ и Ca^{2+}) снижают этот потенциал, а выходящие (в основном K^+) — увеличивают. Быстрое падение трансмембранного потенциала, при котором мембрана теряет нормальный отрицательный заряд (фаза деполяризации) и становится положительно заряженной (фаза овершута), а затем возвращается к состоянию покоя (фаза реполяризации), называется потенциалом действия. Этот импульс сначала передается по предсердиям, достигает проводящей системы и далее распространяется по желудочкам, что обеспечивает последовательное сокращение предсердий и желудочков, а затем их расслабление.

Поскольку процесс формирования аритмий связан с разными формами аномалий последовательности электрических процессов на клеточном и субклеточном уровнях, то и препараты, создаваемые для восстановления сердечного ритма, должны влиять на определенные клеточные мишени (ионные каналы, ионные насосы и рецепторы). Катионы проникают через клеточную мембрану по специфическим для каждого иона трансмембранным каналам. Избирательно подавляя транспорт тех или иных катионов через клеточную мембрану кардиомиоцитов, можно влиять на форму потенциала действия, продолжительность разных его фаз и длительность рефрактерного периода, в течение которого кардиомиоциты остаются невосприимчивыми к возбуждению. Используемые для этих целей препараты принято делить на четыре класса: I — блокаторы натриевых каналов, II — β -адреноблокаторы, III — средства, удлиняющие реполяризацию, IV — блокаторы кальциевых каналов.

Исследование каждого нового препарата проходит в не-

сколько этапов. После того как фармакологически определено, что данное химическое соединение способно купировать вызванные у экспериментальных животных аритмии, необходимо определить, к какой группе или классу антиаритмических средств оно относится. С этой целью анализируют изменения клеточных или трансмембранных потенциалов действия с помощью микроэлектродной техники, позволяющей регистрировать трансмембранные потенциалы действия от отдельных клеточных структур в различных отделах сердца, и определяют так называемую дозу-эффект действия препарата. Полученные результаты позволяют не только найти место исследуемого вещества в ряду уже известных, но и получить предварительные данные о тех клеточных мишенях, на которые оно преимущественно действует.

На следующем этапе детально анализируют механизмы кардиотропного действия найденного соединения. В первую очередь исследуется его влияние на ионную проводимость — натриевую, кальциевую, калиевую и т.д. Для этих целей применяются методы современной микроэлектрофизиологии. Например, метод фиксации потенциала в различных его модификациях позволяет проанализировать как суммарные ионные токи, так и активность одиночных ионных каналов.

Затем необходимо сравнить новый антиаритмический препарат с уже введенными в медицинскую практику и выявить его преимущества. На этом этапе в ряде случаев приходится разрабатывать специальные модели аритмий или модифицировать имеющиеся. Так, создавая вместе с Н.В.Кавериной и ее сотрудниками из Института фармакологии РАМН первые антиаритмические препараты фенотиазинового ряда — этмозин и этацинин, мы модифицировали известную модель аритмий, разработанную А.С.Харрисом еще в 1950 г. Через

* Подробнее см.: *Белянова Л.П.* Лауреаты Нобелевской премии 2001 года по химии — У.Ноулс, Р.Нойори, Б.Шарплесс // *Природа*. 2002. №1. С.69–72.

** Подробнее см.: *Камкин А.Г., Киселева И.С., Ярыгин В.Н.* Фибрилляция, дефибрилляция... // *Природа*. 2002. №4. С.6–16.

24 ч после перекрытия (двустадийной окклюзии) левой нисходящей коронарной артерии у собак полностью прерывалась проводимость электрического импульса из предсердий в желудочки (возникла поперечная атриовентрикулярная блокада). В результате искусственно вызванный ишемический процесс (как при инфаркте миокарда) приводил к максимальному уровню замещающей (эктопической) активности желудочков. После введения этацизина эктопический ритм желудочков снижался до 40–50 сокращений в минуту, и этот ритм можно было полностью блокировать хлористым цезием. Именно такая последовательность событий наблюдалась при экспериментальном инфаркте миокарда и полной поперечной блокаде после введения хлористого цезия на фоне этацизина. И в этом его уникальность по сравнению с другими антиаритмическими препаратами I класса. При их тестировании ритм желудочков в аналогичных условиях снижался в значительно меньшей степени и не был чувствителен к хлористому цезию, а это значит, что они подавляли не все эктопические фокусы.

Такова вкратце история электрофизиологических работ, проведенных при создании первых

антиаритмических препаратов из группы фенотиазинов. К сожалению, оказалось, что они обладают серьезными недостатками, главный из которых — проаритмический эффект, уже упомянутый в начале статьи.

Альтернатива ЭКВ

Последняя версия рекомендаций по обследованию и лечению больных, страдающих фибрилляцией предсердий, принята в 2010 г. в Стокгольме на конгрессе Европейского общества кардиологов (European Society of Cardiology's, ESC). В том документе лекарственную терапию (МКВ) предлагается использовать лишь для людей, у которых это заболевание возникло недавно (менее 48 ч). Столь зыбкими, видимо, представляются европейским экспертам шансы успеха применения антиаритмических препаратов у больных с персистирующей (длящейся более семи дней) фибрилляцией предсердий. Вместе с тем в американо-европейских рекомендациях 2006 г. для лечения таких пациентов предлагались препараты III класса — дофетилид, ибутилид и амиодарон [1].

Однако эффективность этих препаратов при персистирующем течении фибрилляции или

трепетании предсердий далека от тех результатов, которые могут быть достигнуты с помощью ЭКВ. Амиодарон устраняет персистирующую ФП не более чем в 50% случаев, ибутилид — в 31–51%, а максимальная эффективность дофетилида у больных этой категории составляет 61%. Развитие TdP реже всего (в пределах 0.5%) наблюдается при применении амиодарона. Это опасное нежелательное явление развивается в 1.6–8.3% случаев при использовании ибутилида и у 3–13% больных в результате действия дофетилида.

Интерес к антиаритмическим препаратам III класса обусловлен, в частности, тем, что их действие связано с увеличением так называемых эффективных рефрактерных периодов (ЭРП), т.е. длительности трансмембранных потенциалов за счет замедления реполяризации в волокнах предсердий и желудочков (рис.1). Это действие обратно тому, что происходит в ходе электрофизиологического изменения (ремоделирования) миокарда предсердий при персистировании фибрилляции предсердий [2, 3]. Увеличение ЭРП как одного из множителей в формуле длины волны возбуждения приводит к ее увеличению. А при увеличении контура циркулирующей волны возбуждения до размеров, которые не в состоянии уложиться в ограниченной массе предсердного миокарда, дальнейшее течение аритмии становится невозможным и она прекращается. Таков основной механизм противоаритмического действия препаратов III класса.

Более четверти века назад в Всесоюзном научно-исследовательском химикофармацевтическом институте (ВНИХФИ)* было синтезировано несколько соединений, наиболее перспективное из которых получило название «нибентан». В настоящее

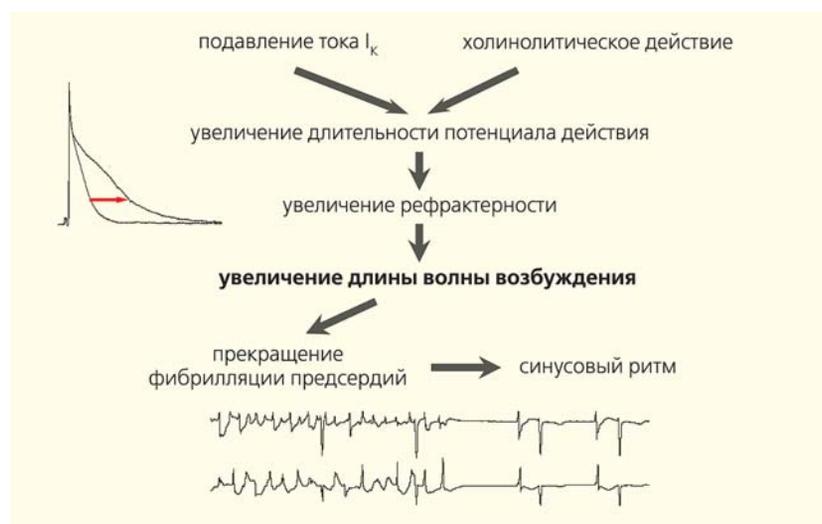


Рис.1. Механизм антиаритмического действия препаратов III класса.

* В 1989 г. ВНИХФИ вместе с его производственно-экспериментальным заводом вошли в Центр по химии лекарственных средств (ЦХВС-ВНИХФИ).

время он внедрен в медицинскую практику. Электрофизиологические механизмы действия этого препарата и его антиаритмическая активность подробно изучены на животных в нашей лаборатории, а клинические испытания прошли в отделе клинической электрофизиологии Института клинической кардиологии им.А.Л.Мясникова РКНПК. Установлено, что нибентан более чем в 80% случаев прекращает фибрилляцию предсердий и в этом отношении не уступает электрической кардиоверсии (электрической дефибрилляции). Уникальность этого антиаритмика еще и в том, что он вызывает минимальный уровень побочных действий. Есть лишь одно ограничение — нибентан может использоваться только в инъекционной форме. Необходимо было найти соединение, по структуре близкое к нибентану, но которое можно использовать в форме таблеток. Экспериментальные электрофизиологические исследования и в этом случае сыграли ведущую роль.

Современные знания о механизмах формирования и поддержания мерцательной аритмии, о функционировании ионных каналов направили нас на поиск новых препаратов, либо селективно влияющих на миокард предсердий, либо обладающих

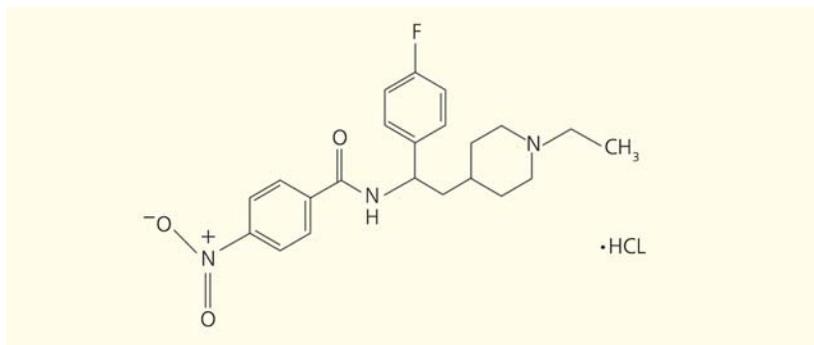


Рис.2. Структурная формула ниферидила [1].

иными механизмами антиаритмического действия. В продолжение работ по получению новых более эффективных, безопасных и патентоспособных антиаритмических препаратов III класса были исследованы производные пиперидил-4-этана. Для дальнейшего доклинического изучения из них было отобрано соединение, получившее название «РГ-2», а в дальнейшем — «ниферидил» (рис.2) [4].

Ниферидил разработан в нашей лаборатории совместно с ЦХВС-ВНИХФИ. В этих исследованиях была своя специфика: потребовались другой анализ ионных токов и совершенно другая модель аритмий. Фибрилляция предсердий вызывалась ацетилхолином или раздражением парасимпатических нервов. На этой модели ни один

из известных тогда препаратов не способен был полностью купировать мерцание-трепетание (фибрилляцию) предсердий.

В результате электрофизиологических исследований ниферидила выяснилось, что по ионному механизму действия он близок к нибентану (способен подавлять калиевые токи) [5, 6]. Замечу, аналогичным свойством обладает не только нибентан, но и другие новые препараты III класса. В экспериментах ниферидил значительно увеличивал длительность потенциала действия за счет замедления конечной фазы реполяризации в предсердиях, при этом в диапазоне исследованных концентраций (0.01, 0.1 и 1 мкмоль) не изменял потенциала покоя и амплитуды потенциала действия (рис.3, а,б). В концентрации 0.1

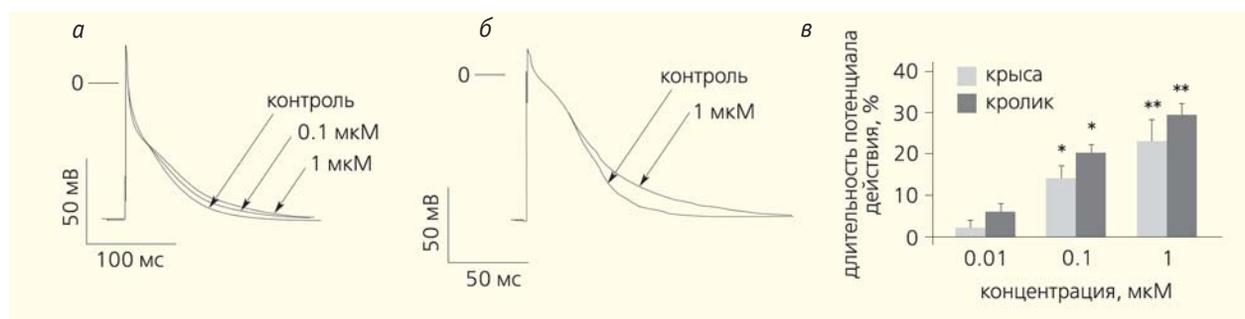


Рис.3. Записи потенциала действия предсердных кардиомиоцитов крысы (а) и кролика (б) при использовании ниферидила (в концентрациях 0.01, 0.1 и 1 мкмоль) и без (контроль). Видно, что ниферидил значительно дозозависимо увеличивал потенциала действия за счет замедления конечной фазы реполяризации в предсердных волокнах у каждого из животных, при этом в диапазоне исследованных концентраций ниферидил не изменял потенциала покоя и амплитуды потенциала действия. Такое увеличение длительности потенциала действия при неизменности других его параметров характерно для препаратов III класса и приводит к увеличению рефрактерности. На гистограмме (в) представлены средние данные по шести опытам для длительности потенциала действия на уровне 90% реполяризации, полученные на препаратах предсердий крысы (светлые столбики) и кролика.

и 1.0 мкмоль ниферидил достоверно увеличивал на примерно 19 и 26% длительность потенциала действия на уровне 90% реполяризации по сравнению с контролем (рис.3, в). Такие изменения приводят к увеличению ЭРП, и тут выяснились удивительные подробности. Оказалось, что под действием нифе-

ридила достоверный рост рефрактерности в предсердиях начинается уже при дозе в 5 мкг/кг, а в желудочках — при 40 мкг/кг. Эти восьмикратные различия по дозе имеют принципиальное значение, так как указывают на то, что при использовании данного препарата угроза появления осложнений при купирова-

нии мерцательной аритмии может быть существенно меньше. Это означает, что применение ниферидила может оказаться более безопасным по сравнению с другими препаратами III класса (рис.4).

Результаты нашей работы, по-видимому, могут рассматриваться как начало нового пер-

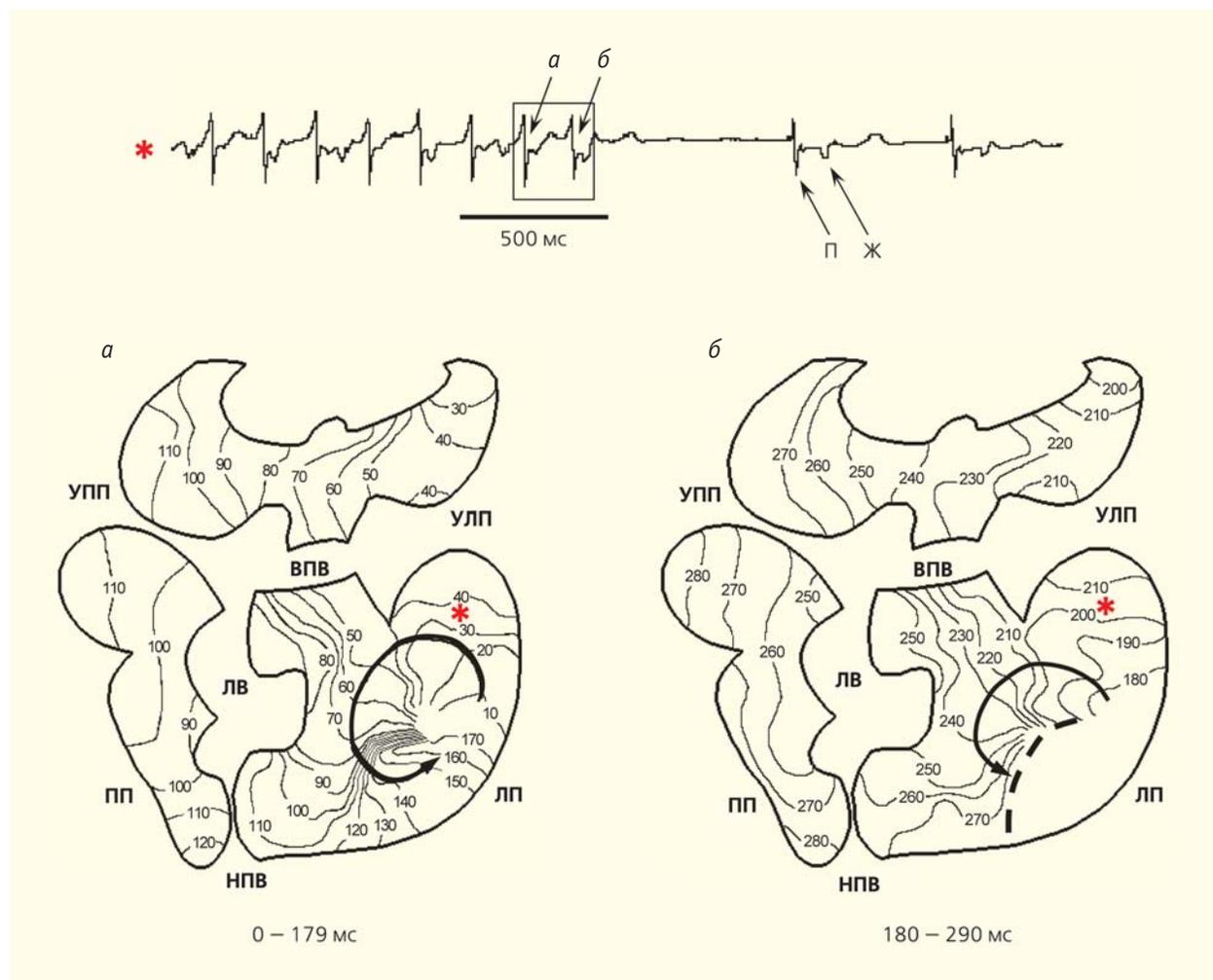


Рис.4. Результаты многоэлектродного электрического картирования предсердий, иллюстрирующие механизмы поддержания (а) и прекращения (б) мерцательной аритмии у собак под влиянием ниферидила (20 мкг/кг). На карте а видно, что мерцательная аритмия поддерживается благодаря циркуляции (ротации) возбуждения в свободной стенке предсердия вокруг некоторой границы раздела между зонами с большой и малой рефрактерностью. Все циклы мерцательной аритмии обусловлены подобным рода циркуляцией. Прекращение этого процесса (карта б) происходит в результате увеличения рефрактерности, благодаря чему «фронт» волны возбуждения встречает рефрактерный «хвост», ротация прекращается и восстанавливается нормальный (синусовый) ритм. П — активность предсердий; Ж — активность желудочков; а и б, включенные в квадрат, соответствуют картам тотального суправентрикулярного картирования (карты а и б). ВПВ и НПВ — верхняя и нижняя полые вены; УЛП и УПП — ушки левого и правого предсердия соответственно; ЛВ — легочные вены. Изохроны волн возбуждения на картах построены от 254 электродов с шагом 10 мс. Стрелками обозначена ротация волны возбуждения; пунктирной линией на карте б — область блокады распространения волны возбуждения в результате увеличения рефрактерности под действием ниферидила. Звездочкой на карте а обозначено место, где была зарегистрирована электрограмма, показанная вверху на вставке.

спективного этапа развития проблемы МКВ у больных с персистирующей фибрилляцией предсердий [7]. При использовании у таких пациентов трехэтапной схемы введения ниферидила в диапазоне доз от 10 до 30 мкг/кг впервые удалось восстановить синусовый ритм в 90% случаев, что поставило достигнутый результат в один ряд с известными возможностями ЭКВ (рис.5).

Важно отметить, что в исследование были включены пациенты, у которых текущий эпизод аритмии уже длился от двух недель до 24 мес., а общий срок заболевания (время от первого возникновения фибрилляции или трепетания предсердий до момента включения в исследование) — от одного месяца до 35 лет. Это значит, что степень выраженности электрического ремоделирования миокарда предсердий у пациентов, участвовавших в нашем исследовании, была выше, а исходные шансы лекарственного восстановления нормального ритма сердца — ниже.

Результаты клинических испытаний подтвердили данные экспериментальных исследований: ниферидил сильнее влияет на процессы реполяризации предсердий, чем желудочков, и такой характер действия препарата может служить основой безопасности его применения с точки зрения риска аритмогенных эффектов. Наш первый клинический опыт служит тому подтверждением.

Новые мишени

Время, необходимое для проведения доклинических работ, которые включают помимо всего упомянутого еще и проверку препарата на токсичность (мутагенность, канцерогенность и др.), растягивается на многие годы, а в некоторых случаях десятки лет. Не говоря уж о том, что на каждом этапе этих исследований работы могут быть пре-

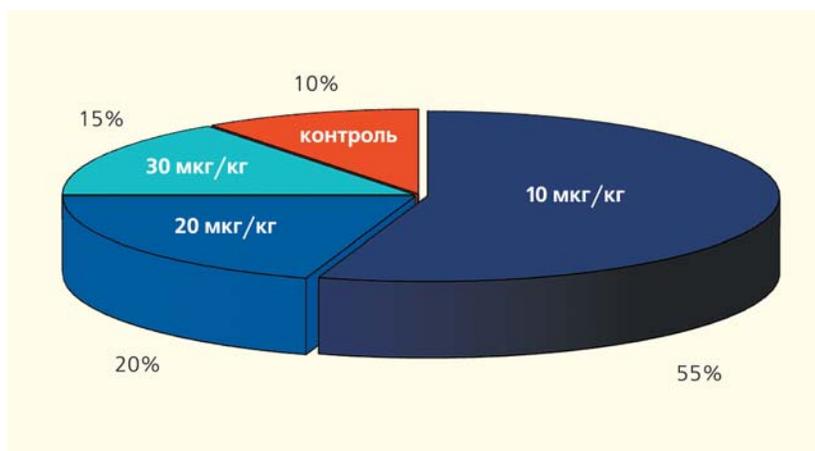


Рис.5. Данные первых клинических испытаний эффективности ниферидила на пациентах с хроническим мерцанием предсердий. Препарат вводился внутривенно в три этапа (по 10 мкг/кг) с интервалом 15 мин между инъекциями. Общая эффективность составила 90%. В подобных случаях эффективность других антиаритмических препаратов составляет около 50%.

кращены из-за выявления нежелательных побочных действий найденного соединения.

После завершения доклинической стадии исследований все материалы анализируются в Фармакологическом комитете МЗ, после чего выдается разрешение на начало клинических испытаний. На них уходит времени не меньше (если не больше), чем на предклинические эксперименты. Если успех сопутствует разработчикам, то заключительный этап — это стадия внедрения препарата. Таким образом, для создания кардиотропного препарата оригинальной структуры требуется в общей сложности не менее 20 лет. Однако быстро и, замечу, дешево создать ни одно оригинальное фармакологическое лекарственное средство невозможно. Это требует немалых материальных вложений и на получение новых фундаментальных знаний, и на разработку эффективного и безопасного препарата, особенно если это касается лечения сердечно-сосудистых заболеваний.

Почему сказанное полезно знать? Потому что, когда мы вошли в своеобразную форму рынка и повсеместно ослабился контроль за качеством, у людей

возникла своего рода свобода выбора лекарств в соответствии с материальными возможностями. Это с одной стороны, а с другой — всем известно об исключительно высоком проценте подделок среди продаваемых препаратов. Средства массовой информации ежедневно рекламируют новые «лекарства», которые выдаются чуть ли не за панацею, поскольку будто бы обладают широким спектром действия и высокой эффективностью. Не всякому дано относиться к этому с настороженностью и здоровым скепсисом... Все сказанное относится и к таким лекарственным средствам, которые в определенном смысле сходны или напоминают по своему действию уже известные препараты, хотя при этом могут отличаться оригинальной структурой.

До сих пор в подавляющем большинстве случаев поиск лекарственных средств базируется на эмпирической основе. Главная причина такого положения заключается в сохраняющейся ограниченности наших знаний об основных мишенях кардиотропных средств. Это — белковые структуры клеточных мембран, воздействие на которые и определяет положитель-

ное, в нашем случае антиаритмическое действие. К таким мишеням относятся главным образом ионные каналы, ионные насосы и рецепторы. Каждая из этих мишеней представляет собой крупные (с молекулярной массой в десятки и сотни килодальтон) молекулы.

Взаимодействие лекарственного средства с мишенью может быть изучено пока весьма поверхностно и в ограниченном объеме. Связано это с тем, что и сама мишень, и исследуемое вещество с точки зрения строгого химического анализа остаются слишком сложными объектами. Что касается декларативных заявлений, нередко встречающихся в СМИ, о целенаправленном создании лекарственных средств с заранее предсказанной структурой вещества и с заранее определенными свойствами, то они, как правило, не подтверждаются на практике. И тем не менее количество лекарственных препаратов, в том числе антиаритмических, растет год от года благодаря случайным находкам в новых рядах химических соединений. Другой путь поиска лекарственных средств — открытие и изучение свойств новых мишеней кардиотропного действия (при сохра-

нении того же эмпирического подхода). В последние годы появились обнадеживающие результаты: открыта новая мишень кардиотропного действия. Этой мишенью предположительно могут быть белки (коннексины), из которых сформированы так называемые щелевые контакты. Они осуществляют межклеточную связь между сотнями тысяч кардиомиоцитов и обеспечивают работу сердечной мышцы как единого целого. В результате усилий различных специалистов — морфологов, биохимиков, химиков (в том числе специалистов в области рентгеноструктурного анализа) и наконец электрофизиологов удалось установить, что щелевые контакты могут изменять сопротивление при закислении внутриклеточной среды, т.е. при тех условиях, которые возникают, например, при инфаркте миокарда. Снижение внутриклеточного pH приводят к таким конформационным изменениям С-концов молекул коннексинов, в результате которых клетки, подвергшиеся наибольшему ишемическому повреждению, изолируют себя от более сохраненных клеток, не давая возможности ишемическому процессу продолжать распространяться.

* * *

Электрофизиологией сердца и механизмами аритмий я начал заниматься после окончания кафедры физиологии человека и животных МГУ в 1961 г. В те далекие времена существовало всего несколько антиаритмических препаратов, а представления о механизмах нарушения ритма и в частности о мерцании и трепетании носили характер противоречивых гипотез. В настоящее время уже создано более 50 антиаритмических препаратов, а механизмы мерцательной аритмии рассматриваются как единый процесс, состоящий из трех различных фаз: возникновения, поддержания и прекращения. Фармакологическое лечение больных, страдающих мерцанием и трепетанием предсердий, а ведь это 1—2% от числа людей в популяции, серьезно продвинулось: с помощью известных антиаритмических препаратов удается вылечить примерно 50% таких пациентов. Результаты, полученные к настоящему времени при исследовании ниферидила, говорят о том, что успеха можно будет добиться в 80—90% случаев. Это стимулирует наш труд и вселяет надежду на будущее. ■

Литература

1. Fuster V., Ryden L.E., Cannom D.S. et al. ACC/AHA/ESC 2006 guidelines for management of patients with atrial fibrillation: a report of the American College of Cardiology, American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the European Society of Cardiology Committee for Practice Guidelines // J. Am. Coll. Cardiol. 2006. №48. P.e149—e246.
2. Wijffels M.C., Kirchhof C.J., Dorland R. et al. Atrial fibrillation begets atrial fibrillation. A study in awake chronically instrumented goats // Circulation. 1995. №92. P.1954—1968.
3. Dobrev D., Ravens U. Remodeling of cardiomyocytes ion channels in human atrial fibrillation // Basic. Res. Cardiol. 2003. №98. P.137—148.
4. Glushkov R.G., Yuzhakov S.D., L'vov A.I. et al. New group of class III antiarrhythmic drugs: piperid-4-vlethane derivatives // Chemical-pharmaceutical journal. 2011. V.45. №2. P.65—74.
5. Резник А.В., Федоров В.В., Кокос Ю.М. и др. Ионные механизмы кардиотропного действия препарата III класса PG-2 // Кардиология. 2003. №10. С.76—82.
6. Розенштраух Л.В., Федоров В.В., Резник А.В. Экспериментальное электрофизиологическое исследование препарата III класса PG-2 // Кардиология. 2003. №9. С.56—64.
7. Юричева Ю.А., Майков Е.Б., Соколов С.Ф. и др. Первый опыт клинического применения нового антиаритмического препарата III класса ниферидила у больных с персистирующей формой фибрилляции и трепетания предсердий // Кардиология. 2011. №1. С.55—64.

Цвет броуновского движения

М.А.Белушкин, Дж.Фоффи

С о школьной скамьи многим памятна живая картинка физического практикума: в окуляре микроскопа снуют туда-сюда микрокапельки в капельке жидкости (например, крошечные капли жира в воде). Их перемещение кажется совершенно хаотичным, хотя классическая механика предполагает, что каждое следующее положение есть следствие предыдущего. Помнит ли частица проделанный ею путь? И сохраняет ли о нем память вода — среда, где частица движется? Поговорим здесь о старой проблеме в новом свете (точнее, цвете, как станет ясно из дальнейшего).

Века в движении

Случайное движение взвешенных частиц в жидкости или газе, ныне известное как броуновское, знакомо человеку многие столетия. Хотя открытие «присуждено» шотландскому ботанику Роберту Броуну и датируется 1827 годом, уже в 60-х годах до нашей эры Лукреций не только описал такую пляску частиц пыли в поэме «О природе вещей», но и объяснил ее причину — столкновение частиц с невидимыми молекулами воздуха.

Строго говоря, фундаментальная природа той силы, которая действует на броуновские частицы, до сих пор остается поводом для научных дебатов [1]. Пусть взвешенная частица движется столкновениями с молекулами газа или жидкости, но чем движимы сами молекулы?



Максим Александрович Белушкин, кандидат физико-математических наук, сотрудник Института теоретической физики (Лозанна, Швейцария). Занимается физикой конденсированного состояния вещества, преимущественно исследованием коллоидных систем.



Джузеппе Фоффи, профессор того же института. Область научных интересов — коллоидные системы, мезоскопическая гидродинамика, агрегация и диффузия в условиях молекулярной тесноты.

Более того, в классическом приближении, т.е. на масштабах, на которых можно пренебречь квантовыми эффектами, микроскопические законы движения детерминистичны и обратимы. Каким же образом из них следуют в общем случае необратимые законы термодинамики и почему движение взвешенной частицы кажется случайным?

Переход от микроскопического описания системы к макроскопическому непрост, и здесь необходимо определить пределы применимости различных подходов к описанию поведения системы.

На макроскопических масштабах, как известно, система подчиняется законам термодинамики. Они характеризуют жизнь больших тел на больших промежутках времени, т.е. в так называемом термодинамическом пределе. То, что законы термодинамики не действуют для произвольно малых систем на произвольно малых отрезках времени, понимал сам Людвиг Больцман, но математическое определение масштабов применимости было дано лишь в 1990-х годах — с доказательством теоремы о колебаниях [2]. Одно из основных следствий этой теоремы — утверждение, что второй закон термодинамики (закон, определяющий, по сути, направление течения времени) не выполняется уже на промежуточных (мезоскопических) масштабах, а именно на длинах порядка микрометра и временных отрезках порядка микросекунды.

© Белушкин М.А., Фоффи Дж., 2012

В общем случае вопрос о переходе от микроскопических законов движения к мезоскопическому описанию системы и далее к макроскопическим законам крайне сложен. Мы и не будем пытаться здесь на него ответить. Удовлетворимся пока следующим утверждением, необходимым в дальнейшем для описания простого процесса броуновского движения взвешенных частиц: за движение молекул отвечает тепловая энергия. Что же такое тепловая энергия?

Известно, что каждое тело обладает внутренней энергией, в которую входят две составляющие: потенциальная и кинетическая. Среди различных форм потенциальной энергии выделяют, например, химическую, энергию молекулярной и атомарной структур и энергию межмолекулярных взаимодействий. А суммарная кинетическая энергия атомов и молекул среды как раз и есть тепловая энергия тела, которая линейно связана с температурой. Итак, по крайней мере в классическом приближении атомы и молекулы тел находятся в движении, темп которого задается температурой.

Таким образом, любая частица, погруженная в жидкость или газ, приводится в движение за счет столкновений с атомами и молекулами среды и вовлекается в процесс диффузии. Теоретическое описание этого явления было впервые дано Альбертом Эйнштейном. Он показал, что если рассматривать столкновения как случайные и независимые, то квадрат смещения броуновской частицы линейно пропорционален времени. Для сравнения: квадрат смещения свободной частицы, которая движется поступательно с постоянной скоростью, пропорционален квадрату времени. Коэффициент пропорциональности, связывающий время и квадрат смещения броуновской частицы, получил название коэффициента диффузии. Эйнштейн нашел, что он обратно пропорционален коэффициенту вязкого трения, который для сферических частиц еще в XIX в. был вычислен Джорджем Стоксом (как обратно пропорциональный произведению радиуса частицы и вязкости среды). Итак, диффузия броуновской частицы происходит тем быстрее, чем меньше частица и чем в менее вязкой среде она движется.

Белый шум и вопрос памяти

Математически процесс броуновского движения можно описать стохастической версией уравнения Ньютона — уравнением Ланжевена, которое ради простоты приводим в одном измерении:

$$M\ddot{x}/dt^2 = -\gamma dx/dt + \Gamma(t). \quad (1)$$

Здесь M — масса броуновской частицы, γ — коэффициент вязкого трения, $x(t)$ — смещение частицы и $\Gamma(t)$ — некая случайная сила, действующая на частицу. Собственно, эта сила и воплощает утверждение, что частицами движет тепловая энер-

гия. Она учитывает всю совокупность столкновений частицы с атомами и молекулами среды. В теории Эйнштейна содержится ряд предположений касательно свойств этой силы. Подразумевается, что она является случайной величиной — точнее, гауссовым белым шумом.

В данной характеристике заложено, что все столкновения друг от друга независимы, что спектральная плотность силы, параметризующей эти столкновения, постоянна и не зависит от частоты [3].

Понятие «спектр» привычнее относить к колебательным процессам — в оптике, радиотехнике, акустике он представляет распределение энергии процесса по частотам. Для так называемого белого шума сигнал распределен равномерно во всем диапазоне частот (точнее, в определенном их интервале, иначе полная энергия процесса была бы бесконечной). Хрестоматийный пример белого шума — грохот близкого водопада, производящего одинаковый звук на разных частотах. Но если от водопада отойти подальше, звук порозовеет — в спектре будут преобладать длинноволновые компоненты, поскольку высокочастотные составляющие затухают в воздухе сильнее.

На самом деле область использования спектрального представления (и частотного состава) волновыми явлениями не ограничивается — так, оно исправно служит для описания случайных процессов. Опуская здесь соответствующие интегральные формулы (спектральная плотность появляется в преобразованиях Фурье), подчеркнем главное для нас: спектральная плотность строится для корреляционных функций, показывающих степень связанности между собой значений случайной величины в разные моменты времени. А белый шум с постоянной плотностью (равномерным спектром) отвечает нулевому времени корреляции, т.е. полному отсутствию зависимости значений случайной величины от своей же предыстории.

Вообще-то предположение о том, что столкновения взвешенной частицы с атомами и молекулами среды не зависят от прошлых событий, сомнительно. Действительно, при каждом столкновении броуновской частицы с частицами жидкости происходит обмен импульсом и энергией, но таким образом, что суммарные импульс и энергия остаются неизменными. Молекулы жидкости, сталкиваясь между собой, так же обмениваются импульсом и энергией, и при этих столкновениях так же сохраняются суммарные импульс и энергия. Именно эта локальность микроскопических законов сохранения приводит к макроскопическому уравнению гидродинамики — уравнению Навье—Стокса. Установлено также: подобные гидродинамические эффекты даже в простых жидкостях связаны с тепловыми колебаниями, что отражается в вышеописанной теореме о колебаниях [4].

И уж если суммарные импульс и энергия неизменны, а взвешенная частица обменивается ими

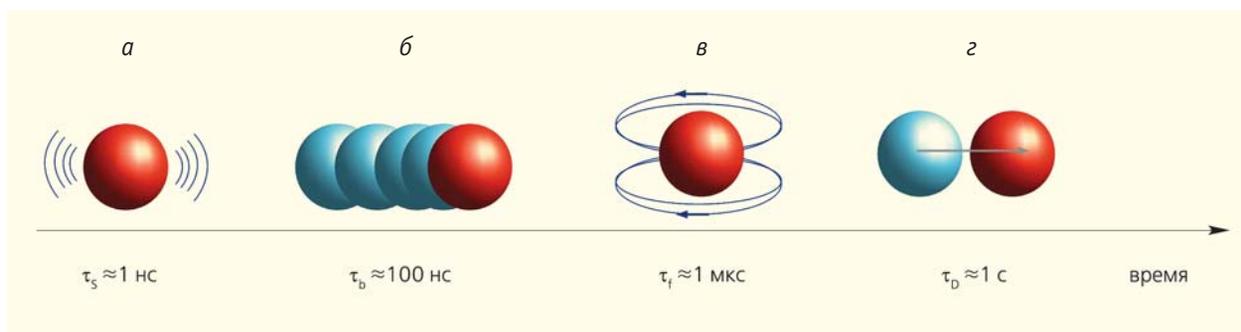


Рис.1. Иллюстрация процессов, происходящих при диффузии взвешенной частицы радиусом в 1 мкм в воде. Спустя наносекунду от произвольного времени начала отсчета формируется продольная звуковая волна, которая уносит около трети импульса частицы (а) [5, 6]. Около 100 нс частица продолжает двигаться, подчиняясь остатку импульса, которым она обладала в момент начала отсчета (б). Через приблизительно микросекунду формируется вязкий вихрь — поперечная волна возвращает частице часть отданного жидкости импульса; этот вихрь лежит в основе гидродинамической памяти (в). Спустя несколько секунд средний квадрат смещения частицы будет равен квадрату диаметра (г). Прекрасный обзор, посвященный динамике взвешенных частиц в растворе и роли гидродинамических эффектов, дан в [3].

с жидкостью, разве не естественно предположить, что жидкость хранит память о движении броуновской частицы? И поскольку макроскопически эти локальные законы сохранения отражаются в законах гидродинамики, нельзя ли предположить, что такая память жидкости отразится на наблюдаемом ходе движения?

Этими вопросами можно не задаваться, если анализировать процессы на макроскопических масштабах. Но уже на мезоскопических масштабах проявляется их актуальность.

Собственно, в том, что гидродинамические корреляции в жидкости устанавливаются и влияют на динамику взвешенных частиц, ничего нового нет. Уже в XIX в. Стокс понимал, что коэффициент вязкого трения γ не может быть величиной постоянной, а должен зависеть от времени, чтобы отражать целый ряд сложнейших процессов, которые происходят в жидкости при движении броуновской частицы [5]. Эйнштейн тоже осознавал, что его теория диффузии применима лишь на больших отрезках времени. Получить точное решение в 1905 г. ему помешало отсутствие необходимого физико-математического аппарата.

Так что же именно происходит в жидкости при движении взвешенной частицы? Рассмотрим основные этапы событий на примере частицы массой порядка пикограмма и радиусом в микрометр в воде при комнатной температуре. Они схематически показаны на рис.1. Отметим, что необходимо привлечь две теории для описания этих процессов: случайное движение взвешенной частицы в вязкой среде уравнением Ланжевена (1) описать можно, но гидродинамические явления в жидкости как непрерывной среде с его помощью рассмотреть нельзя.

Пусть в начальный момент времени броуновская частица обладает неким импульсом. Соглас-

но уравнению Навье—Стокса, спустя наносекунду (именно таков интервал времени, за которое звуковая волна преодолевает расстояние, равное радиусу частицы) треть этого импульса отдается жидкости и уносится продольной — звуковой — волной [5, 6]. На этом временном промежутке жидкость нельзя считать несжимаемой, как обычно делается при поиске решения уравнения Навье—Стокса, поскольку как раз сжимаемость жидкости отвечает за формирование звуковой волны. Этот процесс не укладывается в рамки простого уравнения Ланжевена (1), которое, как только что отмечалось, не учитывает гидродинамического поведения жидкости.

Взвешенная частица продолжает двигаться благодаря оставшимся двум третям изначального импульса около ста наносекунд [7]. К концу этого временного промежутка можно считать, что у частицы не остается памяти о своем состоянии в момент начала отсчета. Для этого движения снова годится уравнение (1).

Но особенно интересно происходящее спустя микросекунду от начала отсчета времени. Дело в том, что, согласно уравнению Навье—Стокса, импульс, который взвешенная частица отдала жидкости и который не унесла звуковая волна, распространяется диффузно поперечной волной и возвращается к нашей частице. Таким образом, несмотря на то что, казалось бы, частица потеряла информацию о своем прошлом, жидкость возвращает ей память! Этому сложнейшему процессу мы и посвятим остаток статьи. Естественно, простое уравнение (1) опять его не описывает.

Итак, что же можно узнать об этой гидродинамической памяти, как можно ее зарегистрировать и какие технологические применения можно для нее придумать? Этими вопросами задались в 2005 г. Хенрик Фливберг и Кирстин Берг-Соренсен [8]. Они предложили следующую схему

эксперимента, теоретически нехитрую, но на практике весьма сложную.

Частица в тюрьме из света

Заклучим броуновскую частицу в оптическую ловушку. Этот класс методик основан на открытом в 1970 г. Артуром Эшкиным феномене удержания микроскопических частиц в луче лазера. Он заключается в том, что прозрачные диэлектрические объекты, погруженные в лазерный луч, движутся по градиенту интенсивности света. В условиях сильной фокусировки луча частица занимает равновесное положение вблизи точки фокуса.

Точное описание данного процесса в общем случае довольно сложно [9], но, если размер частицы намного больше длины волны лазера, можно предложить следующую интерпретацию (см. рис.2). Пучок света частично отражается от частицы, частично преломляется в ней, что приводит, согласно второму закону Ньютона, к возникновению двух разнонаправленных сил. При преломлении меняется импульс проходящих насквозь фотонов. Этот импульс передается частице, толкая ее по градиенту интенсивности пучка, т.е. в центр ловушки, с некоторой силой F_{grad} . С другой стороны, пучок фотонов, рассеивающихся на частице, действует на нее с силой по направлению падения лазерного пучка F_{scat} .

Равновесное положение частицы, определяемое балансом этих двух сил, находится в центре пучка в плоскости, перпендикулярной лазерному лучу, немного дальше фокуса по направлению падения луча (рис.2, слева).

При небольших смещениях частицы относительно ее равновесного состояния на нее действует возвращающая сила, пропорциональная смещению. Значит, в первом приближении можно считать частицу гармоническим осциллятором, поведение которого задается законом Гука [9] (рис.2, справа). Современные установки включают один или несколько лазеров и акустооптические преобразователи, позволяющие создавать

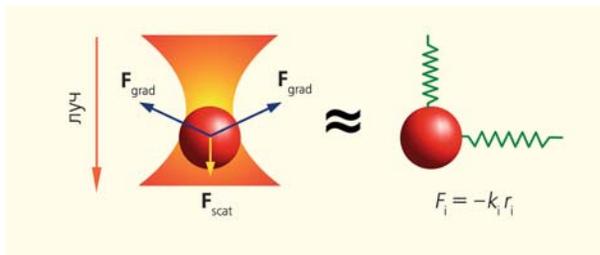


Рис.2. Броуновская частица, заключенная в лазерную ловушку. Луч лазера, падающий на частицу, благодаря отражению и преломлению порождает разнонаправленные силы. Под их действием частица ведет себя подобно гармоническому осциллятору и может быть описана законом Гука.

стационарные и подвижные ловушки и манипулировать одновременно несколькими объектами. Более того, ловушка дает возможность следить за частицей в трех измерениях с точностью до нанометра в пространстве и микросекунды во времени [10]. Но как эта оптическая тюрьма может помочь разобраться с памятью жидкости?

Чтобы описать в первом приближении движение броуновской частицы в лазерной ловушке, необходимо добавить к уравнению Ланжевена (1) закон Гука. Тогда, по-прежнему в одном измерении, будем иметь

$$M d^2x/dt^2 = -\gamma dx/dt - kx(t) + \Gamma(t), \quad (2)$$

где k — упругость ловушки, которая связана с мощностью лазера. Это уравнение представляет так называемый процесс Орнштейна—Уленбека. Если рассмотреть его фурье-образ, то в пределе низких частот (т.е. больших времен) схематично можно записать

$$|\tilde{\Gamma}(\omega)|^2 = k^2 |\tilde{x}(\omega)|^2. \quad (3)$$

Таким образом, в этом пределе спектральная плотность смещений частицы прямо пропорциональна спектральной плотности теплового шума, который ею движет.

Итак, картина начинает проясняться. Поместим броуновскую частицу в очень сильную оптическую ловушку и будем измерять с высочайшим разрешением ее координаты как функцию времени. Квадрат фурье-преобразования этих данных на низких частотах даст нам спектральную плотность шума. Так можно проверить верность предположения, что он является белым гауссовым, и тем самым установить пределы применимости теории диффузии Эйнштейна.

Но не каждая ловушка открывает доступ к информации о гидродинамических эффектах. Как было показано [8], необходимо подобрать параметры системы так, чтобы уравнивать два характерных времени. С одной стороны, это характерное время формирования упоминавшегося на рис.1 вязкого вихря $\tau_v = R^2 \rho / \eta$ (здесь R — радиус частицы, а ρ и η — плотность и вязкость жидкости). С другой стороны, это характерное время оптической ловушки, т.е. время, через которое частица начинает ощущать ограничивающее действие лазера, $\tau_k = \gamma / k$, см. рис.2. Чем ближе соотношение этих времен к единице, тем выше чувствительность системы к влиянию вязких эффектов на движение броуновской частицы.

Если допустить, что действительно реализуется процесс Орнштейна—Уленбека (2) с белым шумом, спектральная плотность колебаний частицы должна выглядеть, как на рис.3. Ее постоянство на низких частотах (длинных временных отрезках, когда можно пренебречь как инерционностью частицы, так и вязким трением) отражает предположение о постоянстве спектральной плотности теплового шума.

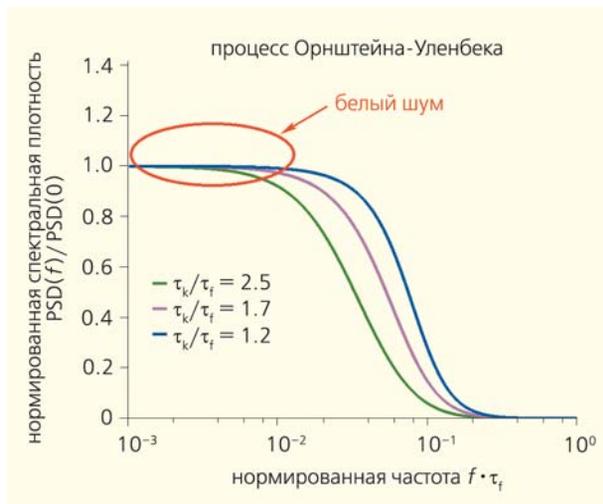


Рис.3. Спектральная плотность колебаний броуновской частицы в сильной лазерной ловушке, вычисленная в предположении верности теории диффузии Эйнштейна на сколько угодно коротких временных отрезках. Постоянство спектральной плотности на низких частотах соответствует случаю белого теплового шума.

О пользе памяти

Для проверки гипотезы белого шума были задействованы:

- аналитические теоретические вычисления, основанные на обобщенном уравнении Ланжевена, т.е. уравнении, в котором коэффициент вязкого трения не есть величина постоянная, а зависит от времени, учитывая гидродинамические явления в жидкости [11];

- численное компьютерное моделирование методом динамики многочастичных столкновений (multiparticle collision dynamics, MPC), который правильно описывает тепловые колебания, гидродинамические взаимодействия [12] и даже нарушения второго закона термодинамики в мезоскопических системах [4];

- эксперименты с использованием сильных оптических ловушек (с максимальной интенсивностью лазерного излучения в 500 мВт на длине волны 1064 нм), в которые заключались частицы из меламиновой резины размером порядка микрометра, погруженные в ацетон [13].

Столь экзотический выбор материалов объясняется упомянутой выше необходимостью сравнить характерное время вязкого вихря, которое определяется размером частицы и вязкостью среды, и характерное время ловушки, которое задается ее мощностью. Поскольку мощный лазер вызывает ряд нежелательных эффектов — таких, как нагрев взвешенной частицы и среды, — необходимо было использовать среду с невысокой вязкостью и частицу с плотностью, равной плотности среды, но с существенно иным показателем преломления света — для того, чтобы ловушка эту частицу удерживала.

Результаты этих исследований [13] убедительно показали, что гидродинамические корреляции в жидкости окрашивают спектр колебаний броуновской частицы в условный синий цвет, т.е., в отличие от предсказаний модели Орнштейна—Уленбека, спектральная плотность смещений частицы на низких частотах не постоянна, а имеет резонансную частоту. Сравнение соответствующих результатов компьютерной модели с теоретическими расчетами показано на рис.4. Ввиду

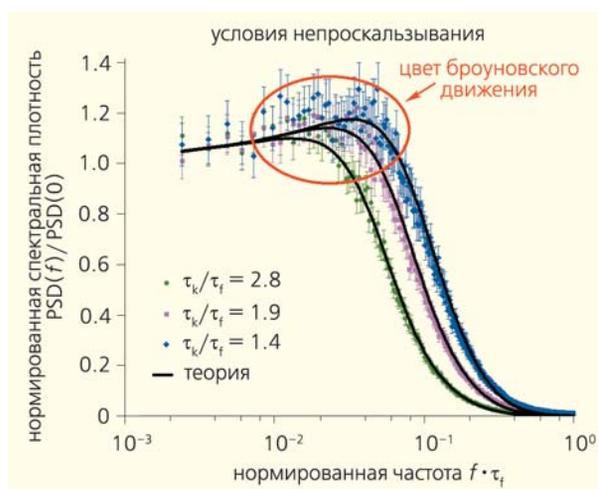
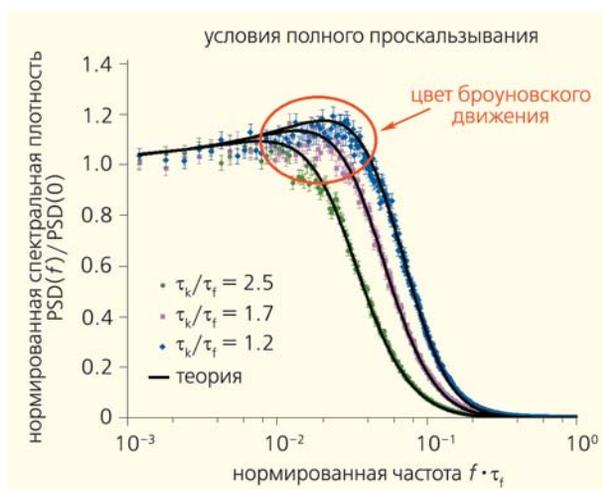


Рис.4. Спектральная плотность колебаний броуновской частицы в лазерных ловушках разной мощности, наблюдаемая в компьютерной модели. Чем ближе соотношение характерного времени ловушки τ_k и характерного времени вязкого вихря τ_v к единице, тем больше чувствительность к гидродинамическим явлениям. Для полноты рассмотрено два граничных условия между взвешенной частицей и жидкостью: условия полного проскальзывания, когда отсутствует обмен тангенциальной составляющей импульса на поверхности частицы между частицей и жидкостью (слева), и условия непроскальзывания жидкости (справа).

важности граничных условий между жидкостью и броуновской частицей [14] окрашивание броуновского движения было продемонстрировано как в условиях полного проскальзывания жидкости (рис.4, слева), так и в более привычных условиях полного непроскальзывания (рис.4, справа). Согласие экспериментальных данных с расчетами детально отражено в исходной работе [13].

Пожалуй, одно из наиболее интригующих свойств цвета (резонанса в спектральной плотности колебаний) — это его чувствительность к размеру броуновской частицы, а также к вязкости и сжимаемости жидкости. Как было продемонстрировано, по смещению положения резонанса и изменению его амплитуды можно с высокой точностью определять изменения в этих параметрах [13].

Оптические ловушки открывают доступ не только к информации о влиянии вязких вихрей на динамику частицы. Когда частица приближается к препятствию — такому, например, как плоская стена, — характер гидродинамической отдачи жидкости меняется, что дает возможность судить о расстоянии до препятствия [15]. А если подогнать определенным образом характерное баллистическое время (время, в течение которого частица движется согласно исходному импульсу, $\tau_b = M/\gamma$),

то появляется чувствительность еще и к массе частицы [16]. В последнем случае для усиления эффекта резонанс можно еще и возбудить, выбирая подходящую массу [7].

Таким образом, исследования броуновского движения в оптической ловушке открыли возможности для создания новых датчиков, аналогичных по сути сканирующему атомно-силовому микроскопу — наблюдая за влиянием гидродинамической отдачи жидкости на движение взвешенной частицы (которая играет в данном случае роль зонда), можно с высокой точностью определять изменение таких параметров, как, например, вязкость среды (вызванное, скажем, изменением температуры), или размеров частицы (вызванное, скажем, аккумуляцией какого-либо вещества на поверхности). А поскольку в лазерную ловушку можно заключать самые разнообразные объекты, вплоть до живых клеток, то потенциал этой методики очень велик.

Необходимо также отметить, что ролью звуковых волн, т.е. сжимаемостью жидкости, чаще всего пренебрегают. На самом деле они такой же гидродинамический эффект, как и вязкий вихрь, и так же могут играть решающую роль в динамике частиц [17]. Их роль во многом еще только предстоит исследовать. ■

Литература

1. *Hänggi P., Marchesoni F.* Introduction: 100 years of Brownian motion // *Chaos*. 2005. V.15. P.026101.
2. *Evans D.J., Searles D.J.* The fluctuation theorem // *Adv. Phys.* 2002. V.7. P.1529—1585.
3. *Debnath J.K.G.* An introduction to dynamics of colloids // *Studies in Interface Science*. V.2 Elsevier, 1996.
4. *Belushkin M., Livi R., Foffi G.* Hydrodynamics and the fluctuation theorem // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V.106. P.210601.
5. *Zwanzig R., Bixon R.* Hydrodynamic theory of the velocity correlation function // *Phys. Rev. A*. 1970. V.2. P.2005—2012.
6. *Henderson S., Mitchell S., Bartlett P.* Propagation of hydrodynamic interactions in colloidal suspensions // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V.88. P.088302.
7. *Leonardo R.di, Ruocco G., Leach J. et al.* Parametric resonance of optically trapped aerosols // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V.99. P.010601.
8. *Berg-Sørensen K., Flyvbjerg H.* The colour of thermal noise in classical Brownian motion: a feasibility study of direct experimental observation // *N. J. Phys.* 2005. V.7. P.38.
9. *Neuman K.C., Block S.M.* Optical trapping // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. V.75. P.2787—2809.
10. *Peterman E.J.G., Dijk M.A.van, Kapitein L.C., Schmidt C.F.* Extending the bandwidth of optical-tweezers interferometry // *Rev. Sci. Instrum.* 2003. V.74. P.3246—3249.
11. *Erbas A., Podgornik R., Netz R.R.* Viscous compressible hydrodynamics at planes, spheres and cylinders with finite surface slip // *Eur. Phys. J.* 2010. V.E32. P.147—164.
12. *Gompper G., Ihle T., Kroll K., Winkler R.G.* Multi-particle collision dynamics: a particle-based mesoscale simulation approach to the hydrodynamics of complex fluids // *Adv. Polym. Sci.* 2009. V.221. P.1—87.
13. *Franosch T., Grimm M., Belushkin M. et al.* Resonances arising from hydrodynamic memory in Brownian motion // *Nature*. 2011. V.478. P.85—88.
14. *Lauga E., Brenner M., Stone H.* Microfluidics: the no-slip boundary condition // *Handbook of experimental fluid mechanics*. Springer, 2007. P.1219—1240.
15. *Jeney S., Lukic B., Kraus J.A. et al.* Anisotropic memory effects in confined colloidal diffusion // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V.100. P.240604.
16. *Huang R., Chavez I., Taute K.M. et al.* Direct observation of the full transition from ballistic to diffusive Brownian motion in a liquid // *Nature Physics*. 2011. V.7. P.576—580.
17. *Belushkin M., Winkler R.G., Foffi G.* Backtracking of colloids: a multiparticle collision dynamics simulation study // *J. Phys. Chem. B*. 2011. V.115. P.14263—14268.

Прогноз Великого Японского землетрясения

А.А.Любушин

Прогноз будущего развития любой системы — самая сложная часть научного исследования. Физика твердой Земли, а точнее, физика самой верхней и жесткой земной оболочки — литосферы — не исключение. И здесь, конечно же, на первый план выходит прогноз так называемых геокатастроф — землетрясений и вулканических извержений.

В данной статье речь пойдет только о землетрясениях, прогноз которых был и остается самой сложной, скользкой и опасной темой научных исследований в геофизике. Серьезный интерес в обществе к этой задаче возникает лишь после сейсмических катастроф с большим числом жертв. Когда же проходит совсем немного времени и другие события в политике или общественной жизни заслоняют впечатления от недавней катастрофы, проблема прогноза землетрясений уходит на задний план.

Прогноз — дело тонкое

Многие ученые избегают иметь дело с прогнозом землетрясений, потому что занятие это неблагодарное, не гарантирует положительного результата, не способствует успешной карьере. Кроме того, неясно как к нему подступиться, памятуя о многочисленных прошлых неудачных попытках предсказания катастроф. Немногие хотят быть объ-



Алексей Александрович Любушин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — анализ многомерных сигналов самых различных систем мониторинга с целью выделения скрытых и неочевидных особенностей данных, таких, например, как приближение сильных землетрясений.

ектом иронических замечаний коллег о несостоявшихся или пропущенных сейсмических событиях. Можно даже стать объектом уголовного преследования, подобно группе из семи итальянских экспертов, отменивших сейсмическую тревогу перед землетрясением 6 апреля 2009 г. в Аквиле, унесшей более 300 жизней. Проще проблему прогноза объявить некорректной, нерешаемой и поставить на ней крест, тем самым отдать ее во власть экстрасенсов, магов, шаманов.

Однако всякий раз после сейсмических событий со значительным числом жертв проблема прогноза землетрясений упрямо реанимируется. И вновь ставится вопрос: а можно ли было предсказать катастрофу? Традиционную в настоящий момент практику прогнозирования землетрясений нельзя назвать неправильной, но определенно ее можно назвать неполной.

На сегодняшний день почти все методы прогнозирования строятся на основании анализа сейсмических каталогов. Библиография по традиционным методам прогноза очень велика, дадим лишь одну ссылку, где изложены некоторые методы и приведен их обзор: [1]. С технологической точки зрения желание ограничиться лишь анализом сейсмических каталогов вполне объяснимо. Это сравнительно небольшая (!) таблица, обычно содержащая несколько десятков тысяч, редко несколько сотен тысяч событий и состоящая из минимума информации — времени, места, силы. Можно воспользоваться стандартными редакторами таблиц, куда встроены многие статистические процедуры. Основная идея традиционного прогноза вполне разумна: по статистически значимым закономерностям последовательности сейсмических событий малой и средней силы дать прогноз сильных землетрясений. Для «обучения» (настройки) метода прогнозирования необходимо наличие нескольких сильных событий в прошлом. По особенностям поведения потока слабых со-

© Любушин А.А., 2012

бытий перед прошлыми сильными событиями можно дать прогноз сильных событий в будущем. Обучение заключается в подгонке параметров метода прогноза (различных порогов для магнитуд, длин временных окон и размеров пространственного окна) таким образом, чтобы результат удовлетворял ретроспективному прогнозу прошлых событий. Обученный метод применяется уже для реального прогноза «вперед».

Очевидны недостатки такого подхода: малое число сильных событий и ненадежность регистрации слабых землетрясений в прошлом, когда сейсмические сети были менее густыми и совершенными, а отсюда малый объем информации для обучения методов и, как следствие, большая неопределенность результата прогноза. Отсутствие успехов в традиционном прогнозе привело к широкому распространению мнения о принципиальной непредсказуемости землетрясений, которое сейчас фактически, явно или неявно, утвердилось как общепринятое. Два последних мегаземлетрясения с магнитудой 9 (Суматранское 26 декабря 2004 г. и Японское 11 марта 2011 г.) традиционные методы пропустили. Это лишь укрепило убежденность мирового научного сообщества в том, что занятие прогнозом сродни изобретению вечного двигателя.

Следует сказать несколько слов о понятии «магнитуда». Сейсмологи понимают различие между магнитудой 9 и 8, но большинство людей такую разницу совершенно не чувствуют и часто путают ее со шкалой сотрясаемости грунта в баллах. Приведем формулу, связывающую энергию E (в джоулях) сейсмических волн от землетрясения и ее магнитуду M : $\lg(E) = 4.8 + 1.5 M$. Таким образом, увеличение магнитуды на единицу означает увеличение энергии сейсмических волн на полтора порядка, т.е. в $10\sqrt{10} \approx 31$ раз. Одно событие с $M = 9$ по энергии эквивалентно 31 событию с $M = 8$, 1000 событий с $M = 7$ и т.д.

В отдельных регионах Земли (в Калифорнии, Японии) уже несколько десятков лет существуют обширные сети сейсмических станций, позволяющие создавать очень подробные каталоги с различными магнитудами — от значительной до нулевой. Такой детальный поток событий малой силы, казалось бы, должен был снять проблему в обучении методов прогноза довольно частых землетрясений средней силы ($M = 6-7$). Однако этого не произошло. Значит, информации, содержащейся в сейсмических каталогах, недостаточно для прогнозирования, и, чтобы достичь прогресса, необходимо совершить качественный скачок в объеме анализируемых данных. Например, информация, обрабатываемая в медицине для контроля над состоянием больного и прогноза течения болезни, это сотни миллионов отсчетов от нескольких десятков датчиков с частотой дискретизации от 200 до 500 Гц (данные электроэнцефалограмм при лечении эпилепсии и прогноза припадков — своего рода «зем-

летрясений в мозге»). Другой пример — анализ и прогноз состояния финансовых рынков, где непрерывно обрабатываются временные ряды котировок десятков акций и биржевых индексов с шагом дискретизации 1 мин. При таких сравнениях объем информации сейсмических каталогов потрясаете мал и, очевидно, не может быть основой для успешного прогноза. Возникает естественная идея: необходимо перейти от анализа потоков событий (каталогов) к совместному анализу многомерных временных рядов, получаемых от большого числа наблюдательных станций геофизического мониторинга, покрывающих сейсмически опасную территорию.

Дрожь Земли, шумы и сигналы

Развитие наблюдательной сейсмологии привело к возникновению в конце 1990-х годов уникального инструмента получения информации о процессах в Земле — глобальной сети сейсмических станций IRIS. Данные непрерывных наблюдений на стандартной аппаратуре от различных национальных сетей собираются в одну базу данных в Вашингтоне. Они могут быть заказаны и скачены по Интернету любым желающим*. Общее число станций, с которых могут быть получены сведения со всего мира, очень велико (порядка 1000), но не все они дают информацию в частотном диапазоне, наиболее перспективном для задач прогноза. Наибольший интерес представляют широкополосные станции. На них рабочий диапазон фактически доходит до частот приливных деформаций земной коры. Для целей прогноза (как показал опыт использования сейсмических записей) наиболее перспективен период от 2 до 500 мин. Этот частотный диапазон служит границей между сейсмологией и гравиметрией. Он малоизучен. Колебания в нем в силу больших (по сейсмологическим меркам) периодов представляют собой своего рода глобальную «дрожь» Земли. Такие низкочастотные микросейсмические колебания, несмотря на то, что их основная энергия обусловлена процессами, происходящими в атмосфере и океане (вариациями атмосферного давления и воздействием океанических волн на берег и шельф), содержат важную информацию о процессах в земной коре. Связь низкочастотных микросейсм с атмосферными и океаническими процессами хорошо изучена [2]. Фактически земная кора — среда распространения энергии от атмосферных и океанических процессов. Поскольку передаточные свойства коры зависят от ее состояния, можно ожидать, что статистические свойства микросейсмических колебаний отражают изменения свойств литосферы при подготовке крупных землетрясений.

* <http://www.iris.edu/forms/webrequest.htm>.

На данный момент 226 широкополосных станций объединены в группу GSN (Global Seismic Network)*. Однако многие из них задействованы совсем недавно, в 2007—2008 гг. Количество станций, работающих стабильно и введенных не позднее 2005 г., постепенно растет от 60 в начале 1996 г. до 148 в настоящее время. Несмотря на это, глобальная система наблюдений IRIS характеризуется большими средними расстояниями между станциями и содержит много «прогалин», не заполненных пунктами наблюдений.

Любая прогностическая сеть мониторинга характеризуется двумя пространственными параметрами: характерным линейным размером всей сети (максимальный масштаб) и средним расстоянием между станциями (минимальный масштаб). Первый параметр определяет максимальную магнитуду землетрясения, которое можно надеяться предсказать, используя полученную информацию. Вторым параметром характеризует минимальную магнитуду, начиная с которой можно пытаться прогнозировать событие. Используя корреляционные соотношения между размером очага и магнитудой [1], нетрудно понять, что глобальную сеть можно использовать для прогноза землетрясений в нереальном диапазоне магнитуд — от 11 до 14.

Единственная сеть широкополосных станций, удовлетворяющая перечисленным требованиям достаточной густоты пунктов наблюдения, — сеть F-net в Японии. Она состоит из 83 станций и непрерывно функционирует начиная с 1997 г. Ее данные свободно доступны**. Размеры сети и среднее расстояние между станциями делают ее пригодными для прогноза событий с магнитудами 8—9. На рис.1 представлены положения 77 станций сети F-net (шесть станций, расположенные на небольших удаленных островах южнее 30°с.ш., исключены из рассмотрения).

На рис.2 представлены записи вертикальных сейсмических колебаний длительностью 12 сут на одной из станций сети F-net после перехода путем вычисления средних значений в последовательных временных окнах длиной 60 с от шага 1 к шагу 1 мин. На верхнем рисунке видны почти периодические изменения среднего уровня, обусловленные влиянием солнечно-лунных приливных деформаций (сумма нескольких гармонических колебаний с периодами, близкими к 12 и 24 ч). Такие приливные вариации легко оцениваются с помощью сглаживания данных (вычисления «тренда»). Нижний рисунок содержит остаток от вычитания тренда, или «шум».

Одна из наиболее традиционных моделей временных рядов заключается в разделении наблюдений на низкочастотный сигнал и высокочастотный шум. Уже сама используемая терминология подразумевает, что последний — это нечто лиш-

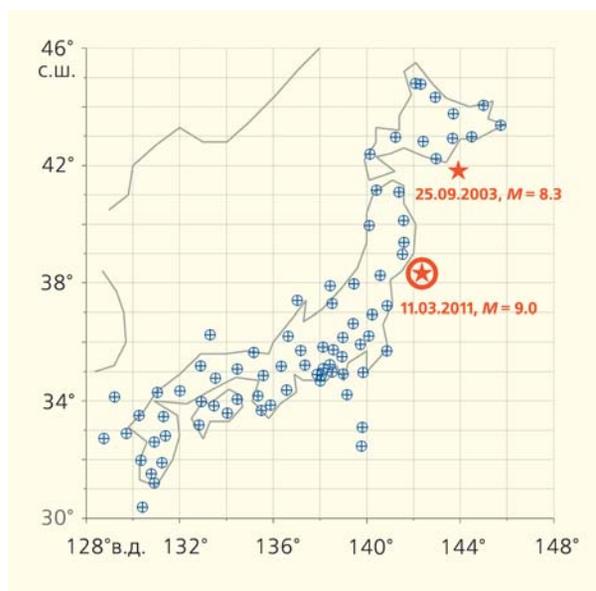


Рис.1. Положение 77 сейсмических станций сети F-net (синие кружки). Звездочками показаны гипоцентры землетрясений 25.09.2003 г. ($M = 8.3$) и 11.03.2011 г. ($M = 9.0$).

нее, типа погрешности измерений или результат воздействия различных малосущественных источников, знание которых не приносит никакой пользы. А вот сглаженная, низкочастотная составляющая измерений — именно то, что надо изучать, т.е. сигнал. В излагаемом подходе к анализу данных мониторинга эта модель в некотором смысле выворачивается наизнанку. Да, анализ гладких, или трендовых, составляющих сигналов мониторинга важен, но он, как правило, уже не

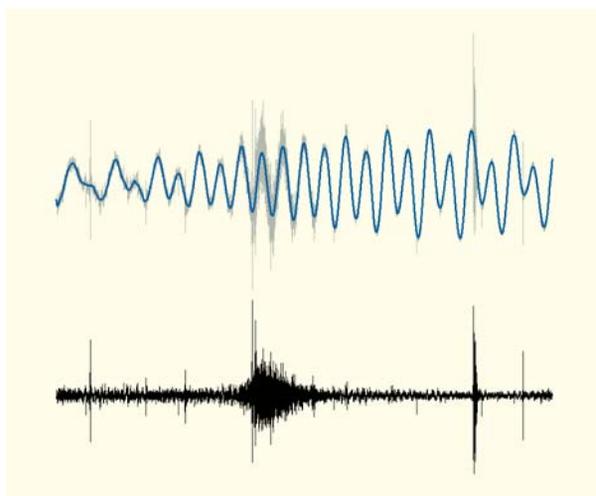


Рис.2. Фрагмент записи низкочастотных сейсмических колебаний длительностью 12 сут. Вверху приведены график исходных данных (серая линия) и гладкая составляющая сигнала — тренд (синяя линия). Внизу показан остаток после вычитания тренда — «шум».

* http://www.iris.edu/mda/_GSN

** <http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=en>

приносит никакой новой информации. Мы же предлагаем обратить внимание на высокочастотную составляющую, пренебрежимо называемую «шумом». Как оказалось, именно структура шума дала принципиально новую и неочевидную (скрытую) информацию. Иными словами, именно шум оказался сигналом.

Сингулярности случайных колебаний

Совокупное воздействие атмосферных и океанических процессов, приливных деформаций земной коры, глобального сейсмического процесса, а также трудно идентифицируемых и малоизученных процессов в земной коре, связанных с накоплением и медленной диссипацией тектонической энергии в литосфере (так называемых тихих или медленных землетрясений) приводит к формированию случайного процесса. Для его исследования традиционный аппарат спектрального анализа оказывается малоэффективным.

При расшифровке структуры сейсмического шума применяется так называемый мультифрактальный анализ. Этот метод с начала 1990-х годов используется в физике турбулентности, при рассмотрении финансовых и медицинских временных рядов, но пока еще не вошел в обязательный инструментарий специалистов по прикладной математике или изучению сигналов. В данной статье нет никакой возможности дать строгое определение понятий фракталов и мультифракталов, и для подробного ознакомления с ними отошлем читателя к монографии Е.Федера [3].

Для наших же целей достаточно будет ограничиться кратким качественным описанием мультифрактального анализа применительно к случайным сигналам, зависящим лишь от одной переменной — времени. К сожалению, совсем обойтись без математических обозначений для того, чтобы объяснить смысл спектра сингулярности, невозможно. Суть мультифрактального спектра сингулярности для нашего частного случая представлена на рис.3.

Рассмотрим некоторое случайное колебание на интервале времени $[t - \delta/2, t + \delta/2]$ длиной δ , с центром во временной точке t , и размах $\mu(t, \delta)$ случайного колебания на данном интервале, т.е. разницу между максимальным и минимальным значениями (левая часть рис.3). Если устремить $\delta \rightarrow 0$, то $\mu(t, \delta)$ будет также стремиться к нулю, но здесь важна скорость убывания. Если скорость определяется законом $\delta^{b(t)}$: $\mu(t, \delta)_{\delta \rightarrow 0} \sim \delta^{b(t)}$ или если существует предел

$$b(t) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log(\mu(t, \delta))}{\log(\delta)},$$

то величина $b(t)$ называется экспонентой Гельдера—Липшица.

Если величина $b(t)$ не зависит от момента времени t : $b(t) = \text{const} = H$, то случайное колебание $X(t)$ называется монофрактальным, а величина H — постоянной (или экспонентой) Херста, по имени британского гидролога, введшего этот параметр (но совершенно другим способом) при изучении режима разлива Нила [3]. Это один из парадоксов истории науки. Благодаря своей по-

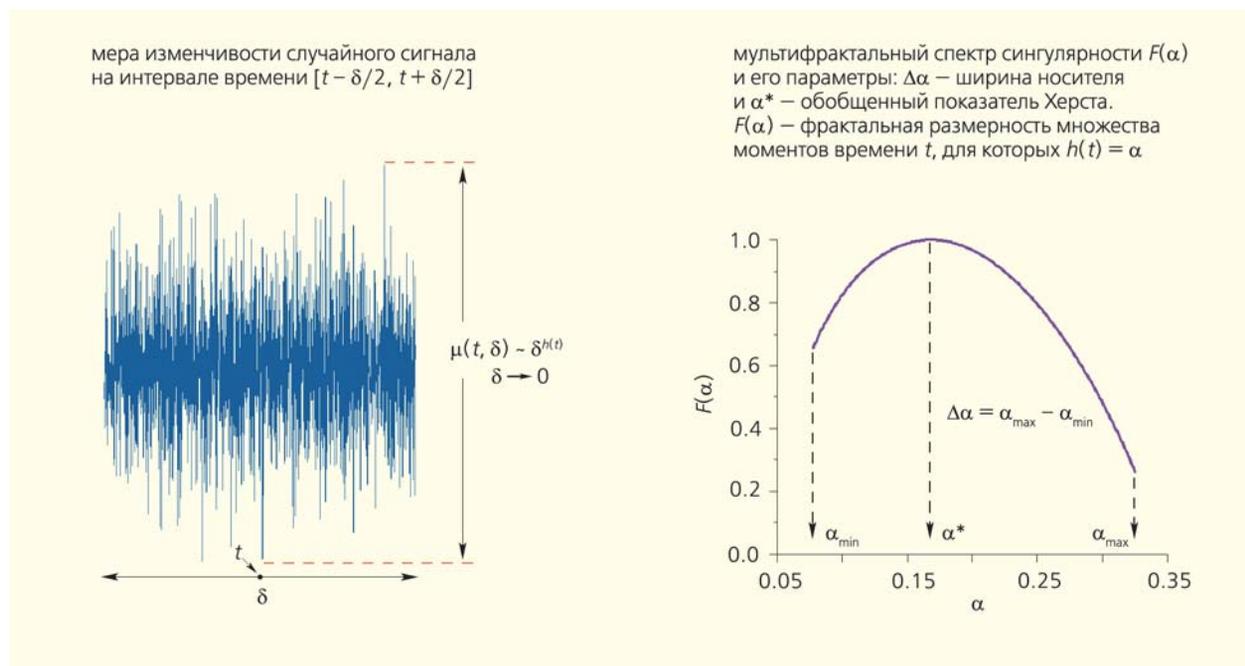


Рис.3. Иллюстрации к понятию мультифрактального спектра сингулярности.

трясающей интуиции Г.Е.Херст, будучи совершенно не математиком, своими работами по гидрологии, сам того не подозревая, фактически открыл новую область в математике и математической статистике — фрактальный анализ.

Если экспоненты Гельдера—Липшица существенно различаются для разных моментов времени, то случайное колебание называется мультифракталом и для него можно определить понятие спектра сингулярности $F(\alpha)$ (правая часть рис.3). Мысленно выделим множество $C(\alpha)$ таких моментов времени t , которые имеют одно и то же значение α экспоненты Гельдера—Липшица: $b(t) = \alpha$. Множества $C(\alpha)$ существуют (содержат какие-то элементы) не для всех значений α , т.е. существуют некоторые α_{\min} и α_{\max} , и лишь для $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$ множества $C(\alpha)$ будут непустыми. Для каждого значения α в интервале между минимальным и максимальным значениями множества $C(\alpha)$ состоит из точек, довольно причудливо разбросанных по временной оси. Размерность временной оси, которую в данном случае можно назвать множеством, вмещающим в себя множества $C(\alpha)$, равна 1. Но размерность множеств $C(\alpha)$ меньше единицы — они фрактальны.

Основные качества визуального восприятия фрактальных множеств, или просто фракталов, — именно их причудливость, независимость от масштаба (любая малая часть фрактала при соответствующем увеличении неотличима от любой большей части), внешняя хаотичность. За последней на самом деле могут быть скрыты вполне регулярные внутренние правила, порождающие элементы этих множеств. Размерность фракталов, которая обычно представляет собой дробное число, меньшее, чем целочисленная размерность (1, 2, 3) вмещающего множества, также называется фрактальной. По традиции, изложение понятия фрактала начинается с выяснения вопроса, какова длина береговой линии Норвегии, которая, как известно, чрезвычайно извилиста и испещрена фьордами различной длины. Она имеет размерность 1.52 [3], что больше 1 (размерности прямой линии) и меньше 2 (размерности вмещающего множества — двухмерной плоскости). Возвращаясь к случайным колебаниям, зависящим от одномерного аргумента t , можно дать определение мультифрактального спектра сингулярности $F(\alpha)$ — это фрактальная размерность множества точек $C(\alpha)$. Таким образом, мультифрактал — обобщение фрактального множества на случай, когда фрактальных размерностей много. Причем части мультифрактала, имеющие одну и ту же фрактальную размерность (в нашем случае один) и тот же показатель Гельдера—Липшица), сильно перемешаны друг с другом.

На правой части рис.3 представлен график оценки спектра сингулярности вертикальных сейсмических колебаний на одной из станций сети F-net на временном интервале длиной 1 сут (1440 мин). Разумеется, приведенное выше качест-

венное определение спектра сингулярности для сигналов не может быть руководством к действию для его вычисления по данным наблюдений. При вычислении функции $F(\alpha)$ используют два практических метода: предложенный в начале 1990-х метод WTMM (Wavelet Transform Modulus Maxima), основанный на оценке так называемого скелета максимумов модуля непрерывных вейвлет-преобразований [4], и более поздний метод DFA (Detrended Fluctuation Analysis), что можно перевести на русский язык как «метод анализа флуктуаций после удаления зависимых от масштаба трендов» [5]. Оба метода анализируют именно остаток после удаления тренда, или шум (рис.2). Само удаление трендов и вычисление функции $F(\alpha)$ производится разными способами. Я использовал более быстрый и устойчивый метод DFA [6—9].

Как видно из правой части рис.3, спектр сингулярности может быть охарактеризован двумя параметрами: значением $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, которое называется шириной носителя спектра сингулярности, и значением аргумента α^* , доставляющим максимум функции $F(\alpha)$. Обычно $F(\alpha^*) = 1$, т.е. значение α^* соответствует наиболее типичному показателю Гельдера—Липшица. Последний встречается настолько часто, что размерность соответствующего множества $C(\alpha^*)$ просто совпадает с размерностью вмещающего пространства (одномерной оси времени) и равна 1. Если сигнал монофрактальный, то $\Delta\alpha = 0$, а сама функция $F(\alpha)$ вырождается в точку $F(\alpha^*) = 1$. При этом $\alpha^* = H$. Поэтому α^* называется обобщенным показателем Херста. Если оценивать спектр сингулярности $F(\alpha)$ в скользящем временном окне, то эволюция его параметров $\Delta\alpha$ и α^* дает информацию об изменении структуры шума.

При анализе низкочастотных микросейсм использовались оценки параметров спектров сингулярности от каждой станции сети после перехода к шагу по времени 1 мин в последовательных непересекающихся временных окнах длиной 1 сут. Таким образом осуществлялся переход от последовательности значений сейсмического шума каждую минуту к последовательности значений свойств $\Delta\alpha$ и α^* шума каждые сутки.

Хаос или порядок — что лучше?

Греческое слово «хаос» несет в себе определенный негативный заряд и ассоциируется с нестабильностью, смутным временем, беспорядком. На самом деле хаос бывает разным, в том числе и полезным, положительным. В статистической физике и теории фазовых переходов известно, что при приближении к резкому изменению свойств системы (к фазовому переходу) происходит синхронизация поведения малых частей системы. Например, увеличивается радиус корреляции флуктуаций. Это свойство увеличения коллективной компоненты перед переходом системы

в качественно новое состояние — один из универсальных «флагов катастроф» [10]. Таким образом, увеличение порядка и уменьшение хаоса служит предвестником катастрофы, причем не только в физике, но и самых различных областях. В стабильном обществе каждый человек занимается своим родом деятельности независимо от других членов общества, и это разнообразие есть своего рода «здоровый хаос». Если же общество находится в критическом, предреволюционном, состоянии, то множество людей, раньше ведущих образ жизни, независимый друг от друга, синхронизируют свое поведение, начинают вести себя подобно друг другу. Они одновременно собираются в одном и том же месте, выходят на демонстрации, скандируют лозунги. Разнообразие мод поведения уменьшается. Одна из основных причин современного экономического кризиса в Европе — излишняя централизация управления экономической жизнью через единую валюту — евро. Происходит утеря «здорового хаоса» реальных различий между экономиками почти 20 стран, составляющих Европейский Союз, которых невозможно «стричь под одну гребенку». Поэтому синхронизация, уменьшение разнообразия, увеличение порядка может означать потерю «здорового хаоса» и быть признаком приближения катастрофы.

По своему определению мультифрактальный параметр $\Delta\alpha$ как раз и есть мера разнообразия случайного поведения сигнала. Он, грубо говоря, отражает число экспонент Гельдера—Липшица. В простом монофрактальном случайном сигнале существует только один показатель Гельдера—Липшица, он же показатель Херста. Уменьшение $\Delta\alpha$ свидетельствует о подавлении определенных степеней свободы системы, генерирующей изучаемый сигнал, и уменьшении их числа.

Одним из первых применений мультифрактального анализа были исследования ритма биения сердца — последовательности промежутков времени между максимумами сигнала кардиограмм. Оказалось, что если сердце здорово, то спектр сингулярности биений весьма широкий. Сердце обладает «здоровым хаосом». А вот если оно находится в больном состоянии, то ритм его биений упорядоченный и ширина спектра сингулярности очень мала [11]. Такой же феномен позднее был обнаружен при выявлении аномалий развития плода.

А.Н.Павлов и В.С.Анищенко исследовали уменьшение ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ (которое называли «потерей мультифрактальности») на временных рядах и на моделях синхронизации поведения связанных нелинейных осцилляторов. Они показали, что при синхронизации (за счет увеличения связи между элементами системы) происходит резкое уменьшение параметра $\Delta\alpha$ [12].

Почему же сейсмический шум, и не только он, а и случайные флуктуации любых геофизических измерений удовлетворительно описываются мо-

делью мультифрактального случайного процесса? Дело в том, что земная кора на самом деле не представляет собой сплошную среду, динамика которой полностью описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Континуальная механика удовлетворительно описывает процессы в земной коре лишь на больших пространственных масштабах, когда свойства внутренней структуры среды усредняются. При накоплении и сбросе тектонической энергии важную роль играет иерархическая и блоковая структура коры. Каждый крупный блок (например, литосферная плита) разбит на некоторое число менее крупных, а те, в свою очередь, на еще более мелкие и т.д. — вплоть до мельчайших структурных единиц типа кристаллов и песчинок. При желании иерархичность можно наблюдать, и рассматривая, например, систему прожилков на поверхности полированной мраморной плиты.

Примечательно, что в иерархии присутствует порядок: каждый блок крупного уровня состоит из примерно одного и того же числа блоков менее крупного уровня [13—14]. Таким образом, в блоковом строении земной коры наблюдается основное свойство фрактального множества — независимость структуры от масштаба (подобно тому, как ветка дерева представляет собой образ всего дерева в уменьшенном масштабе). Степень связанности между мелкими блоками непостоянна. Они консолидируются в более крупные блоки и опять распадаются на свои составляющие, причем в результате каждого такого распада выделяется некоторая величина сейсмической энергии. Однако каждый распад малого блока есть на самом деле шаг к последующей консолидации еще более крупного блока на следующем уровне иерархии. Консолидация — процесс более плотного «упаковывания» составных частей блока во время их взаимных подвижек [15].

Иерархическая самоподобная структура земной коры приводит к тому, что в каждый момент времени существует множество блоков земной коры, находящихся в той или иной степени консолидации. В зависимости от ее степени и от ранга в иерархии передаточные и резонансные свойства блоков различны. Если разнообразие велико, это означает, что не существует консолидированного блока земной коры крупного ранга, который смог бы запасти значительную энергию перед своим распадом и тем самым стать источником сильного землетрясения. Большое разнообразие размеров консолидированных блоков отражается в ширине спектра сингулярности $\Delta\alpha$ сейсмического шума, который образуется в результате прохождения сейсмических волн от атмосферных и океанических процессов через иерархическую блоковую среду.

Таким образом, сейсмический шум мультифрактален, потому что мультифрактальна иерархическая среда распространения сейсмических волн, со-

стоящая из консолидированных блоков различных рангов. Что же происходит перед сильным землетрясением? Для того чтобы такое землетрясение случилось, необходимо наличие консолидированного блока высокого ранга или большого размера. Иначе энергия будет расходоваться на множество подвижек между малыми блоками. Но существование крупного консолидированного блока означает потерю разнообразия передаточных и резонансных свойств среды. А это приводит к тому, что параметр $\Delta\alpha$ уменьшается, происходит потеря мультифрактальности. Если уменьшилось среднее значение $\Delta\alpha$, то уменьшилось и разнообразие параметров «дрожания» блоков земной коры. Произошла их консолидация во временные более крупные структуры. А синхронизация означает приближение к сильному землетрясению, поскольку консолидация блоков земной коры дает возможность накопиться тектонической энергии, которая раньше сбрасывалась при сейсмических толчках малой и средней силы при движении малых блоков.

Эта цепочка выводов применительно к данным сети F-net была сформулирована в середине 2008 г., а заключение о том, что Японские о-ва приближаются к сильному землетрясению с магнитудой более 8.3, было доложено в конце ноября того же года на конференции Азиатской сейсмологической комиссии в японском городе Цукуба [16].

Прогноз сейсмической катастрофы по мультифрактальным свойствам «шума»

11 марта 2011 г. в Японии произошло катастрофическое землетрясение магнитудой $M = 9.0$, сопровождавшееся цунами. В результате стихийного бедствия погибли и пропали без вести в общей сложности около 30 тыс. человек, стране был нанесен огромный материальный ущерб, исчисляемый примерно в 300 млрд долл. США. Воздействие волн цунами привело к крупнейшей катастрофе на атомной электростанции в Фукусиме, последствия которой теперь оцениваются как более тяжелые, нежели последствия взрыва на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Психологическое влияние атомной катастрофы на Фукусиме оказалось настолько сильным, что привело к массовому отказу от использования атомной энергии в ряде стран Европы и в самой Японии. Стихийное бедствие стало для Японии причиной крупнейшей экономической рецессии [17–18].

Великое Японское землетрясение (ВЯЗ) знаменательно и в научном плане, поскольку в данном случае был сделан заблаговременный прогноз времени и силы ожидаемой катастрофы. Он базировался на анализе данных регистрации микросейсмических шумов японской широкополосной сейсмической сетью F-net. По мере обработки вновь поступающих данных оценки становились более определенными, и в конце 2009 г. появилась

возможность оценить время возникновения сильнейшего землетрясения. В итоге был дан уточненный прогноз, обозначивший середину 2010 г. как начало периода ожидания сейсмического события магнитудой $M = 8.5–9.0$ [19–22].

После землетрясения опыт его прогноза был опубликован в научных журналах, и было показано, что использованная методика анализа свойств низкочастотных микросейсмических колебаний давала прогноз места будущей катастрофы. Однако это было сделано уже после события, ретроспективно [23].

Поскольку сеть станций F-net покрывает всю Японию (рис.1) и от каждой станции ежедневно приходят оценки параметра $\Delta\alpha$, можно построить ежедневную карту изменения этого параметра в пространстве. Чтобы получить цифровую карту, покроем прямоугольную область, включающую в себя все станции, равномерной сеткой узлов. Далее для каждого узла возьмем значение $\Delta\alpha$, равное среднему значению по заданному числу сейсмических станций, наиболее близких к рассматриваемому узлу. Представленные в статье карты получены как совокупность средних значений $\Delta\alpha$ от пяти ближайших к каждому узлу станций в узлах равномерной сетки 30×30 , покрывающей прямоугольную область с координатами от 30° до 46° с.ш. и от 128° до 146° в.д. Если усреднить ежедневные карты по всем дням внутри большого промежутка времени, то получатся усредненные карты.

На рис.4 представлена карта распределения $\Delta\alpha$ от начала функционирования системы F-net до сильного события у берегов Хоккайдо 25.09.2003 г. ($M = 8.3$), которое стало первым сильным проявлением масштабного роста дестабилизации литосферы всего Японского региона [8]. В определенном смысле это событие можно считать форшотом последовавшего затем мегаземлетрясения.

После землетрясения 2003 г. произошло хотя и небольшое, но статистически значимое уменьшение среднего значения $\Delta\alpha$, оставшееся фактически постоянным вплоть до момента ВЯЗ. Это хорошо видно при сравнении карт на рис.4,а,б. На рис.4,а область ВЯЗ отмечена существенно пониженными значениями $\Delta\alpha$, свидетельствующими о начале подготовки события задолго до 1997 г. (введения системы наблюдений F-net), что вполне естественно, поскольку время появления первых предвестников мегаземлетрясений с магнитудой 9 оценивается как 30–50 лет [1]. Примечательно, что после землетрясения 2003 г. область пониженных значений $\Delta\alpha$ распалась на две части (рис.4,б), и только северная реализовалась как область мегаземлетрясения. А каково же будущее другой, южной части?

На рис.5 показано оцененное уже после ВЯЗ распределение по пространству параметра $\Delta\alpha$ внутри четырех последовательных интервалов времени примерно одинаковой длины, которые покрывают промежуток от 12 марта 2011 г. (сле-

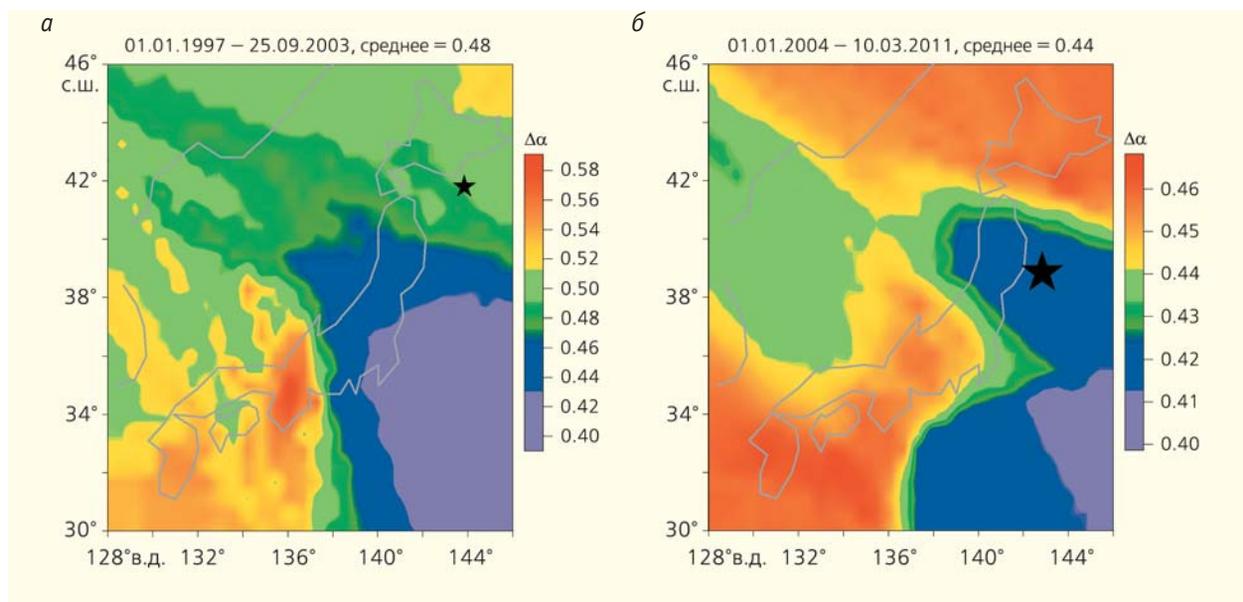


Рис.4. Усредненные карты распределения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности $\Delta\alpha$ для волновых форм низкочастотных микросейсм сети наблюдений F-net в различные промежутки времени. Звездочками показаны эпицентры катастрофических событий 25.09.2003 г. ($M = 8.3$) и 11.03.2011 г. ($M = 9.0$).

дующий день после катастрофы) до середины мая 2012 г. Для карты на рис.5,а важно отметить следующее: общий (средний) уровень значений резко увеличился (от 0.44 на рис.4,б до 0.64 на рис.5,а); область, содержащая эпицентр ВЯЗ и афтершоки, после сейсмической катастрофы характеризуется максимальными значениями $\Delta\alpha$, т.е. там произошел распад консолидированного состояния и возросло числа степеней свободы.

На следующих двух картах (рис.5,б,в) видно, что среднее значение $\Delta\alpha$ уменьшается, хотя в дальнейшем (рис.5,г) наблюдается небольшое увеличение. Важная особенность этих карт в том, что область в нижнем правом углу рассматриваемого региона существовала до катастрофы (в 1997–2010 гг.) и остается после мегаземлетрясения (11.03.2011 г.) местом относительно низких значений $\Delta\alpha$. Таким образом, следуя интерпретации ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$ как меры (силы) хаоса, делаем вывод: рассматриваемая область характеризовалась ранее и характеризуется сейчас пониженной мерой хаоса, а значит, была ранее и остается до сих пор опасной.

Можно предположить, что после события у берегов Хоккайдо 25.09.2003 г. вследствие распада некогда единой зоны пониженного хаоса (рис.4,а) на две части (рис.4,б) сложилась ситуация, когда сильное событие могло произойти как в северной, так и в южной ее половине. Под влиянием различных случайных воздействий «задействована» была только северная, а южная часть низкого хаоса осталась нетронутой. Уместно выдвинуть гипотезу, что в результате ВЯЗ была сброшена лишь половина накопленных напряжений,

а вторая половина ждет своего часа. И именно эта часть оставшегося сейсмического потенциала представляет собой большую опасность в силу своей близости к столице Японии.

Возникает резонный вопрос: насколько обосновано рассматривать карты значений $\Delta\alpha$ в широкой прямоугольной области (рис.4, 5) на основе данных, полученных на станциях, расположенных на островах вдоль ее «главной диагонали» (рис.1)? Подобного рода вопрос (или оценка надежности, вычисление ошибок и доверительных интервалов) — один из самых сложных в статистике. Конечно, было бы правильно рядом с каждой картой представить еще карту распределения стандартного отклонения (ошибки). Однако рассмотрение этих методов выходит далеко за рамки нашей статьи. Разумеется, чем дальше от пунктов измерения, тем меньше надежность значений, представленных на карте, и тем больше их ошибка. Но приходится делать выводы на основании тех данных, которые имеются в наличии, а не тех, которые должны быть в идеальной ситуации. Следует заметить, что в южной области пониженного хаоса имеются три сейсмические станции, расположенные в океане на малых островах (рис.1), и именно их данные делают выводы о низких значениях $\Delta\alpha$ в нижнем правом углу обособленными. Кроме того, при интерпретации карт (рис.4, 5) важно учитывать, что местом сильнейших цунамигенных землетрясений Японии являются именно побережье и прилегающая акватория Тихого океана (а не внутреннего Японского моря). Именно там находится океанический желоб — зона субдукции океанических плит.

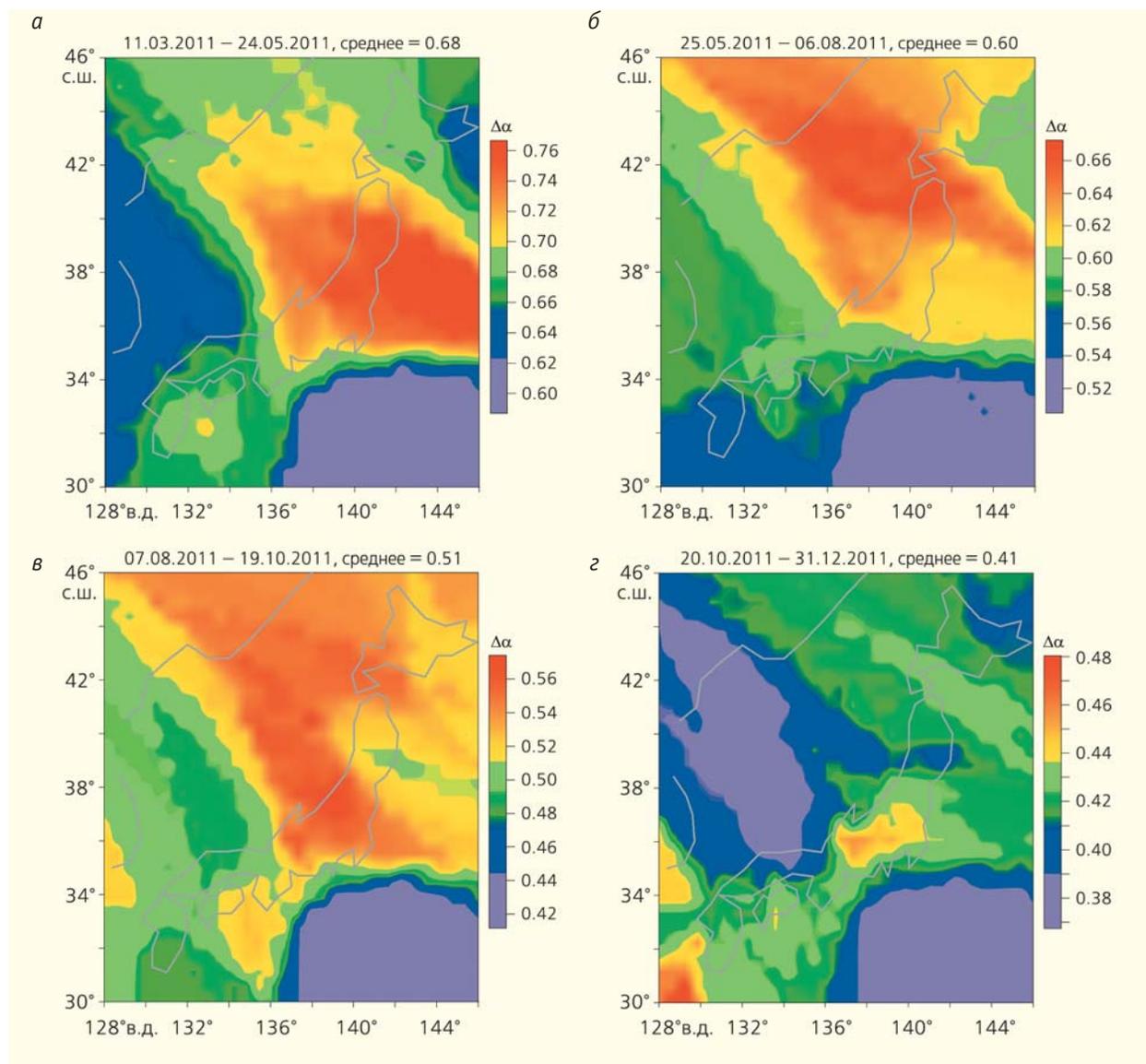


Рис.5. Усредненные карты распределения ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности $\Delta\alpha$ для волновых форм низкочастотных микросейсм сети наблюдений F-net в последовательных временных интервалах длиной 107—108 дней.

Самый сложный вопрос — время

Последовательность карт распределения $\Delta\alpha$ по пространству, полученных в скользящем временном окне (возможно, с сильным перекрытием соседних окон), служит фактически своего рода динамической оценкой сейсмической опасности (рис.5). Если сгенерировать достаточно длинную последовательность таких карт, то их можно «прокрутить» наподобие мультфильма и реконструировать возникновение, жизнь и исчезновение областей пониженного хаоса, каждая из которых свидетельствует об увеличении опасности. Если в каком-то месте возникло такое «пятно синхронизации» и оно стабильно и увеличивается по площади, то это можно рассматривать как сигнал:

опасность растет. Размер области пониженных значений $\Delta\alpha$ (пониженного хаоса) дает оценку силы готовящейся катастрофы. Но самый сложный вопрос — определение времени события.

Действительно, если критическое явление готово произойти, то толчком к нему может быть самое незначительное и случайное событие, которое сдвинет шаткое равновесие. Снежная лавина может начаться от громкого крика туриста, а Первая мировая война началась от знаменитого выстрела в Сараево. Но кто же может дать точный прогноз, когда какому-то туристу в горах захочется проверить силу своих легких и когда террорист надумает спустить курок на официальной церемонии? Однако можно утверждать, что если критическое явление готово начаться, то оно с большой вероят-

ностью дождется того или иного случая. Для сейсмического события такими факторами могут стать электромагнитная буря, тайфун, волны от удаленного землетрясения, приливные деформации земной коры [1]. Например, катастрофу на Суматре (26.12.2004 г., $M = 9$), скорее всего, спровоцировало землетрясение на о.Маккуори, к югу от Новой Зеландии (23.12.2004 г., $M = 7.9$) [24].

Трудно сказать что-то определенное относительно причины начала ВЯЗ. Однако удалось заметить одну особенность поведения мультифрактальных параметров сейсмического шума, которая, как представляется, может иметь отношение к оценке времени события. Помимо параметра $\Delta\alpha$, как уж было сказано выше, интерес представляет также параметр α^* — обобщенный показатель Херста, или наиболее часто встречающийся показатель Гельдера—Липшица, который определяет максимум спектра сингулярности $F(\alpha)$. В общем случае оба параметра, $\Delta\alpha$ и α^* , совершенно независимы. Но оказалось, что для сейсмического шума между ними есть статистическая связь (корреляция), зависящая от времени.

На рис.6 представлен график изменения коэффициента корреляции между средними (по всей сети станций) параметрами α^* и $\Delta\alpha$, вычисленного в скользящем временном окне длиной 1 год. Картина примечательна тем, что она содержит две яркие аномалии поведения коэффициента корреляции — острые минимумы в 2002 и 2009 гг. Поскольку

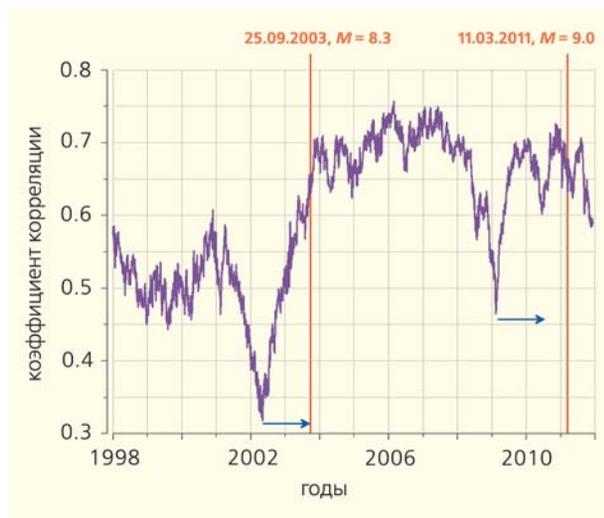


Рис.6. Изменения коэффициента корреляции между средними по всем станциям сети ежедневными значениями величин α^* и $\Delta\alpha$ в скользящем временном окне длиной 1 год в зависимости от положения правого конца временного окна. Горизонтальными стрелками выделены временные интервалы одинаковой длины от момента первого глубоко «заостренного» минимума до землетрясения 25 сентября 2003 г. и от момента второго минимума (имеющего тот же характер) до июля 2010 г., который оценивался как начало ожидания катастрофы.

ку после первой аномалии 2002 г. последовало крупное землетрясение 25 сентября 2003 г., логично предположить, что второй острый минимум коэффициента корреляции мог быть предвестником еще более сильного события, происшедшего во второй половине 2010 г. А наш график позволил уже в конце 2009 г. сделать вывод [20, 22], что начиная с середины 2010 г. следует ждать сильное (магнитудой $M = 8.5-9.0$) землетрясение на Японских о-вах. По данным, полученным после катастрофы, можно заметить третий заостренный минимум коэффициента корреляции при положении правого конца годового скользящего окна в начале 2012 г. Если исходить из анализа поведения коэффициента корреляции перед двумя предыдущими сильнейшими землетрясениями, то логично предположить еще одно мегаземлетрясение в Японии через 1.5—2.5 года после возникновения третьего заостренного минимума, т.е. во второй половине 2013 г. — первой половине 2014 г. Конечно, определение времени будущего сильного землетрясения, как уже говорилось, самый сложный вопрос в оценке сейсмической опасности и способ прогноза времени, изложенный выше, весьма дискуссионный и нуждается в дальнейшей проверке.

Вместо заключения

Какой опыт можно вынести из истории прогноза ВЯЗ? Основной недостаток представленного прогноза — то, что данный случай единичный. Мне пришлось выслушать немало ехидных замечаний, что неплохо было бы «попрогнозировать» в другом месте. Вот тогда и посмотрим, что у тебя получится, и не был ли твой удачный прогноз случайным совпадением. Следует отметить, что выше изложена лишь краткая история прогноза. Многие детали опущены просто из-за того, что их изложение требует слишком тяжеловесного статистического аппарата [9]. Однако для случайного совпадения общее число публикаций с прогнозом до землетрясения (с конца 2008 по конец 2010 г.) все-таки многовато. Кроме того, прогноз основан на использовании общих принципов. Статистика $\Delta\alpha$ ширины носителя спектра сингулярности — объективная мера синхронизации (уменьшения хаоса) перед катастрофическими явлениями.

В ответ же на пожелание проверить методику прогноза в другом регионе сразу же возникает вопрос: в каком «другом регионе»? Где есть достаточно густая сеть непрерывного мониторинга, данные которой свободно выставлены в Интернете для всех желающих? Мои попытки найти такую сеть не увенчались успехом. Как это ни печально, но даже там, где такие сведения существуют, они не предоставляются в свободное пользование владельцами сетей — либо по нежеланию давать их «чужим», либо вследствие отсутствия необходимого программного интерфейса, который позволил бы вы-

брать нужный формат от заданных станций за нужный промежуток времени (грубо говоря, данные «свалены в бесформенную кучу»). Сделать такой интерфейс сравнительно несложно, но бюрократия и лень мешают довести дело до конца. Результат есть, но большей частью «пропадает зря».

Наконец, самый последний и главный вывод: до тех пор пока не произойдет качественный скачок в увеличении объема анализируемой информации, пока не будут созданы достаточно густые сети непрерывного геофизического мониторинга, пока не будет обеспечен быстрый и простой до-

ступ к полученным данным для всех желающих (как это сделано в Японии), проблема прогноза землетрясений не сдвинется с мертвой точки. Следует подчеркнуть, что для того чтобы работать с огромным объемом данных, необходимо специализированное программное обеспечение. Широко распространенные стандартные статистические пакеты для этих целей совершенно непригодны. Относительный успех представленного прогноза в значительной мере обусловлен тем, что подобный аппарат совместного анализа временных рядов высокой размерности был уже создан [6]. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 12-05-00146.

Литература

1. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М., 2003.
2. *Rbie J., Romanowicz B.* Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // *Nature*. 2004. V.431. P.552–554.
3. *Федер Е.* Фракталы. М., 1991.
4. *Малла С.* Вэйвлеты в обработке сигналов. М., 2005.
5. *Kantelhardt J.W., Zschiegner S.A., Koncsienly-Bunde E. et al.* Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series // *Physica A*. 2002. V.316. P.87–114.
6. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М., 2007.
7. *Любушин А.А.* Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // *Физика Земли*. 2008. №4. С.17–34.
8. *Любушин А.А.* Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // *Физика Земли*. 2009. №5. С.15–28.
9. *Любушин А.А.* Сейсмическая катастрофа в Японии 11 марта 2011 года. Долгосрочный прогноз по низкочастотным микросейсмам // *Геофизические процессы и биосфера*. 2011. Т.10. №1. С.9–35.
10. *Гилмор Р.* Прикладная теория катастроф: В 2 кн. М., 1984.
11. *Ivanov P.Ch., Amaral L.A.N., Goldberger A.L. et al.* Multifractality in healthy heartbeat dynamics // *Nature*. 1999. V.399. P.461–465.
12. *Павлов А.Н., Анищенко В.С.* Мультифрактальный анализ сложных сигналов // *Успехи физических наук*. 2007. Т.177. №8. С.859–876.
13. *Садовский М.А.* О естественной кусковатости горных пород // *Докл. АН СССР*. 1979. Т.247. №4. С.829–832.
14. *Turcotte D.L.* Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. N.Y., 1997.
15. *Любушин А.А.* Модель сейсмического процесса в блоковой среде // *Современные методы интерпретации сейсмологических данных (Вычислительная сейсмология. Вып.24)*. М., 1991. С.50–61.
16. *Lyubushin A.A.* Multifractal properties of low-frequency microseismic noise in Japan, 1997–2008 // *Book of abstracts of 7th General Assembly of the Asian Seismological Commission and Japan Seismological Society. Fall meeting. Tsukuba, Japan, 24–27 Nov. 2008.* 2008. P.92.
17. *Пинегина Т.К.* Землетрясение и цунами в Японии // *Природа*. 2011. №5. С.43–51.
18. *Левин Б.В., Родкин М.В., Тихонов И.Н.* Великое Японское Землетрясение // *Природа*. 2011. №10. С.14–22.
19. *Любушин А.А.* Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // *Физика Земли*. 2010. №6. С.86–96.
20. *Любушин А.А.* Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // *Физика Земли*. 2011. №6. С.26–34.
21. *Lyubushin A.A.* Synchronization of multifractal parameters of regional and global low-frequency microseisms // *European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, 02–07 of May, 2010.* // *Geophys. Res. Abstr.* 2010.V. 12. EGU2010-696.
22. *Lyubushin A.A.* Synchronization phenomena of low-frequency microseisms // *European Seismological Commission, 32nd General Assembly, Sept. 06–10, 2010, Montpellier, France. Book of abstr. 2010. Ses. ES6. P.124.*
23. *Любушин А.А.* Анализ микросейсмического шума дал возможность оценить магнитуду, время и место сейсмической катастрофы в Японии 11 марта 2011 г. // *Наука и технологические разработки*. 2011. №1. С.3–12.
24. *Соболев Г.А., Любушин А.А.* Микросейсмические аномалии перед землетрясением 26 декабря 2004 года на Суматре // *Физика Земли*. 2007. №5. С.3–16.

Серотонин и шизофрения

В.Е.Голимбет, М.В.Алфимова

Прошло уже более 100 лет, с тех пор как шизофрения выделена в качестве самостоятельного заболевания, но ее биологическая природа до сих пор остается загадкой, хотя присущие ей нарушения в поведении, в эмоциональной, когнитивной, двигательной, поведенческой сферах хорошо известны. Как писал выдающийся польский психиатр и философ А.Кемпинский, некоторые называют шизофрению королевской болезнью не только потому, что «она часто поражает умы выдающиеся и тонкие», но и из-за невероятного богатства симптомов, позволяющего «увидеть в катастрофических масштабах все черты человеческой природы»*. Биохимические исследования показали, что в крови и биологических жидкостях у больных шизофренией изменен уровень важных для нормальной работы центральной нервной системы соединений, а также их метаболитов. Наиболее убедительные результаты получены для веществ, участвующих в передаче электрического импульса по нейронам, посредников между двумя соседними нервными клетками (их называют нейромедиаторами, или нейротрансмиттерами). К настоящему времени описано несколько десятков таких нейромедиаторов, но, видимо, только несколько из них могут иметь отношение к возникновению шизофрении.

* Кемпинский А. Психология шизофрении. СПб., 1998.



Маргарита Валентиновна Алфимова, доктор психологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории клинической генетики Научного центра психического здоровья РАМН. Автор более 80 работ, опубликованных в рецензируемых отечественных и международных журналах. Область научных интересов — поиск генных основ психической деятельности в норме и при шизофрении.



Вера Евгеньевна Голимбет, профессор, доктор биологических наук, заведующая той же лабораторией. В течение 25 лет занимается поиском генов, связанных с психологическими особенностями и такими психическими заболеваниями, как шизофрения и аффективные психозы. Автор более 80 работ, опубликованных в рецензируемых отечественных и международных журналах.

Одному из них, а именно серотонину, посвящена наша статья.

В 1948 г. Морис Раппопорт с коллегами обнаружили в сыворотке крови сосудосуживающее вещество, получившее название серотонин (serum — сыворотка, tone — тонус; химическое название — 5-гидрокситриптамин (его английская аббревиатура 5-НТТ). Несколько позже выяснилось, что это та же субстанция, которую Витторио Эрспамер нашел десятилетием ранее в эпителиальных клетках, выстилающих желудочно-кишечный тракт и заставляющих кишечник сокращаться. Это вещество он назвал энтерамином.

С тех пор накопились многочисленные данные о разнообразных и важных функциях серотонина во многих органах и тканях. Такое многообразие его действия объясняется наличием нескольких взаимодействующих серотониновых подсистем. Первая из них представлена нейронами головного мозга, расположенными в ядрах шва. Вырабатываемый этими нейронами серотонин участвует в формировании нервной системы в онтогенезе, а также во взрослом мозге, в сигнализации и настройке нейронов многих его отделов. На периферии существует относительно автоном-

ная серотониновая иннервация (снабжение нервами) пищеварительной системы. В некоторых тканях и структурах, например тромбоцитах, нет серотонинергической иннервации, зато есть «аппарат» для оборота этого медиатора. Тромбоциты захватывают и хранят серотонин в везикулах (частицах, с помощью которых осуществляется транспорт веществ), и могут высвободить его в ответ на локальные стимулы. На выброс серотонина реагирует и нейроэндокринная система, отвечая сигналами в виде гормонов (пролактина, кортикостерона, окситоцина и др.).

Серотонин участвует в различных процессах, находящихся под контролем центральной нервной системы, — в агрессии, сексуальном и пищевом поведении, а также в успешности обучения. Особенно важную роль серотонину приписывают в регуляции таких эмоциональных состояний, как депрессия и тревожность. Уменьшение его содержания отрицательно сказывается на настроении, а повышение, напротив, поднимает его. Так происходит, например, при употреблении пищи, богатой триптофаном (из этой аминокислоты синтезируется серотонин), в частности шоколада. Именно поэтому серотонин иногда называют «гормоном счастья». Неудивительно, что люди осознанно или сами того не ведая стремятся манипулировать уровнем серотонина в собственном мозге, вслепую и с плачевными последствиями употребляя такие наркотики, как экстази, кокаин или ЛСД. Психиатры давно занимаются поисками и синтезом веществ, позволяющих влиять на круговорот серотонина в терапевтических целях. Так, большую и влиятельную группу препаратов для лечения депрессии составляют избирательные ингибиторы обратного захвата серотонина. Среди них широкой публике, особенно в США, наиболее известен прозак. Этот препарат вошел в жизнь миллионов американцев

не только благодаря психотерапевтам и психиатрам (он появился на рынке в 1987 г., за пять лет его прописали 4,5 млн пациентов), но и как элемент культурной среды (вспомним, как в фильме «Анализируй меня» психотерапевты поют гимн, прославляющий прозак).

Наблюдения за содержанием меж- и внутриклеточного серотонина стимулировали появление серотониновых гипотез шизофрении. Первую из них высказали в 50-х годах XX в., когда появились данные о структуре и эффектах ЛСД. Этот галлюциноген, по строению сходный с серотонином, может связываться с рецепторами нейромедиатора, вызывая реакцию в постсинаптическом нейроне. Однако интерес к этой гипотезе о роли серотонина в механизмах развития шизофрении быстро иссяк: ЛСД вызывает зрительные галлюцинации, а для шизофрении характерны слуховые (чаще всего больные сообщают о голосах в голове, которые комментируют их действия). Изучать состояние серотонинергической системы при шизофрении вновь стали в связи с появлением антипсихотических лекарств, снижающих активность дофаминовой и серотониновой систем за счет блокирования рецепторов этих нейромедиаторов. До этого для снятия симптомов психоза использовались более избирательные блокаторы дофаминовых рецепторов.

В связи с серотониновой гипотезой было проведено множество исследований серотониновой системы при шизофрении, в том числе в ряде работ анализировали содержание серотонина в тромбоцитах больных. Тромбоциты оказались удобной моделью для изучения переноса серотонина в головном мозге, поскольку потребление ими серотонина физиологически схоже с его захватом нейронами. Выяснилось, что функциональное состояние серотонинергической системы у больных шизофренией достоверно отличается

от контроля, но границы колебаний были шире, чем при других психических заболеваниях. Кроме того, результаты разных публикаций не совпадали: в одних случаях содержание серотонина в тромбоцитах снижалось, в других — повышалось. Подобные расхождения объясняли разной клиникой болезни или спецификой используемых фармакологических средств. В то же время участки генов, кодирующих белки серотониновой системы, не рассматривали.

Восполнить этот пробел решили сотрудники двух лабораторий Научного центра психического здоровья. В лаборатории клинической биохимии исследовали состояние тромбоцитарного серотонина и особенности его связывания у больных шизофренией, а в лаборатории клинической генетики — вариации в структурной последовательности, т.е. полиморфизмы генов, связанных с серотонинергической системой. Сначала нужно было выбрать гены, оказывающие наиболее существенное влияние на состояние системы на всех этапах круговорота в организме. Серотонин образуется из аминокислоты триптофана, а затем, упакованный в везикулы, транспортируется к синапсам — структурам, которые служат для передачи сигнала от одного нейрона к другому. Из везикул серотонин высвобождается в синаптическую щель, находящуюся на стыке двух нейронов — пресинаптического и постсинаптического. Попав в постсинаптический нейрон, серотонин соединяется с рецепторами, а избыток его, оставшийся в синаптической щели, захватывается специальным белком — его так и называют: переносчик (или транспортер) серотонина — и возвращается в пресинаптический нейрон. Под воздействием фермента моноаминоксидазы (МАО) серотонин превращается в 5-гидроксииндолальдегид (рис.1).

В каждом из упомянутых этапов участвует большое число генов. Достаточно сказать, что од-

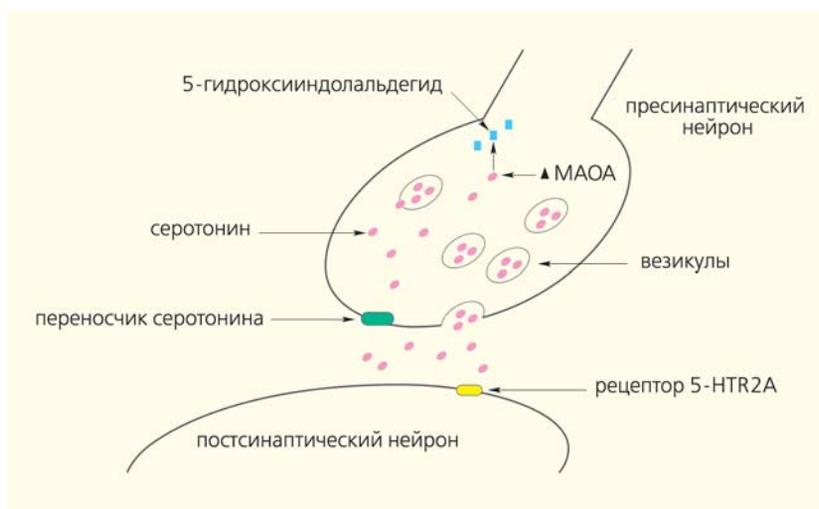


Рис.1. Транспорт серотонина в синапсе.

них серотониновых рецепторов насчитывается 15 типов, причем изменения их числа и функций специфичны для различных участков мозга и психических процессов. С учетом этого самыми важными факторами, влияющими на уровень серотонина в центральной нервной системе, можно считать обратный захват медиатора в пресинаптический нейрон и его разрушение под действием фермента MAOA.

Гены, кодирующие белок-переносчик и MAOA (одну из двух форм MAOA), пожалуй, наиболее изучены с точки зрения их роли в человеческой психике. Их полиморфизм использован для поиска ассоциации как с распространенными психическими заболеваниями (аутизмом, шизофренией, депрессией), так и с отдельными психическими особенностями (тревожностью, агрессивностью). Чаще всего это полиморфизм в области, приле-

гающей к промотору (она запускает работу гена). Этот участок гена-переносчика серотонина (его обозначают 5-HTTLPR) содержит различное число повторяющихся последовательностей (повторов) длиной 22 пары нуклеотидов каждая. У человека чаще встречаются аллели, имеющие либо 18 повторов (в этом случае вариант называют длинным аллелем), либо 16 (короткий аллель). Когда в клетки лимфоцитов вводили ДНК с разными аллелями, а затем культивировали для оценки экспрессии каждого варианта, выяснилось, что в случае короткого аллеля она была ниже на 50–80%, чем в случае длинного. В то же время высокоактивные аллели могут увеличивать способность захвата серотонина в пять раз. При пониженной активности гена меняются регуляторные ответы серотонина, что в свою очередь проявляется в поведении.

Нейротизм (невротизм) — черта личности, для которой характерны эмоциональная неустойчивость, тревога, низкое самоуважение, вегетативные расстройства.

Тревожность — склонность индивида к переживанию тревоги, характеризующаяся низким порогом возникновения реакции тревоги; один из основных параметров индивидуальных различий.

Избегание вреда — черта темперамента, выделяемая в рамках психобиологической модели С.Р.Клонинджера. Характеризует степень антиципационной тревожности, застенчивости, утомляемости, страха перед опасностью и неизвестностью.

Такую причинно-следственную связь продемонстрировали на трансгенных мышях. Если ген переносчика серотонина у них был выключен (нокаутные мыши), у мышей появлялась тревожность, в некоторых отделах мозга снижался — внеклеточная концентрация росла, а внутриклеточная уменьшалась. Наоборот, у трансгенных мышей с искусственной хромосомой, которая увеличивала экспрессию гена в два-три раза, тревога отсутствовала, связывание серотонина с белком-переносчиком увеличивалось, а его внеклеточная концентрация снижалась.

У человека полиморфизм 5-HTTLPR использовали для поиска ассоциации с так называемыми признаками тревожного ряда, а именно *нейротизмом, тревожностью, избеганием вреда*. В ряде работ у носителей короткого аллеля описанные признаки проявлялись более ярко. Методы нейровизуализации позволили буквально увидеть, что у людей с разными вариантами гена эмоциональные реакции заметно отличаются. Так, у носителей хотя бы одного короткого аллеля при эмоционально негативной информации активность миндалины (одного из участков головного мозга, связанного с обработкой такой информации) была выше. Как показали дальнейшие исследования, подобная «чувствительность» делала носителей коротких аллелей более уязвимыми к стрессорам, вызывающим депрессию, чем людей с длинными аллелями.

В гене MAOA наиболее изучен полиморфизм в области промотора, обусловленный различным числом tandemных повторов длиной в 30 пар нуклеотидов каждый (uVNTR). В популяции человека существует пять видов аллелей MAOA с числом повторов от двух до пяти (чаще встречаются аллели с тремя и четырьмя повторами). В экспериментах на различных культурах клеток выяснилось, что аллели 3.5 и 4 (их обозначают В, высокоактив-

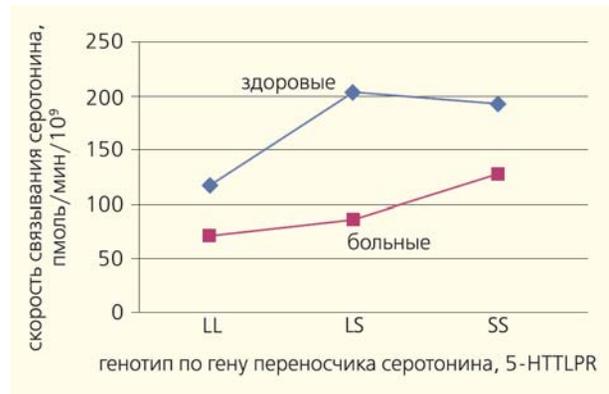
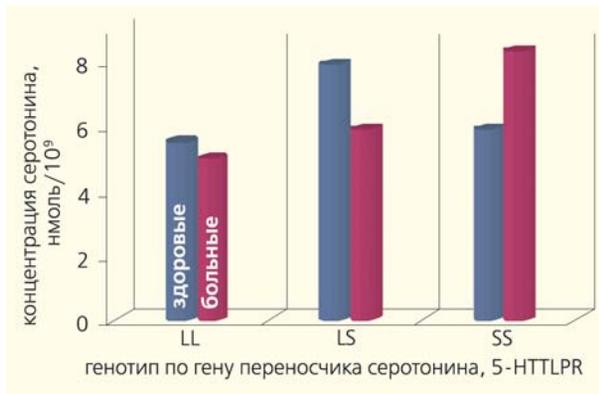


Рис.2. Вверху слева — зависимость концентрации серотонина в тромбоцитах от генотипа по гену переносчика серотонина (полиморфизм 5-HTTLPR, L — длинный аллель, S — короткий) у больных шизофренией и здоровых испытуемых; вверху справа — зависимость скорости связывания серотонина от генотипа по гену переносчика серотонина у больных и здоровых; внизу — зависимость концентрации серотонина в тромбоцитах от сочетания аллелей гена переносчика серотонина и гена MAOA (H — высокоактивный аллель, L — низкоактивный) у больных шизофренией.



ные) экспрессируются в два и более раз активнее, чем аллели 2, 3 и 5 (H, низкоактивные). Согласно многочисленным данным, этот полиморфизм влияет на степень агрессивности, определяя чувствительность человека к неблагоприятным условиям среды: повышенная агрессивность отмечена у носителей аллеля H, в детстве подвергавшихся насилию. У мышей с выключенной функцией гена MAOA (нарушена нормальная деградация серотонина) в мозге увеличивается концентрация нейромедиатора, особенно на ранних стадиях онтогенеза. Так, содержание серотонина у однодневных мышей повышалось в девять раз. Впоследствии уровни несколько нормализуются, но отклонения в поведении все равно остаются, и взрослые особи отличаются сильной агрессивией. Интересно, что у двойных нокаут-ов (по MAOA и транспортеру серотонина) высокая концентрация серотонина особенно заметна во внеклеточном простран-

стве, при этом существенно нарушается формирование в онтогенезе нормальных связей между нейронами.

Наблюдения за больными шизофренией показывают, что описанные полиморфизмы в генах транспортера серотонина и MAOA не связаны с возникновением заболевания, однако могут влиять на его клинические особенности. Так, обследовав сотни больных, мы обнаружили, что симптомы депрессии и чувство вины при шизофрении свойственны носителям короткого аллеля 5-HTTLPR (позднее это подтвердили и другие исследователи). Имеются также сообщения о более сильной эмоциональной реакции (дистрессе) таких больных на собственные галлюцинаторные голоса, хотя в целом галлюцинации скорее проявляются у пациентов с двумя длинными аллелями. А вот опасения по поводу повышения у больных риска самоубийств при коротком аллеле 5-HTTLPR или агрессии при низкоактив-

ном варианте MAOA пока не оправдались.

Мы изучали влияние полиморфизмов генов переносчика серотонина и MAOA на обратный захват серотонина и его деградацию в тромбоцитах (рис.2). В исследовании участвовало 122 человека, этнически русских жителей Москвы и Московской обл. В группу вошли 60 больных шизофренией, у которых течение болезни имело приступообразный характер (приступы, сопровождающиеся бредом, галлюцинациями). Длительность заболевания в среднем составляла шесть-семь лет. Контрольная группа включала 62 психически здорового человека. У всех участников проводился биохимический и молекулярно-генетический анализ крови из локтевой вены. Полученные для каждого испытуемого данные о содержании серотонина в тромбоцитах и максимальной скорости связывания серотонина анализировали с помощью статистической модели. Это позволяло оценить,

какие факторы (а именно пол и возраст испытуемых, наличие диагноза шизофрении и определенный генетический вариант) влияют на состояние серотонинергической системы. Оказалось, что содержание тромбоцитарного серотонина зависит только от генетического варианта переносчика серотонина.

В чем оно выражалось? У носителей одной или двух копий короткого аллеля белка-переносчика количество серотонина в тромбоцитах было выше, чем у людей с двумя длинными аллелями. Такие различия особенно заметны у больных шизофренией. Полиморфизм гена МАОА существенно не влиял на содержание серотонина. Однако при анализе комбинаций различных вариантов двух генов выяснилось, что у больных с двумя короткими аллелями белка-переносчика и низкоактивными аллелями МАОА (аллели 2 или 3) серотонина в тромбоцитах значительно больше, чем во всех остальных группах. Значит, его содержание в тканях в определенной степени находится под генетическим контролем, который прослеживается не только у психически здоровых людей, но и при психопатологических состояниях. Влияние генетического контроля сказывается и на скорости связывания серотонина (V_{max}). Причем если ее значения остаются на уровне психически здоровых людей, то в генотипе больных присутствует короткий аллель переносчика серотонина, а у носителей двух длинных аллелей она существенно снижается.

Эти результаты говорят о том, что информация о генотипе больных шизофренией мо-

жет иметь огромное значение, особенно при назначении препаратов, воздействующих на серотониновую систему. Помимо антипсихотических лекарств больные шизофренией нередко (особенно в нашей стране) получают антидепрессанты, в том числе ингибиторы обратного захвата серотонина. Более того, в ближайшем будущем их применение, возможно, расширится, поскольку добавление прозака к нейрелептикам для пациентов с плохим откликом на терапию (так называемых нонреспондеров) дало обнадеживающие результаты.

Между тем на мышиных моделях и в группах больных с расстройствами настроения установлено, что полиморфизм гена переносчика серотонина влияет на терапевтические эффекты этих препаратов, а также на вероятность возникновения побочных эффектов, таких как суицидальный риск, немотивированная жестокость и *серотониновый синдром*. Все эти осложнения очень опасны. Так, тяжесть серотонинового синдрома, который развивается при избыточном серотонине (возникает при сочетанном применении ингибиторов обратного захвата серотонина и ингибиторов МАО), может колебаться от мягкого субклинического состояния до летальных исходов. Как показывает наше исследование, в группе повышенного риска развития подобных осложнений находятся в первую очередь больные шизофренией с сочетанием коротких аллелей гена переносчика серотонина и низкоактивного аллеля МАОА, у которых концентрация серотонина в клетках крови максимальна.

Учет полиморфизма по этим генам серотонинергической системы желателен и при назначении больным шизофренией собственно антипсихотических препаратов. Установлено, что некоторые из таких лекарств снижают уровень серотонина в крови больных. Пока в качестве биохимического маркера, который поможет предсказывать ответ пациента на лечение антипсихотическими препаратами, рассматривают уровень тромбоцитарного серотонина. Однако сегодняшнее развитие науки позволяет прогнозировать реакцию на различные психоактивные средства с использованием информации о генотипах людей. Такие генетические маркеры более надежны, ведь они не зависят от многих ситуационных факторов, которые вызывают значительные колебания концентрации различных веществ в крови человека. И кровь не придется сдавать натошак!

Помимо лекарств многие из ежедневно потребляемых нами веществ обладают мощным психоактивным действием. И каждый раз реакция на них в существенной степени определяется индивидуальными особенностями человека. Так, после принятия одной и той же дозы алкоголя кто-то испытывает эйфорию, а кто-то тошноту и головокружение. Недавно австралийские ученые обнаружили, что пять выпитых чашечек кофе могут вызывать слуховые галлюцинации. В частности, в описываемом эксперименте некоторые испытуемые «слышали» вместо шума популярную мелодию. Но есть люди, у которых реакция на кофе очень слабая. Знание своих генетических особенностей поможет избежать катастрофических последствий манипулирования внутренней средой собственного организма не только при лечении, но и в повседневной жизни и не услышать музыки, которую не слышат другие. ■

Серотониновый синдром включает в себя расширение зрачков, приливы крови к лицу, потение, дрожь, миоклонические судороги, тремор, или реакции на тираминсодержащие продукты, или даже другие поведенческие нарушения токсического происхождения, наблюдаемые у индивидов, принимающих ингибиторы обратного захвата серотонина и ингибиторы МАО.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 09-04-0034.

Люминесцентные комплексы лантанидов

Ю.А.Белоусов, А.А.Дроздов

Люминесценция — свечение вещества, люминофора, после поглощения им энергии возбуждения — один из самых удивительных фотохимических эффектов, наблюдаемых человеком. Свечение люминофоров в ртутных лампах и кинескопах, светодиодные дисплеи в современных телефонах и плеерах и даже биолюминесценция планктона, морских рыб, светлячков — все это человеку хорошо знакомо. Но вот какими процессами обусловлено свечение, известно далеко не каждому. Здесь пойдет речь о физических основах люминесценции, но только одного, весьма узкого, класса материалов — комплексных соединений лантанидов. Будет рассказано также о химическом конструировании, благодаря которому можно создавать очень разные фотофизические устройства.

Коротко об известном

Источником поглощаемой люминофором энергии могут быть свет, химические реакции, электрический ток, механическое воздействие и многое другое. В зависимости от источника различают почти десяток видов свечения. Упомянем лишь фотолюминесценцию (и две ее разновидности — фосфоресценцию и флуоресценцию), хими-, электро- и триболюминесцен-



Юрий Александрович Белоусов, аспирант факультета наук о материалах Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — координационная химия лантанидов, супрамолекулярная химия, квантово-химические методы.



Андрей Анатольевич Дроздов, кандидат химических наук, доцент химического факультета того же университета. Занимается координационной химией металлов платиновой группы и лантанидов, рентгеноструктурным анализом.

цию (которую можно наблюдать, например, при растирании кристаллов очень многих соединений, в частности сахарозы). Люминесцентные материалы могут быть созданы на основе органических молекул, неорганических и комплексных соединений.

В последнем случае люминофор — это по сути супрамолекулярная система, состоящая из двух обязательных компонентов — «антенны» и «эмиттера». Работа системы сводится к следующим последовательным стадиям: поглощению энергии «антенной», передаче энергии на излучающий компонент и люминесценции «эмиттера». Антенной служит органический лиганд, в который вводят специальные хромофорные группы, а в качестве перспективных эмиттеров используют ионы лантанидов, прежде всего тербия и европия (рис.1).

С позиции квантовой механики система характеризуется набором возможных энергетических состояний, определяемых приближительными решениями уравнения Шредингера. Люминесценция в ближнем ИК-диапазоне, видимой области и в ближнем ультрафи-

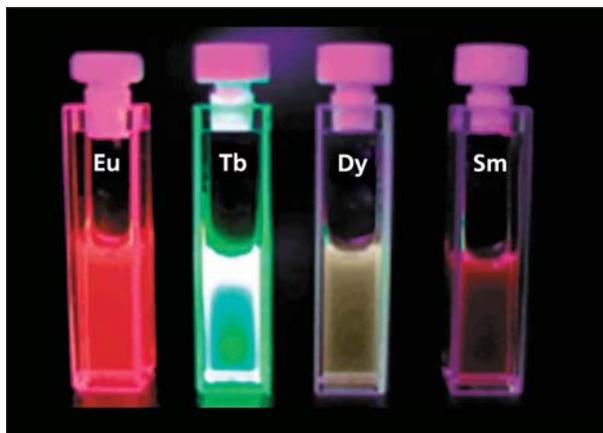


Рис.1. Растворы комплексов четырех лантанидов с наиболее выраженными люминесцентными свойствами — европия, тербия, диспрозия и самария в свете ультрафиолетовой лампы.

олете обусловлена в первую очередь изменением электронной составляющей. При поглощении энергии система переходит в возбужденное состояние, из которого может вернуться в невозбужденное различными путями:

- через безызлучательный переход;
- за счет люминесценции;
- посредством перехода в иное возбужденное состояние, лежащее ниже первого по энергии,

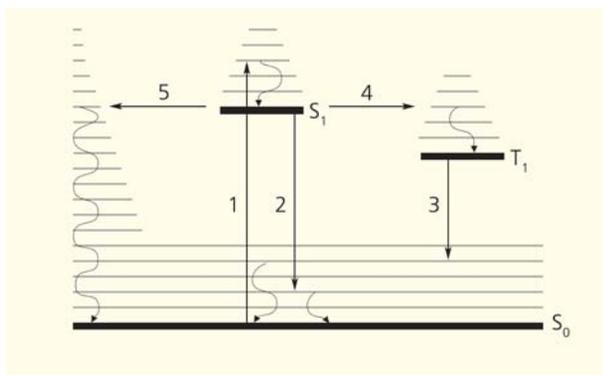


Рис.2. Схема квантовых переходов, обеспечивающих молекулярную люминесценцию. S_0 — основной электронный уровень (с колебательными подуровнями; показаны тонкими горизонтальными линиями), S_1 и T_1 — возбужденные синглетный и триплетный соответственно. Прямыми вертикальными стрелками обозначены поглощение (1) и излучательные переходы — флуоресценция (2) и фосфоресценция (3); горизонтальными стрелками — безызлучательные переходы: интеркомбинационное рассеяние (4) и внутренняя конверсия (5). Под действием кванта УФ-излучения молекула переходит из основного состояния S_0 в возбужденное синглетное состояние S_1 . Возврат из S_1 в S_0 соответствует флуоресценции. Излучение из более устойчивого во времени триплетного возбужденного состояния вызывает фосфоресценцию.

и последующего излучательного или безызлучательного перехода из него.

Обычно многоатомные системы находятся либо в синглетном (S), либо в триплетном (T) состоянии, что соответствует отсутствию или наличию одного неспаренного электрона. На основании этого, а также разделения электронной, колебательной и вращательной составляющих энергии можно построить схему квантовых переходов молекулярной люминесценции (рис.2). Среди них выделяются два типа излучательных переходов, приводящих к люминесценции: из состояния той же мультиплетности, что и основное состояние (флуоресценция) и из состояния с иной мультиплетностью (фосфоресценция).

Флуоресценция характеризуется малой длительностью (меньше 10^{-6} с), так как нет никаких причин для стабилизации возбужденного состояния. При фосфоресценции время жизни такого состояния может достигать целых секунд, что объясняется квантовым запретом на эти переходы.

Большинство органических люминесцентных материалов могут флуоресцировать, а фосфоресцируют обычно ионы (и соединения) некоторых лантанидов.

Теоретический аспект

Многие ионы лантанидов способны к люминесценции, испускание кванта света происходит при $f-f$ -переходе из возбужденного триплетного состояния в исходное синглетное. Люминесценция лантанидов характеризуется высоким временем жизни возбужденного состояния и малой шириной спектральной линии [1], т.е. высокой спектральной «чистотой» света. Именно этим обусловлен интерес к изучению люминесцентных свойств соединений лантанидов, к созданию на их основе новых материалов с заранее заданными свойствами.

Причина упомянутых особенностей лантанид-содержащих люминофоров состоит в том, что при не очень высокой энергии возбуждения (не более 5 эВ, или $40\,000\text{ см}^{-1}$, $\lambda_{\text{возб}} > 250\text{ нм}$) энергетические переходы происходят внутри f -оболочки. f -электроны экранированы $5s$ - и $5p$ -электронами, что приводит к сходству химических свойств лантанидов. Кроме того, переходы практически не влияют на геометрическое строение веществ, следовательно, не наблюдается колебательного уширения линий. Большое время жизни также обуславливает весьма малое уширение линий вследствие принципа неопределенности Гейзенберга $\Delta E \sim \hbar/\Delta t$.

Термы f -оболочек — т.е. электронные состояния ионов лантанидов, между которыми происходят переходы (в том числе люминесцентные), обозначают как $^{2S+1}L_J$, где S — полный спин, L — полный орбитальный момент электронов, а J —

полный момент атома. Подробное описание физики электронных переходов *f*-элементов можно найти, например, в классической монографии Э.Ливера [2].

Плюсы и минусы

На пути использования ионов лантанидов в качестве люминесцентных материалов возникает существенная проблема: переходы между термами *f*-оболочки запрещены правилами отбора. По этой причине ионы лантанидов имеют малые коэффициенты поглощения в видимой и ультрафиолетовой частях спектра. Распространенное решение данной проблемы — использовать комплексные соединения, в которых поглощение будет осуществляться органической частью молекулы (лигандом). Далее часть энергии передается иону лантанида, затем тот возвратится в основное энергетическое состояние — и начнется излучение (рис.3).

Данное явление, связанное с разделением люминофора на две части с разными функциями, получило название «эффект антенны». Рассмотрим диаграмму процессов, протекающих при поглощении энергии и люминесценции комплексов лантанидов [3].

Эффективность молекулярной люминесценции (для твердотельных люминофоров действуют в целом те же законы, но они требуют отдельного рассмотрения) комплексов антенна—эмиттер определяется тремя процессами:

- поглощением излучения органической частью молекулы;
- передачей энергии от лиганда к металлу;
- эффективностью люминесценции центрального иона.

Следует упомянуть и механизмы тушения люминесценции. Оно не всегда вредно. Более того, именно на основе соединений, которые могут обратимо тушить люминесценцию, удается создавать сенсорные устройства.

Тушение люминесценции может происходить:

- за счет безызлучательной дезактивации на связях ОН, NH, СН;
- через специфичный для Eu^{3+} (из-за легкости восстановления до двухвалентного состояния) механизм LMCT (Ligand to Metal Charge Transfer — перенос заряда с лиганда на металл);
- в излишне концентрированных растворах.

Безызлучательная дезактивация осуществляется через высокие колебательные уровни молекул в окружении центрального иона лантанида. Самой высокой энергией обладают ОН-колебания, поэтому тушение за их счет наиболее значительно. Это доказано на примере комплексов европия при замене внутрисферных молекул H_2O на D_2O . Такая замена приводит к возрастанию квантового выхода и увеличению времени жизни возбужденного состояния τ . Так, для Eu^{3+} $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 110$ мс, а $\tau_{\text{D}_2\text{O}} = 4000$ мс.

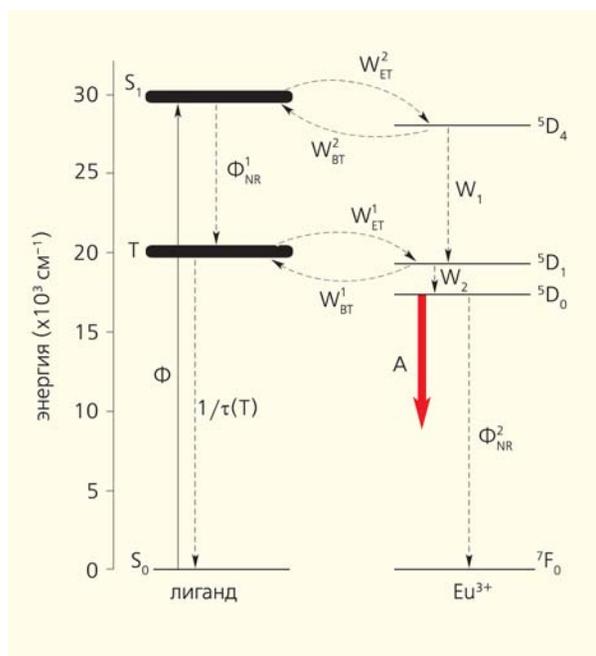


Рис.3. Схема люминесценции комплексных соединений лантанидов на примере иона европия. Поглощение энергии органической частью (лигандом) вызывает переход из основного состояния S_0 в возбужденное синглетное состояние $S_1(\Phi)$; далее могут происходить безызлучательная конверсия в триплетное состояние $T(\Phi^1)$ и передача энергии с триплетного уровня лиганда на металл и обратный процесс (W_{ET}^1 , W_{BT}^1). Ключевой процесс передачи энергии с синглетного уровня лиганда на возбужденный уровень металла и обратный процесс показаны стрелками W_{ET}^2 , W_{BT}^2 . Для различных возбужденных уровней иона металла возможны аналогичные процессы: безызлучательная конверсия с высших возбужденных уровней лантанида на излучающий (W_x), безызлучательная дезактивация лантанида за счет взаимодействия с колебательными модами молекул в ближайшем окружении Φ_{NR}^2 , излучательные переходы между термами *f*-оболочки (A) [3].

Колебательное тушение более всего эффективно для европия, поскольку относительно других лантанидов его возбужденный уровень ближе всего к энергии колебания ОН-связи. Тушение также происходит на NH- и на СН-связях. Поэтому желательно, чтобы лиганд содержал их в минимальном количестве.

Механизм LMCT состоит в дезактивации Eu^{3+} через комплекс с переносом заряда с лиганда на металл — т.е. фактически через комплексное соединение Eu^{2+} .

Люминесцентные свойства ионов лантанидов сильно зависят от симметрии координационного окружения. Особенно это характерно для европиевых соединений. В их спектрах наблюдаются как гиперчувствительный переход $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$, запрещенный в полях высокой симметрии, так и сравнительно малочувствительные к окружению цент-

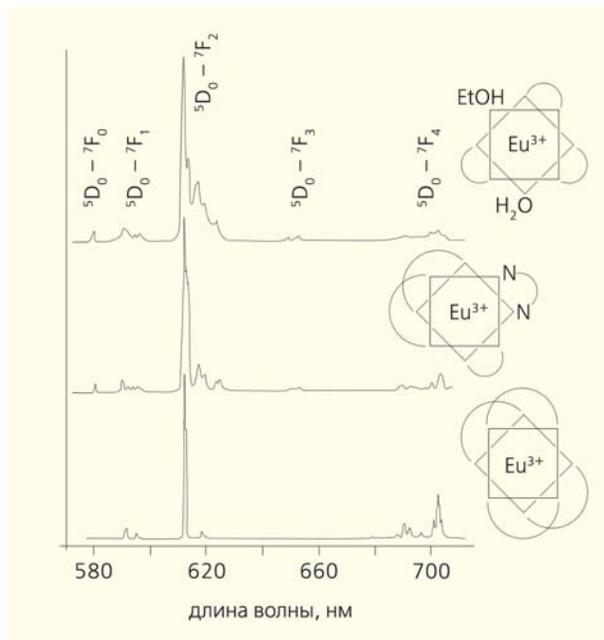


Рис.4. Люминесцентные спектры различных соединений Eu^{3+} с симметрией D_{4d} . Сверху вниз: $\text{Eu}(\text{Qcp})_3(\text{H}_2\text{O})(\text{EtOH})$, $\text{Eu}(\text{Qcp})_3(\text{phen})$, $\text{NBu}_4[\text{Eu}(\text{Qcp})_4]^-$. Справа схематично показано расположение лигандов вокруг центрального иона (полукруглыми линиями). Координирующие металл донорные атомы во всех случаях образуют квадратную антипризму [4].

рального иона переходы ${}^5D_0-{}^7F_n$, $n = 0, 1$. Из спектров люминесценции европиевых соединений часто удается определить группу симметрии ближнего координационного окружения. Для этого сравнивают интенсивности полос, соответствующих данным переходам, а также характер расщепления пиков. Проиллюстрируем высокую зависимость спектральных характеристик от симметрии данными люминесценции трех комплексов европия с анионом циклопентилзамещенного ацилпиразолона Q_{cp} (рис.4) [4].

Во всех трех случаях симметрия окружения иона — искаженная квадратная антипризма, однако степень искажения разная (см. рис.4). Наибольшая она у комплекса $\text{Eu}(\text{Q}_{\text{cp}})_3(\text{H}_2\text{O})(\text{EtOH})$, меньше у фенантролинсодержащего $\text{Eu}(\text{Q}_{\text{cp}})_3(\text{phen})$ и минимальная у комплексного аниона $[\text{Eu}(\text{Q}_{\text{cp}})_4]^-$. В результате расщепление гиперчувствительного перехода ${}^5D_0-{}^7F_2$ уменьшается, а переход ${}^5D_0-{}^7F_3$, также высокочувствительный к окружению, практически пропадает.

Рабочие устройства

Всем известно применение люминесцентных свойств лантанидов — ныне почти вышедшие из употребления телевизоры и мониторы с электронно-лучевой трубкой. В красных пикселях применя-

ют оксид иттрия (неспособный к люминесценции), содержащий немного ионов европия.

Более современная область применения — органические светоизлучающие диоды (Organic Light Emitting Diode — OLED). В этих сложных устройствах используют разнообразные комплексы лантанидов, в частности европия, самария, тербия, диспрозия и тулия. Эти соединения используются для создания центрального, светоизлучающего слоя.

Электролюминесцентные устройства изготавливаются по принципу слоеного пирога. Первый слой, анод, — это стеклянная подложка с нанесенным на нее прозрачным электродом ИТО (Indium Tin Oxide, оксидом олова с добавкой оксида индия). Второй слой — светоизлучающий. Им может быть комплекс какого-либо РЗЭ с органическим лигандом. И наконец, третий — металлический катод, обычно тонкий слой алюминия. Когда к такому устройству прилагается разность потенциалов, происходит инжекция носителей зарядов — электронов и дырок — в активный слой. В результате их рекомбинации в нем возникает электролюминесценция. Переход носителей заряда между излучающим слоем и электродом часто осложнен энергетическими барьерами. Чтобы их уменьшить, а также предотвратить сквозное протекание носителей заряда через структуру, целесообразно использовать дополнительные слои с электронной и дырочной проводимостью (рис.5).

Взаимодействие электрона и дырки (такая пара называется экситоном) приводит к испусканию кванта света.

Светоизлучающее вещество должно обладать как люминесцентными свойствами, так и электрической проводимостью, таково условие электролюминесценции.

Чтобы получить эффективное OLED-устройство, необходимо: обеспечить интенсивное свечение активного слоя, минимизировать рабочее напряжение (иначе устройство будет сильно нагреваться и разрушаться), достигнуть наиболее дли-

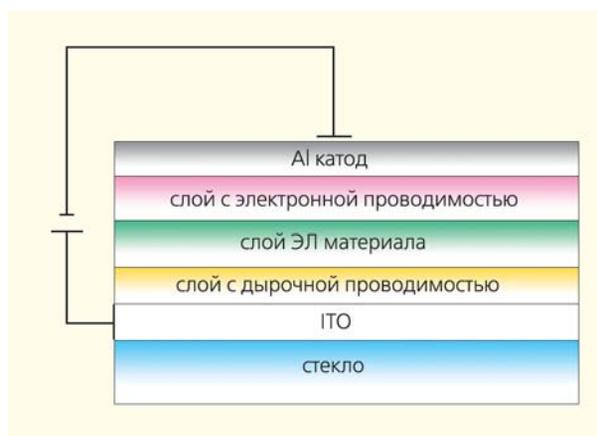


Рис.5. Многослойное OLED-устройство.

тельного времени жизни. К этим условиям следует добавить и качество покрытия. Такое требование весьма важно, так как для стабильной работы OLED-устройства нужна однородная аморфная пленка вещества активного слоя. Разрывы в ней могут привести к короткому замыканию между электродами. А если пленка неоднородна по толщине или содержит мелкие кристаллы, это вызовет нестабильность плотности тока, неравномерную светимость, локальное разложение вещества и даже отслоение электродов.

Лантанидные комплексы используют и в химических сенсорах. Среди материалов для них можно выделить соединения, люминесцентный отклик которых достигается при непосредственной координации дополнительного лиганда к центральному иону металла. Хорошо изученные комплексные соединения лантанидов с эфирами фосфорных кислот и фосфиноксидами структурно близки к известным пестицидам, токсичным газам (зарину, зоману). В работе американских химиков изучались координационные соединения европия для химических сенсоров [5]. С их помощью собирались определять продукты гидролиза токсичных газов. Комплекс с хелатирующим лигандом, содержащим винильную группу, вводили в состав полимерной матрицы и наносили на поверхность ткани. Люминесценция полученного материала усиливалась почти в два раза в присутствии продуктов гидролиза зарина и зомана. Эти молекулы замещенных эфиров различных кислот фосфора склонны обратимо координироваться к иону лантанида, замещая молекулу растворителя. Исследователи связывают появление отклика удалением воды (и, следовательно, ослаблением тушения на ОН-связях) из состава комплекса. В других случаях сенсорный эффект связан с изменением электронного строения лиганда, который может связывать ион или молекулу определяемого вещества. Применяются люминесцентные соединения лантанидов и в качестве биохимических маркеров при изучении транспорта лекарств в организме.

Синтез и конструирование

Какими же способами можно получать люминесцентные материалы и создавать разные фотофизические устройства?

Для создания материалов с заданными свойствами необходимо, чтобы синтезируемые комплексные соединения лантанидов были строго определенного геометрического строения. А это осложняется тем, что для данных ионов (в отличие от *d*-элементов) не существует предпочтительных координационных полиэдров. Это тоже связано с экранированием *f*-орбиталей, они практически не участвуют в образовании связей. Вместе с высокой плотностью заряда это делает координацион-

ные соединения лантанидов отчасти схожими с комплексами щелочноземельных металлов.

К настоящему времени исследованы многочисленные комплексы лантанидов с различными лигандами, прежде всего кислород-донорными, так как ионы РЗЭ — жесткие кислоты. Лучше других изучены карбоксилатные и β-дикетонатные комплексы, а также те, что содержат макроциклические лиганды, основания Шиффа и различные фосфиноксидные молекулы. Ароматические димины благодаря хелатному эффекту тоже образуют сравнительно прочные комплексы. Из всех перечисленных лигандов остановимся лишь на карбоксилатах и β-дикетонатах, поскольку комплексы именно с такими лигандами чаще других используются в различных фотофизических устройствах.

Карбоксилаты из-за нестабильности четырехчленного металлоцикла, как правило, способны координировать атом металла только одним атомом кислорода. Это часто приводит к образованию олигомерных и полимерных соединений, хотя известны и молекулярные комплексы. Заметим, пленки карбоксилатов удобно наносить методом реакционного осаждения, поскольку полимерные комплексы обычно нелетучи и труднорастворимы, что мешает нанесению таких пленок из газовой фазы и из раствора. Молекулярные карбоксилатные комплексы удается получить с использованием полидентатных лигандов, таких как этилендиаминтетрауксусная кислота («Трилон-Б») и другие комплексоны. Перспективны карбоновые кислоты на основе тетраазамакроциклов (рис.6). Различные заместители при четвертом атоме азота способны связывать молекулы и ионы из раствора, в результате чего изменяется электронная структура комплекса и люминесценция лантанида «включается» или «выключается».

Из-за высокой плотности заряда лантанидные комплексы с нейтральными лигандами обычно содержат неорганический анион в ближней координационной сфере. Исключение составляют

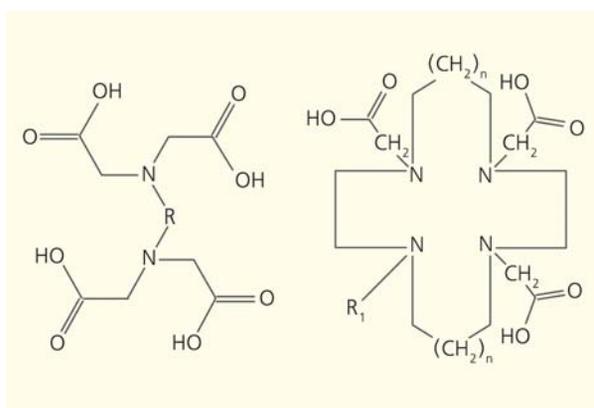


Рис.6. Ациклические и циклические комплексоны. Слева трилон Б $R = (CH_2)_2$, справа DOTA ($n = 0$, $R_1 = CH_2COOH$).

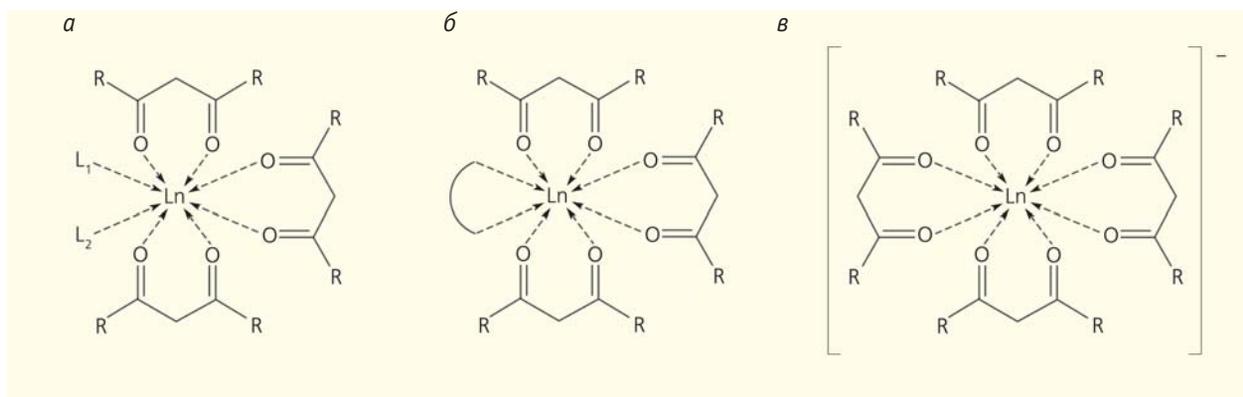


Рис.7. Строение обычных β -дикетонатных комплексов лантанидов: нейтральные комплексы с монодентатными (а) и бидентатными (б) дополнительными лигандами (обозначены полукруглой линией), комплексный анион (в).

некоторые комплексы с макроциклическими лигандами.

Теперь рассмотрим β -дикетонатные комплексы, причем не столь бегло.

β -дикетоны образуют прочные шестичленные металлоциклы, благодаря чему β -дикетонаты лантанидов обычно представляют мооядерные молекулярные комплексы. Такое строение обеспечивает способность дикетонатов РЗЭ к молекулярной сублимации в вакууме, что используется для нанесения тонких пленок.

Распространенные методы флуоресцентного определения РЗЭ основаны на применении различных дикетонатов, например ацетилацетона, теонилтрифторацетона, дибензолилметана.

β -дикетоны — лиганды средней дентатности, способные в нейтральном комплексе обеспечить центральному атому лантанида квантовое число, равное 6. Так как обычные координационные числа для этих ионов — 8 и 9, свободные позиции занимают молекулы нейтральных лигандов. Это может быть растворитель, нейтральный моно- или бидентатный лиганд. В случае избытка аниона β -дикетоната образуется высокосимметричный комплексный анион (рис.7).

β -дикетонаты редкоземельных элементов — удобные строительные блоки для создания различных олигомерных и полимерных комплексов. Распространенный класс β -дикетонатов — ацилпиразолонаты — позволяют в зависимости от топологии лиганда конструировать различные молекулярные структуры. Моноацилпиразолонаты РЗЭ чаще всего представляют собой молекулярные соединения. В них в качестве дополнительного нейтрального лиганда содержится молекула растворителя или ароматического диимина. На одном из образцов OLED, в котором люминесцентным материалом был ацилпиразолонат тербия, достигнута максимальная для комплексов РЗЭ эффективность люминесценции 11 люмен/Вт. Сделано это группой китайских химиков [6].

Высокая разветвленность некоторых ацилпиразолонатов позволяет снизить координационное число центрального иона до 7 — например, это сделано в структуре комплекса, $Tb(Q_{CP})_3(H_2O)$, синтезированного в нашей лаборатории (рис.8) [7].

Совместно с итальянскими химиками мы изучали возможность получения как мооядерных, так и полимерных комплексов тербия и европия с ацилпиразолонатами и мостиковыми лигандами вида $Ph_2P(O)(CH_2)_nP(O)Ph_2$ [8]. В результате выяснилось, что структура комплексов зависит от числа метиленовых групп в лиганде. Если такая группа одна, образуются типичные мооядерные комплексы, а при наличии двух и четырех — координационные полимеры (рис.9). Примечательно,

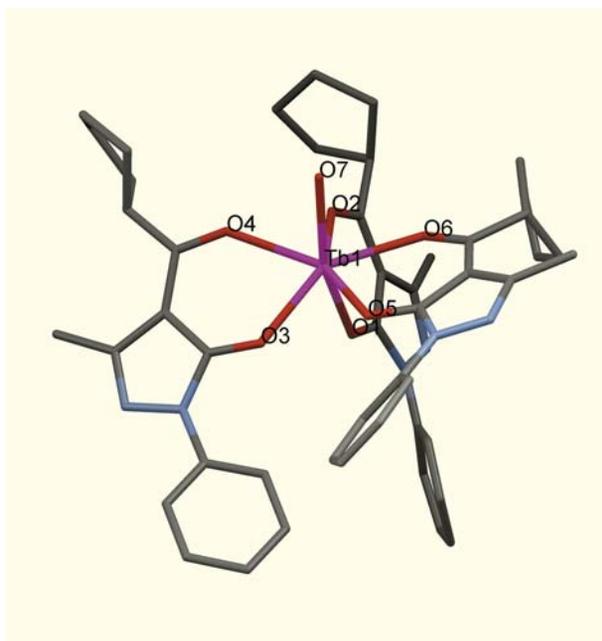


Рис.9. Кристаллическая структура гептакоординационного люминесцентного тербиевого комплекса $Tb(Q_{CP})_3(H_2O)$ [7]. Атомы водорода скрыты для наглядности.

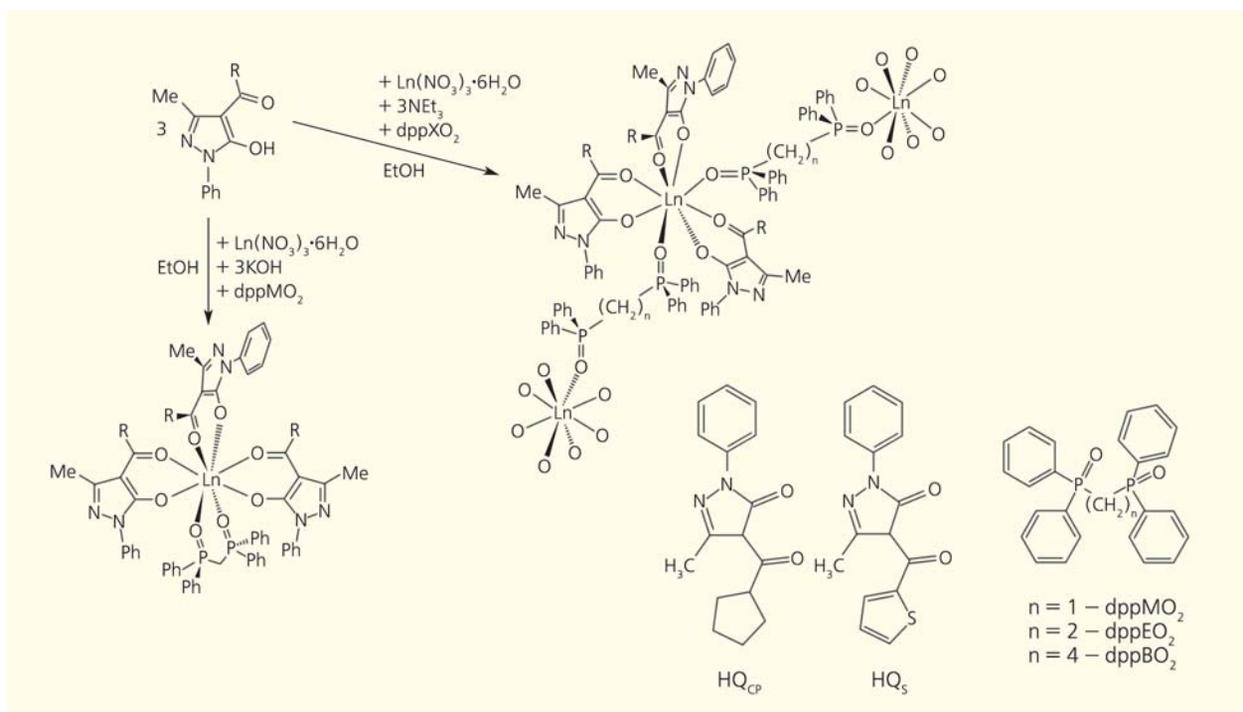


Рис.10. Моноядерные и полимерные ацилпиразолонаты редкоземельных элементов. Видно, что структура комплексов зависит от числа метиленовых звеньев (CH_2) в цепи мостикового лиганда dppXO_2 [8].

что молекулярный фрагмент $\text{Ln}(\text{Q})_3$ (Q — анион ацилпиразолоната) сохраняется и в полимерной структуре. Такие полимерные комплексы можно использовать как материал подложек в OLED-устройствах.

* * *

Сейчас химики умеют собирать из «заготовок» сложнейшие молекулы, создавать комплексы и надмолекулярные структуры. Как мы пытались

показать, варьируя строение хелатирующего и дополнительных лигандов, можно получать координационные соединения лантанидов разнообразной структуры. И это не только предмет академического интереса, но и основа для люминесцентных OLED-устройств, химических сенсоров и биологических меток. Так что издревле знакомая человеку люминесценция теперь проявляет себя в самых разных областях науки и, конечно же, в быту. ■

Литература

1. *Bünzli J.-C.G., Piguet C.* Lanthanide-containing molecular and supramolecular polymeric functional assemblies // *Chem. Rev.* 2002. V.102. P.1897—1928.
2. *Ливер Э.* Электронная спектроскопия неорганических соединений в двух частях. М., 1987.
3. *Piguet C., Bünzli J.-C.G.* Taking advantage of luminescent lanthanide ions // *Chem. Rev.* 2005. V.34. P.1048—1065.
4. *Pettinari C., Marchetti F., Cingolani A. et al.* Syntheses, structural and spectroscopic investigation (IR, NMR and luminescence) of new terbium and europium acylpyrazolonates // *Inorg. Chim. Acta.* 2004. V.357. P.4181.
5. *Jenkins A.L., Uy O., Murray G.M.* Polymer-based lanthanide luminescent sensor for detection of the hydrolysis product of the nerve agent soman in water // *Anal. Chem.* 1999. V.71. P.373—378.
6. *Xin H., Li F.Y., Shi M. et al.* Efficient electroluminescence from a new terbium complex // *J. Am. Chem. Soc.* 2003. V.125. P.7166—7167.
7. *Pettinari C., Marchetti F., Drozdov A. et al.* The role of reaction medium on the coordination environment of terbium in complexes with 4-acylpyrazol-5-ones // *Inorg. Chem. Commun.* 2003. V.6. P.1423.
8. *Marchetti F., Pettinari C., Pizzabiocca A. et al.* Syntheses, structures, and spectroscopy of mono- and polynuclear lanthanide complexes containing 4-acyl-pyrazolones and diphosphineoxide // *Inorg. Chim. Acta.* 2010. V.363. №14. P.4038—4047.

Арал умер. Да здравствует Арал!

С.К.Кривоногов

До середины XX в. Аральское море было четвертым по величине внутриконтинентальным водоемом планеты. Из-за величины и солоноватой воды его называли морем, хотя по научной классификации это озеро. Его существование в сердце среднеазиатских пустынь обусловлено тем, что в Аральскую впадину несут воду две крупные реки: Амударья и Сырдарья, берущие начало в ледниках Памира и Тянь-Шаня. На протяжении тысячелетий долины и дельты этих рек были центрами развитых цивилизаций — Хорезма, Бактрии, Ферганы, Согда. Согдиана считалась одним из четырех самых благословенных мест античного мира.

Основой жизни среднеазиатских государств всегда было орошаемое земледелие, а оно предполагало изъятие части стока рек. Таким образом, количество воды, доставлявшееся Аральскому морю, зависело не только от естественных (колебаний климата и изменения стока), но и от социальных, экономических и политических условий.

Этапами интенсивного земледелия и ирригации в Приаралье были Античность (IV в. до н.э. — IV в. н.э.), Средневековье (IX—XIV вв.) и XX в. Если в Средние века площадь орошаемых земель составляла 2,4 млн га (из которых лишь 1,4 млн га орошались постоянно), то в начале XX в. (1913 г.) она увеличилась

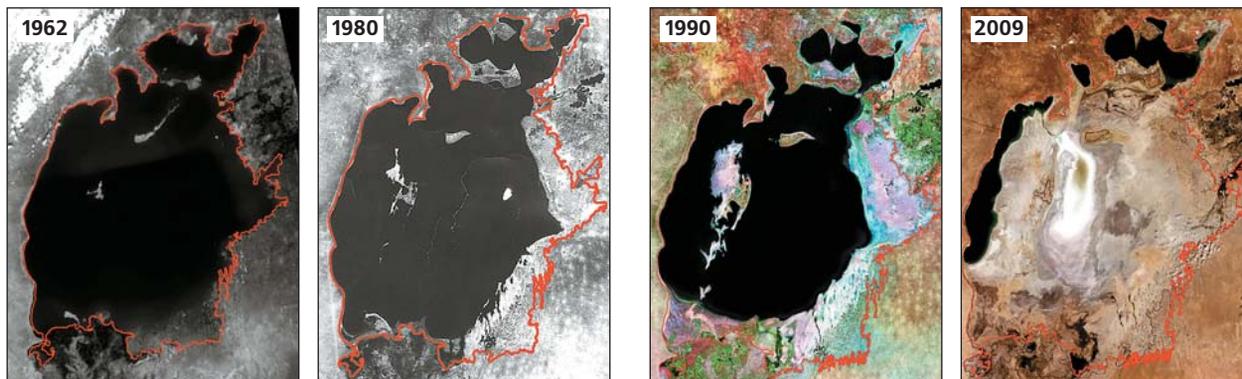


Кривоногов Сергей Константинович, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (г.Новосибирск). Область научных интересов — изменения природной среды и климата Центральной Азии в позднем плейстоцене и голоцене. Статья продолжает научно-популярную серию автора «Арал судоходный и сухопутный» (Наука из первых рук. 2009. №2) и «Море не терпит пустоты» (Государственное управление ресурсами. 2010. №5).

до 3,2 млн га, в 1965 г. составила 5,1, а в 1985 — 7 млн га. На фоне возрастающего потребления воды в 1960-х годах Аральское море прошло «точку невозврата», после чего его судьба была предопределена — оно стало неуклонно сокращаться. Сбылось предсказание А.И.Воейкова*, называвшего Аральское море бесполезным испарителем воды и настаивавшего на максимальном использовании вод Амударьи и Сырдарьи для земледелия.

Согласно расчетам, средняя величина стока этих рек — около 112 км³/год. Для поддержания стабильно высокого уровня Арала требовалось 50—60 км³/год на компенсацию испарения с поверхности озера. До 1960 г. отбор воды на все нужды региона не превышал 63 км³/год, т.е. водный баланс более или менее соблюдался. Однако в середине 1980-х суммарный водозабор уже составил 95 км³/год. Таким образом, причина исчезновения Аральского моря и современного локального социально-экологического кризиса проста — это нерациональное природопользование в условиях неумеренной экономической эксплуатации региона.

* А.И.Воейков (1842—1916) — известный русский климатолог и географ. В докладе «Реки России», сделанном на собрании Отделения физических наук Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии в 1882 г., говорил: «...низовья... рек, впадающих в Арал, настолько сухи, что существование Аральского моря в его настоящих пределах — доказательство нашей отсталости, неумения воспользоваться в достаточной мере такой массой текущей воды и плодородного ила, какие несут Аму и Сыр».



Сокращение площади Аральского моря.

Понижение уровня Арала шло с возрастающей скоростью и в 2000-х годах составило 80—90 см/год. Озеро разделилось на две (северный Малый и южный Большой Арал), а затем и на три части из-за распада Большого Арала на западный и восточный бассейны. При этом о. Возрождения, печально известный своими секретными бактериологическими лабораториями, слился с берегом. Другой знаменитый остров, Барсакельмес, государственный заповедник по разведению куланов и джейранов, также слился с сушей, после чего животные ушли и заповедник был перепрофили-

рован на изучение экстремальных процессов аридизации. В 2009 г. восточная часть Большого Арала высохла, и сейчас в ней только весной скапливаются талые воды. Сегодня от великого моря осталась узкая полоска глубоководного желоба вдоль плато Устюрт и возрождаемый человеком Малый Арал. За 50 лет площадь Аральского моря уменьшилась в восемь, а его объем — в пять раз.

Эти изменения вызвали разрушение экосистемы озера и окружающих территорий и отрицательно сказались на жизни людей. Возник дефицит пресной воды. Увеличение солености воды



По мере усыхания моря его береговая линия ежегодно отступала на километры. Всего за год до нашего посещения здесь была вода.

Здесь и далее фото автора (исключение указано со ссылкой)

(в Большом Арале она превышает 150 г/л) уничтожило почти все живое в озере. Исчезла рыба, которой здесь было 29 видов. Из 153 видов беспозвоночных осталось 10. Дегradировала растительность. Вместо высших растений в биомассе озера стали преобладать харовые и особенно зеленые водоросли — признаки химического неблагополучия. Осушенные участки дна стали источником соленой пыли (около 100 млн т/год), которая переносится ветрами на сотни километров и негативно влияет на урожаи и здоровье людей. Из-за потери доходов и безработицы снизился общий уровень жизни. Полностью ликвидированы такие важные отрасли экономики, как рыболовство, рыбопереработка и судостроение.

Знание — сила

Мониторинг аральской катастрофы, начатый советскими учеными, продолжили международные коллективы. Их усилиями на рубеже XXI в. были осознаны значение этой катастрофы и необходимость политических и экономических действий, опирающихся на научные знания. По мнению ученых, бывшее благополучие Арала недостижимо, потому что экономика Среднеазиатского региона не вернет морю отобранную у него воду. Так, в начале 2000-х годов только для стабилизации уровня Арала требовалось 35 км³/год воды, в то время как поступало в него лишь 10–15 км³/год. Даже если вернуть всю воду в реки, для наполнения Арала потребуется 200 лет. Поэтому в современных проектах его спасения речь идет лишь о минимализации последствий социально-экологической катастрофы.

Заманчиво считать состояние Арала середины XX в., когда он был большим и полным рыбы, неким «стандартом экологического благополучия». Однако накопленные к настоящему времени сведения говорят о значительных колебаниях его уровня в недавнем прошлом, вплоть до катастрофических понижений, аналогичных современному. Длительность пребывания Арала в разных состояниях обводненности до сих пор не оценена. Поэтому неясно, какое состояние для него типично: высокое, низкое или промежуточное? Ответ на этот вопрос может изменить представления политиков и «экологических инженеров» Аральского моря о том, на какой стандарт следует ориентироваться.

История Аральского моря изучается более 150 лет. После этапа первых географических описаний конца XIX — начала XX в. [1] серьезные геолого-геоморфологические исследования проводились советскими учеными в связи с раскопками Хорезмской археолого-этнографической экспедиции Академии наук и грандиозными планами СССР по развитию экономики среднеазиатских республик. В основном ученых интересовали из-

менения уровня Арала и перестройка гидросети. Результаты их работы были обобщены в книге «История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал» [2]. Оттуда они попали в международную базу данных «Lake status database for the former Soviet Union and Mongolia» (1996) и были тиражированы в ряде западных статей [3, 4]. Эти данные, по сути полученные в 1960–1970-х годах, до сих пор считаются «официальной историей» Арала и используются в глобальных и евразийских обобщениях по изменениям климата и увлажненности. Существенный толчок к изменениям взглядов на развитие Аральского моря дал международный проект INTAS 2002–2005 гг. «Holocene climatic variability and evolution of human settlement in the Aral Sea Basin» («Голоценовые изменения климата и эволюция поселений человека в бассейне Аральского моря») [5–8].

С точки зрения современной науки главный недостаток имеющихся на сегодняшний день данных — бедная возрастная модель реконструируемых событий. На ее исправление и был нацелен наш проект РФФИ-АФГИР «История Аральского моря за последние 10 000 лет: природный и антропогенный компоненты» (2008–2010) [9, 10]. Кроме автора в нем принимали участие геоархеолог Я.В.Кузьмин (ИГМ СО РАН), палеонтологи С.А.Гуськов, Л.Б.Хазин и Е.Ю.Жаков (ИНГГ СО РАН) и геохронолог Дж.Бурр (Университет Аризоны, США).



Объекты, изученные участниками проектов INTAS и РФФИ-АФГИР: 1 — колонки донных осадков, 2 — археологические памятники, 3 — средневековые русла Сырдарьи.



Бурение скважины на сухом дне Аральского моря.



Он был молод

Материалами для изучения истории Арала стали 10 скважин, пробуренные нами в экспедициях 2003, 2008 и 2009 гг. Скважины полностью вскрыли отложения Арала и проникли в подстилающие породы. Мощность озерных отложений в северной части восточного бассейна Большого Арала составила 11 м.

Возраст осадков определялся с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в лаборатории радиоуглеродного датирования Университета Аризоны. Метод AMS позволяет датировать осадки по небольшим образцам углеродсодержащего вещества — раковине моллюска, сотне створок остракод (мелких ракообразных) или раковинок фораминифер («гигантских» одноклеточных организмов). Стоит заметить, что вклад американских партнеров в проект оказался весьма значителен — с учетом того, что стоимость одного анализа в коммерческих лабораториях составляет 550–600 долл. США, а в ходе наших исследований было получено около 120 датировок. В России возможностей такого датирования пока нет (первая AMS-установка, созданная в Новосибирском научном центре, находится на этапе отладки).

Хотя геологи находят в Приаралье отложения древних озер неогенового периода возрастом в миллионы лет, современный нам Арал очень молод: радиоуглеродное датирование показало, что его возраст около 18 тыс. лет (а возраст нижележащих отложений — 24 тыс. лет). Похожий вывод был сделан Л.С.Бергом еще в начале XX в. на основе измерений количества твердого вещества, выносимого реками, и расчета скорости осадконакопления [1]. Получалось, что при неизменных условиях Аральское море заполнилось бы осадками

за 29 тыс. лет. Иными словами, можно предполагать его развитие в течение десятков тысяч лет, но отнюдь не миллионов.

Анализ условий осадконакопления позволил нам восстановить стадии трансгрессий и регрессий, высокой и низкой солености озера. Полученные данные свидетельствуют о значительных и резких изменениях уровня Арала в прошлом. В качестве маркеров уровня моря использовались песчаные слои, отражающие условия прибрежно-мелководья (кстати, изобилующие органическим материалом, пригодным для датирования). Несмотря на видимую простоту, это поистине головомольная задача, неразрешимая без радиоуглеродных дат. В отличие от предшествующих исследований, наш подход дает количественные, в метрах, характеристики прошлых уровней Арала, «нанизанные» на возрастную шкалу в годах. Эта работа еще не закончена. Тем не менее мы готовы представить публике историю Арала за последние 2 тыс. лет, обоснованную не только геологическими, но и летописными и археологическими данными.

Что говорят легенды

Согласно исследованиям российского востоковеда, историка и филолога В.В.Бартольда, первые туманные упоминания Аральского моря встречаются в трудах античных географов, а с X в. оно описывается в арабских книгах под именем Курдерское, Хорезмийское или Джендское озеро [11]. В трудах средневековых историков имеются более детальные сведения. Например, известно, что после нашествия Чингисхана, разрушившего г.Ургенч в низовьях Амударьи в 1221–1222 гг., река прорвала земляную плотину и потекла вместо

Аральского моря в сторону Каспийского. Большинство современных исследователей считают, что это могло инициировать сокращение уровня Арала. Действительно, придворный историк Тамерлана Хафизи Абу в 1417 г. записал, что теперь этого озера уже нет, а р.Джейхун (Амударья) проложила себе новое русло и изливается в Хазарское (Каспийское) море. Позднее хивинский хан Абулгази указал, что обратный поворот вод Амударьи в сторону Арала произошел за 30 лет до его рождения, т.е. около 1573 г.

К концу XVI — началу XVII в. Аральское море вновь стало полным. В «Книге Большому чертежу» (1627) — «пояснительной записке» к карте Московии примерно 1600 г. — оно названо «синим морем, по которому плыть 250 верст» [12]. Большим Арал показан на картах сибирского картографа С.У.Ремезова (1697) и А.Бековича-Черкасского, офицера Петра I (1715).

Древние поселения

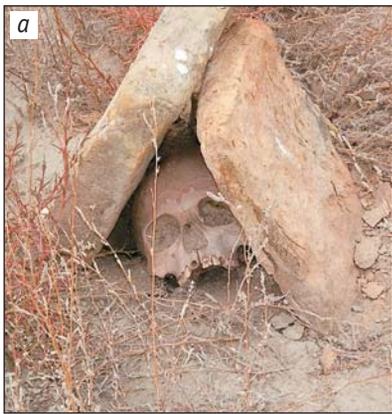
Факт исчезновения Арала в Средние века блестяще подтвердили находки древних поселений и некрополей, расположенных в 60 км от берега 1960 г. (тогда они были залиты 20-метровым слоем воды). Найденные охотниками мавзолей Кердери I и Кердери II и поселение Арал-Асар раскапывали ученые Института археологии им.А.Х.Маргулана (г.Алма-Ата) и Кызылординского государственного университета. Археологи определили их возраст — XIV в. Следовательно, примерно 600 лет назад Арал испытывал глубокую регрессию, сопоставимую с современной.

Мы посетили эти городища и определили возраст найденных там костей человека, домашних животных и фрагментов древесины. Возраст большинства находок совпал с археологическим. Однако часть из них оказалась древнее (600—1000 лет назад), что позволяет предполагать не кратковременную, а длительную регрессию. Более того, две находки (кости человека и животного) имеют совершенно другой возраст (1400—1800 лет назад), что указывает на два этапа заселения человеком дна Аральского моря и, следовательно, две средневековые регрессии, разделенные трансгрессией. Наши геологические данные по обнажениям в дельте Сырдарьи и в урочище Караумбет подтвердили высокое стояние Арала 1100—1300 лет назад.

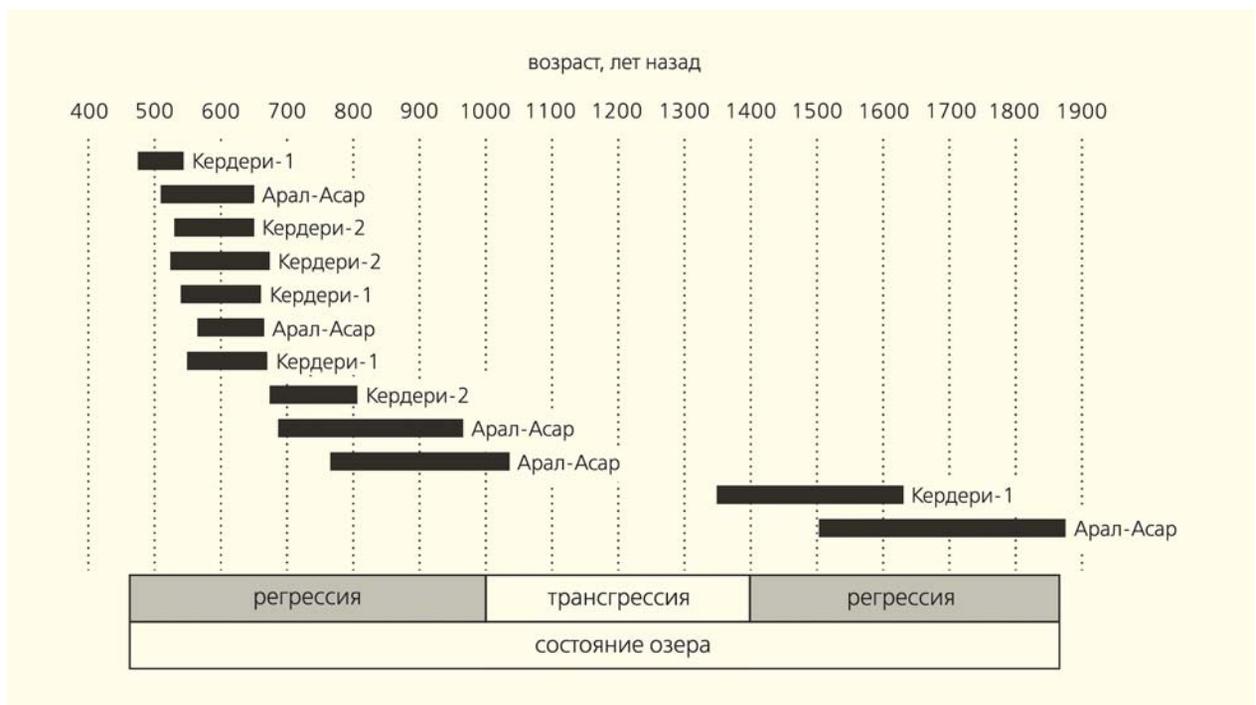
Таким образом, для последних двух тысячелетий вполне достоверно восстанавливаются две регрессии и две трансгрессии, сменявшие друг друга с периодичностью 300—500 лет. При этом регрессии были, по-видимому, продолжительнее трансгрессий. Последняя трансгрессия длительностью в 350 лет была прервана человеком в наше время. Отсюда можно сделать вывод, что Арал, испытывавший частые и глубокие колебания уровня и связанные с ними природные и социальные ка-



Мавзолей Кердери-1.



Археологические находки из мавзолея Кердери-2 (б, г) и поселения Арал-Асар. Фотографии (г, д) взяты из Интернет-газеты [13].



Результаты датирования находок из археологических памятников и реконструкция изменений уровня Аральского моря. Радиоуглеродные даты калиброваны и переведены в календарную шкалу времени.

тастрофы, имеет огромный потенциал самовосстановления, который нужно принимать в расчет даже в условиях всемогущей современной цивилизации.

Разрушение мифов

Современные исследования, возможно, поставят точку в дискуссиях по ряду исторических и палеогеографических вопросов.

Зафиксированное летописями позднесредневековое исчезновение Арала считалось Бергом историческим преувеличением. Теперь мы можем сказать, что это не так, и Арал действительно испытывал несколько подобных регрессий.

Великий творец истории Чингисхан вряд ли творил историю Арала и не был инициатором второй средневековой регрессии. Эта регрессия началась задолго до его завоеваний.

Связываемый с Чингисханом поворот Амударьи в сторону Каспийского моря не был столь масштабным. Датирование отложений оз. Сарыкамыш — гигантского промежуточного бассейна на пути амударьинских вод в Каспий — показало, что оно наполнялось последний раз не 700–800, а 1700 лет назад, т.е. задолго до Чингисхана. Заполнение Сарыкамышского озера во времена Чингисхана было не больше, чем современное, также рукотворное. Соответственно, сток из озера по р. Узбой в Каспий однозначно был в III в., но совершенно исключен для разрушительных времен Чингисхана и Тамерлана (XIII–XIV вв.).

Согласно летописям, в Средневековье Сырдарья не достигала Арала, теряясь в песках. Однако на космических снимках видны следы ее древних русел не только на берегах, но и на сухом дне Аральского моря. Река, сопоставимая по величине с современной Сырдарьей, орошала северную часть осушенного дна, и именно на ее берегах были расположены мавзолеи Кердери.

Итак, получается, что Сырдарья, а возможно, и Амударья, питали Арал в Средневековье, но он все равно высох. Значит, объяснение этому следует искать в уменьшении их стока, которое могло иметь климатические или антропогенные причины. Напомним, что именно IX–XIV вв. были этапом интенсивной ирригационной деятельности. Этот период в целом совпадает со средневековым климатическим оптимумом, на смену которому пришла малая ледниковая эпоха. Зафиксированная нами трансгрессия попадает на пик климатического оптимума, когда среднегодовые температуры в Северном полушарии повысились более, чем на 1°C. Регрессии же предварили и завершили потепление. Таким образом, вырисовывается сложная картина ответа Аральского моря на колебания климата и человеческую активность, выяснение деталей которой — предмет будущих исследований.

Жизнь после смерти

Современное общество всерьез озабочено проблемой Арала, которая имеет не только экологические, социальные и экономические, но и политические аспекты. Арал поделен между двумя странами — Казахстаном и Узбекистаном, а воды его рек пользуются еще Киргизстан, Таджикистан, Туркмения, Афганистан и Пакистан. Борьба с аральской катастрофой — пример политически взвешенного взаимодействия государств не только в собственных, но и в общих интересах.

С 1993 г. эффективно работает Международный фонд спасения Арала (МФСА), созданный главами центральноазиатских государств при поддержке крупнейших мировых экономических и политических органов, включая ООН. Это межгосударственная организация, разрабатывающая и финансирующая экологические и научно-практические проекты и программы улучшения обстановки в Аральском регионе. В 2003 г. была утверждена «Программа бассейна Аральского моря-2», включающая более 50 региональных проектов.

Главная проблема — это вода. Страны-участницы МФСА решают вопросы рационального распределения водных ресурсов, хотя это вряд ли восполнит потери Арала. Тем не менее реализуются проекты, разумно улучшающие жизнь людей и экологию Аральского региона. Казахстан пошел по пути восстановления Малого Арала. Для этого была построена дамба, задерживающая



Древние русла Сырдарьи на дне Аральского моря и осушенная (1) и затопленная (2) части средневековой дельты на космическом снимке ASTER (2004 г.). В настоящее время вся область дельты сухая.

беспольный сток вод Сырдарьи на юг*. Уровень Малого Арала будет стабильным, а вода в нем через десяток лет станет почти пресной, что вернет жизнь городам и поселкам Северного Приаралья. Узбекистан старается максимально использовать водные ресурсы Амударьи для земледелия. Им реализуется программа строительства малых резервуаров, накапливающих воду, и каналов, направляющих ее в разные части амударьинской дельты. При этом Аралу будут отдаваться только использованные в сельскохозяйственном процессе воды. Таким образом, будущее Арала как озера предопределено. Его северная часть будет жить, а южная — умирать, став коллектором ядовитых стоков.

* Здесь стоит заметить, что в XIV в. люди более гибко использовали то, что предоставляла им природа, и заселили сухое морское дно. Мощь современной цивилизации позволяет действовать наперекор природе и восстанавливать море.

В последние годы проявилась иная сторона жизни Аральского бассейна — нефть и газ. Прогнозные запасы нефти здесь составляют 1—1.5 млрд т, а газа — 100 млрд м³. Хотя черное и голубое золото Приаралья были разведаны еще в советские времена, эксплуатация месторождений началась в 2000-х, чему способствовал уход моря. Нефтяные месторождения разрабатываются Казахстаном на п-ове Куланды. Узбекистан ведет добычу газа в южной части Арала. В регионе появилась иная, не связанная с жизнью моря, экономика, реально улучшающая жизнь людей.

В заключение хочется пометить, что Арал вернется в былом великолепии. Ведь кто знает, какие глубинные силы может направить мать-Земля на свое восстановление? Может, всколыхнутся гигантские тектонические блоки, изменят пути подземных вод и наполнят его иссохшее ложе. Но будет ли рад этому человек? И не станет ли он когда-нибудь бороться с наступающими водами Арала? ■

Литература

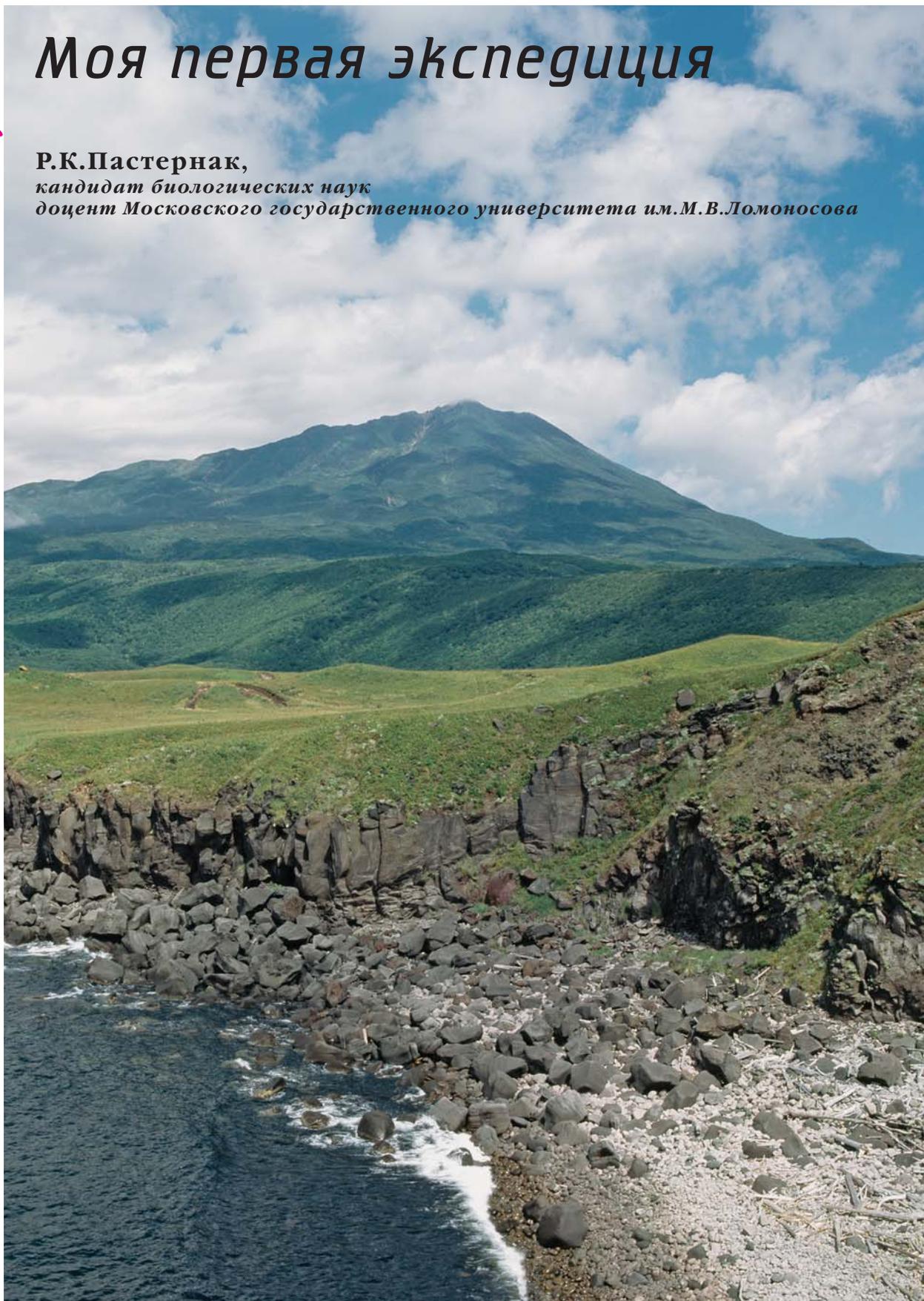
1. Берг Л.С. Аральское море: опыт физико-географической монографии. СПб., 1908.
2. История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал. Л., 1991.
3. Letolle R., Mainguet M. Histoire de la mer d'Aral (Asie centrale) depuis le dernier maximum glaciaire // Bulletin de la Societe geologique de France. 1997. V.168. P.387—398.
4. Boomer I., Aladin N., Plotnikov I., Whatley R. The palaeolimnology of the Aral sea: a review // Quaternary Science Reviews. 2000. V.19. P.1259—1278.
5. Boroffka N.G.O., Oberbäbsli H., Achatov G.A. et al. Human settlements on the northern shores of Lake Aral and water level changes // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Changes. 2005. V.10. P.71—85.
6. Sorrel P., Popescu S.-M., Head M.J. et al. Hydrographic development of the Aral sea during the last 2000 years based on a quantitative analysis of dinoflagellate cysts // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2006. V.234. P.304—327.
7. Oberbäbsli H., Boroffka N., Sorrel P., Krivonogov S. Climate variability during the past 2000 years and past economic and irrigation activities in the Aral Sea basin // Irrigation and Drainage Systems. 2007. V.21. P.167—183.
8. Boomer I., Wünnemann B., Mackay A.W. et al. Advances in understanding the late Holocene history of the Aral sea region // Quaternary International. 2009. V.194. P.79—90.
9. Krivonogov S.K., Kuzmin Y.V., Burr G.S. Environmental changes in the Aral sea region (Central Asia): Initial results of a radiocarbon-based study // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010. Section B. V.268. №7—8. P.1080—1083.
10. Krivonogov S.K., Kuzmin Y.V., Burr G.S. et al. Environmental changes of the Aral sea (Central Asia) in the Holocene: major trends // Radiocarbon. 2010. V.52. P.555—568.
11. Бартольд В.В. Сведения об Аральском море и низовьях Амударьи с древнейших времен до XVII века. Ташкент, 1902.
12. Книга Большому чертежу. М.; Л., 1950.
13. Интернет-газета ZONA^{kz} от 20.05.2008 (<http://www.zonakz.net/blogs/user/vnuchok/1617.html>).

Моя первая экспедиция

Р.К.Пастернак,

кандидат биологических наук

доцент Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова



Курило-Сахалинская экспедиция была организована в 1947 г. Зоологическим институтом АН СССР для изучения кормовой базы рыб Дальнего Востока. Возглавлял ее известный ихтиолог, ленинградский профессор Георгий Устинович Линдберг, и экспедиционный состав формировался из ленинградцев (естественно, из ЗИНа и ЛГУ). Для москвичей осталось всего шесть мест, два из которых заняли начальники отрядов — Олег Борисович Мокиевский из Института океанологии АН СССР и Кирилл Александрович Воскресенский, ассистент кафедры зоологии беспозвоночных Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. В мае того года я заканчивала третий курс биофака МГУ, и, поскольку два предыдущих летних сезона работала на Белом море под началом Воскресенского (по теме его кандидатской диссертации), он предложил мне принять участие в экспедиции на Дальний Восток. Естественно, я была в восторге от такого предложения. Но оказаться в составе экспедиции было не так-то просто. Мест всего четыре, желающих много, и предпочтение отдавалось мужчинам. Подумав, я решила обратиться за помощью к заведующему кафедрой физкультуры МГУ, поскольку уже три года играла в первой женской волейбольной команде университета. В характеристике мне написали, что я хорошая спортсменка (первый разряд по волейболу, кандидат в мастера спорта), вынослива и вполне подхожу для экспедиции. Затем Воскресенский отправил меня к Ивану Дмитриевичу Папанину, тогда заведующему экспедиционным флотом АН СССР. Изложила свою просьбу, а он мне говорит: «Ну куда ты такая тощая, как селедка, собралась в океан!» (Папанин, невзирая на возраст и чины, ко всем обращался на ты). Помню, я ответила ему в тон: «И. Д., обещаю вернуться толстой, как

бочка». Свое обещание я почти выполнила, поправившись за время экспедиции на 12 кг.

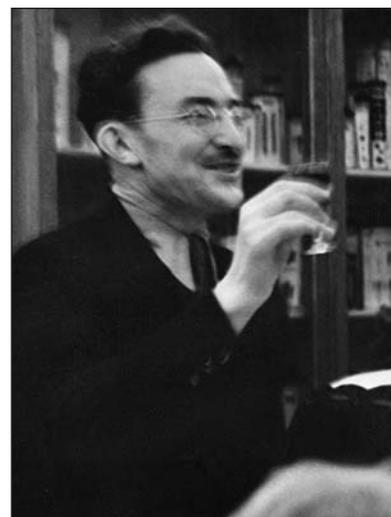
Отъезд во Владивосток наметили на первые дни июня. Начались сборы, отнимавшие много времени, а мне еще предстояло сдать два экзамена — политэкономии и физиологию растений. Первый я сдала, на подготовку второго времени не оставалось, а именно его мне хотелось сдать как можно лучше. Курс физиологии растений нам читал профессор Дмитрий Анатольевич Сабинин, его лекции вызывали большой интерес студентов не только ботанических, но и других кафедр; мы все его очень любили. Воскресенский, видя мое состояние, отвел меня в Ботанический корпус старого здания университета, где находилась квартира Сабинина. Профессор перелистал мою зачетку, поставил «5», я поблагодарила и пообещала по возвращении сразу же прийти сдавать экзамен. Единственная книга, которую я взяла с собой в рейс, был учебник по физиологии растений. Из-за происшествий, которые постоянно случались с нашим отрядом, мы опоздали к началу занятий: я на 2 недели, а второкурсники и Воскресенский — на 1.5 мес. Когда я пришла к Дмитрию Анатольевичу (я очень волновалась — не хотелось ударить в грязь лицом), он неожиданно сказал: «А давайте лучше поьем с вами чай с вареньем, у меня есть отличное варенье, а вы расскажете об экспедиции».

Дальнейшая судьба Сабинина сложилась трагически. 4 ноября 1947 г., в связи с происходящей дискуссией о внутривидовой борьбе у животных и растений, на заседании ученого совета биофака МГУ были заслушаны доклады академика И. И. Шмальгаузена, профессоров А. Н. Формозова и Д. А. Сабинина*, а после августовской сессии ВАСХНИЛ, посвященной положению в биологической на-



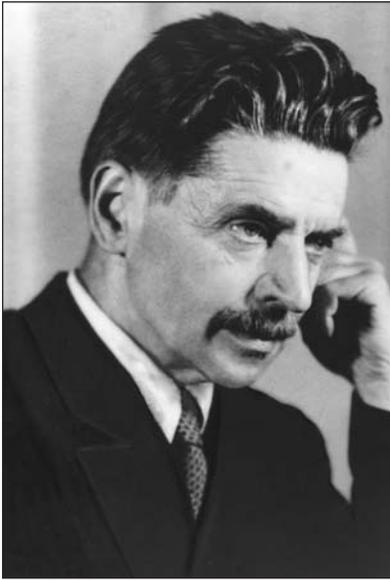
И. Д. Папанин — заведующий экспедиционным флотом АН СССР.

уке, начались массовые увольнения. С биофака изгнали всеми любимого декана С. Д. Юдинцева и всех трех вышеупомянутых докладчиков. Шмальгаузен и Формозов помимо преподавания на биофаке работали в Академии наук СССР, а Юдинцев и Сабинин остались без работы. Найти ее при сложившихся тогда обстоятельствах было весьма затруднительно. Спасибо Папанину, устроившему Сабинина на работу в Черноморский фи-



К. А. Воскресенский на кафедре зоологии беспозвоночных биофака МГУ. 50-е годы.

Вести из экспедиций



Д.А.Сабинин.

Фото из архива «Природы»

лиал Института океанологии АН СССР (Голубая бухта). Юдинцева не побоялся взять Г.Ф.Гаузе в руководимый им Институт по изысканию новых антибиотиков АМН. На биофаке пострадали и некоторые студенты. Так, группу студентов-генетиков нашего курса оставили на второй год, надеясь, видимо, переучить этих «вейсманистов-морганистов». Из этого, конечно, ничего не вышло — нас неплохо учили до прихода лысенковцев. Студентку Е.А.Ляпунову исключили из комсомола за организацию домашнего кружка по изучению классической генетики (позднее ее восстановили).

В последний раз я видела Сабинина в 1951 г. Будучи сотрудником Океанографического института, летом я работала на Новороссийской биологической станции. Принадлежащее станции судно «Форель» должно было зайти в Голубую бухту, и я попросила взять меня на борт, чтобы навестить Дмитрия Анатольевича. Жил он в одном из небольших домиков, построенных для сотрудников станции. Мы сидели в его библиотеке и разговаривали о жизни на биофаке до и после сессии ВАСХНИЛ. Профессор был грустен — очень

тосковал по педагогической работе, отправлял свое резюме в разные вузы, но согласия нигде не получил. Вскоре после ухода «Форели» Сабинина не стало — он покончил с собой, выстрелив себе в рот из охотничьего ружья.

Но вернемся к нашей экспедиции. В Курильский отряд (во главе с Воскресенским) вошли ихтиолог из Ленинграда Е.П.Рутенберг, студенты биофака ЛГУ В.С.Короткевич, О.А.Скарлато (будущий член-корреспондент и директор ЗИНа) и москвичи: окончивший первый курс А.В.Трубецкой и я, Р.К.Кудинова (в замужестве Пастернак). Перед отъездом нам выдали брюки-клевш, тельняшки, береты и форменки (а начальнику отряда — китель). Это было только подобие морской формы, и тем не менее во Владивостоке нас однажды остановил морской патруль и попросил предъявить документы.

В поезде №6 Москва—Владивосток нам выделили отдельный вагон, поскольку мы везли оборудование для биологических работ (тралы, дночерпатели, батометры, планктонные сети и т.п.). В те годы поезд до Владивостока шел 11 суток! Старшим в поезде назначили преподавателя ЛГУ В.Л.Вагина. Он был с нами суров, носил морской китель, во рту неизменная трубка. Сразу же организовал вахту у входа в вагон, вахтенные сменялись по слямкам. Путешествие было очень интересным. После европейской части страны поезд шел через Урал, Западную Сибирь, проходил у самого берега оз.Байкал, через Забайкалье, Биробиджан и Уссурийский край. Как-то, когда мы любовались горами Урала, Андрей Трубецкой предложил мне и супругам Тамаре и Игорю Забелиным (студентам геофака МГУ) влезть на крышу вагона и оттуда любоваться природой. Мы с радостью согласились и часть пути так и проехали, сидя на крыше, пока нас не обнаружил Вагин. Больше всех попало Андрею как са-

мому старшему (он поступил на биофак после армии).

Из Владивостока нас отправили в г.Корсаков (Южный Сахалин) — ждать прихода судов. Участников экспедиции разделили на три отряда — Сахалинский, Охотоморский и Курильский. Первым пришел тральщик «Топорок», и большая часть экспедиции во главе с Линдбергом ушла в море. Вслед за этим пришло небольшое судно «Охотск» за отрядом Мокиевского. Предназначенный нашему Курильскому отряду рыболовецкий сейнер задерживался. Нас поселили в небольшом поселке Тобути (восточнее Корсакова) на берегу большой лагуны, соединяющейся протоком с Анивским заливом. В Тобути уже работала береговая группа Сахалинского отряда под руководством известного ленинградского гидробиолога Е.Ф.Гурьяновой (она любила, чтобы ее называли Асей Федоровной). Она знакомила нас, студентов, с литоральной фауной. Вспоминаю, как она командовала: «Руки назад!» и затем вкладывала нам в ладони раковины моллюсков и требовала, чтобы мы их определили на ощупь.

С удовольствием купались, особенно по вечерам, когда хорошо видно свечение моря (Воскресенский не разрешал выходить поздно из дома, запирали дверь на ключ, но мы вылезали через форточку). Плывешь и видишь светящиеся контуры своих рук, а на берегу по телу сбегает светящиеся струйки воды.

В то время на острове еще оставалось много японцев. С некоторыми мы познакомились и вместе ловили креветок. Обычно перед обедом (суп из тушенки и каша) на стол ставилась плетеная корзина с креветками и кюветы с горбушей слабого посола. В рыбе мы недостатка не испытывали, поскольку Воскресенский еще во Владивостоке получил в какой-то высокой организации бумагу, обращенную ко всем партийным и хозяйственным органи-

зациям, в которой предписывалось помимо оказания всяческой помощи обеспечивать группу «академиков» (именно так напечатала секретарь) рыбопродукцией. Мы тогда долго смеялись — ведь самому старшему из нас, Рутенбергу, было всего 35 лет! Полученной бумагой Андрей пользовался в течение всего рейса, всегда возвращаясь с ящиком рыбы. Времена были нелегкие, в стране еще сохранялась карточная система на продовольствие. Мы получили карточки моряков с увеличенной нормой — для тех, кто плавает на Дальнем Востоке.

Наконец, пришел наш сейнер «Вест» (водоизмещение 200 т, длина 16 м, ширина 5 м). Команда состояла из девяти человек: капитан, его помощник, два механика (старшему 18 лет, младшему 17) и пять матросов, из которых четыре — японцы. Из них только самый младший, Сато-сан, хоть плохо, но говорил по-русски.

Воскресенский и Трубецкой отправились на сейнере в Корсаков для девиации компаса, заправки горючим и получения «добра» на выход в море. Проверка судна показала, что не в порядке сигнальные огни (команда обещала починить их в море) и не хватает плавсредств. Их в порту не было, надо было дожидаться доставки. Между тем мы уже сильно запаздывали с выходом в рейс (и значит, к началу занятий). В Корсакове начальник порта (он же и регистр) заявил, что, как регистр, он нас выпустить не может, но если мы не будем качать права (насчет плавсредств), то, как начальник порта, он даст добро на выход в море. Решено было выходить.

Уже при отходе от пирса «Вест» сел на мель. С помощью грузовика и бревна его удалось столкнуть с мели. Придя в Тобути, погрузили имущество, справили отвальную и наконец отправились в рейс. Но снова не обошлось без происшествия. Увлекаемые сильным отливным

течением, мы быстро шли по протоке, когда пограничники стали требовать вернуться на берег. Капитан кричал в мегафон, что у нас есть «добро» на выход, но по судну начали стрелять. Капитан стал разворачивать сейнер, что сделать в узкой протоке и при сильном течении очень нелегко. Вдруг пограничники успокоились (возможно, дозвонились до заставы), и мы продолжили движение.

Сейнер направился на юг к Курильским о-вам. Когда мы подходили к о.Итуруп, увидели стадо китов очень близко от нас (около 300 м). Шли вдоль берега острова и высматривали место, чтобы пополнить запасы пресной воды (наша команда перед выходом в море забыла это сделать!). Увидев на берегу маленький домик, встали на якорь, и мужчины, захватив бочку, в шлюпке отправились за водой. Оказалось, что это пограничный пост с четырьмя пограничниками. Они нам очень обрадовались, так как очень давно не видели ни одного русского человека. Помогли наполнить бочку водой, подарили ведро свежей форели и, когда мы уходили, сопровождали нас на шлюпке и долго махали руками.

Прежде чем начать работать, мы должны были зайти на о.Шикотан и на организованной для нас береговой базе оставить собранный на Южном Сахалине материал и кое-какое оборудование. Мы вышли из Южно-Курильска (где ночевали) днем и по расчетам к вечеру должны были подойти к Шикотану. Стало темнеть, а земли не видно. Наполз туман. Трубецкой и Скарлато опустили лот, надеясь, что, если земля близко, зафиксируют небольшую глубину, но, увы, дна не достали. Воскресенский, решив меня подразнить, сказал: «Роза, как я помню, вы хотели романтики? Пожалуйста — земли нет, пресной воды нет и на борту туземцы». Я ответила: «А я разве жалуясь?». Туман стал очень густым, а волны круче, и мы предположили, что



О.А.Скарлато. 1947 г.

сейнер проскочил мимо острова в океан. Капитан приказал лечь в дрейф, и все разошлись по кубрикам. Утром, когда туман еще не рассеялся, капитан попросил самого старого и самого опытного японца («старикка», как называл его Сато-сан) определить, в каком направлении нам надо идти. Японец в куртке с иероглифами на спине и повязкой на лбу встал на носу сейнера и долго смотрел вокруг, на небо (наверное, наблюдал за полетом птиц) и в конце концов рукой показал, куда следует двигаться. Мы пошли, туман стал понемногу рассеиваться, и через какое-то время мы увидели берег Шикотана. Выяснилось, что капитан, прокладывая курс с помощью транспортира, ошибся на 20°!

К этому времени мы уже поняли, что выделили нам, мягко говоря, не самый лучший сейнер. Он постоянно ломался, а мальчишки-механики имели мало опыта. Вся команда — типичные каботажники, не имеющие опыта работы в открытом море. Капитан плохо пеленговался, и в дальнейшем Воскресенский и Трубецкой стали ему помогать.

Команда, отоварив свои продуктовые карточки, быстро съе-

дала все самое вкусное, а потом ела одну кашу и соленую рыбу из своих запасов. Питаться вместе с нами они отказались. Пришлось готовить еду самим. Стоишь за ручной лебедкой, а на камбузе варится каша. Верному Сато-сану надо покричать: «Мешай-мешай» или «Мешай-мешай нет» — так он лучше понимал.

Итак, мы подошли к Шикотану. Наша база находилась на его восточном берегу, в небольшой и очень живописной бухте с множеством торчащих из воды скал весьма причудливой формы (всю прелесть этого места я оценила позднее). Осмотрев базу и выгрузив все необходимое, мы отправились к месту нашей первой станции. При сборе фауны на карте проводят линии (разрезы), на которых отмечают точки, где следует взять пробы. Наши разрезы располагались вдоль Малой Курильской гряды.

Несколько разрезов проложили в море Неморо, которое совсем близко от о.Хоккайдо. В бинокль можно было разглядеть дома маленького японского городка и бегущие паровозики. Сато-сан рассказывал, что знает случаи, когда рыбаки-японцы навещали своих родственников на Хоккайдо и возвращались обратно на Курилы, не замеченные пограничниками. Нас это не

особенно удивило. Море Неморо славится своими туманами. Временами казалось, что в воздухе висит вата. И японцам, при небольшом опыте и знании этих мест, легко было остаться незамеченными. По этому поводу мы шутили, что когда наши матросы-японцы сделают нам «ходи-ходи Хоккайдо», то возвращаться домой нам придется с помощью В.М.Молотова.

В один из вечеров, работая вблизи пос.Шикотан, мы решили всем отрядом пойти в кино. К нам присоединилась и часть команды. Посмотрев комедийный фильм, в хорошем настроении мы отправились на берег и стали кричать, чтобы вахтенный прислал шлюпку. Ответа не было — видно, на судне все крепко спали. Тогда мы отвязали японскую лодку (с одним изогнутым веслом на корме), и все как-то разместились, а Воскресенский, вошедший последним, решил устроиться посередине лодки, но ему мешал какой-то кол. Он его выдернул и выбросил за борт. Тотчас со дна забил фонтан священной воды. Кол японцы использовали как кингстон, чтобы сливать воду из лодки. Громко смеясь, промокшие, мы выбрались на берег.

Однажды утром, когда мы шли вдоль островов Малой Курильской гряды, раздался толчок, и я услышала, что машину остановили. Когда я с некоторым трудом преодолела трап, ведущий на палубу, то обнаружила, что сейнер лежит на боку с задраным сверху носом. Мы сели на мель, которая была обозначена на карте, но наш капитан этого не заметил. Команда отправилась на ближайший остров за помощью, но он оказался безлюден. Держась за фальш-борт, я сползла в воду, где уже были остальные. Кто-то чистил зубы, кто-то решил поплавать. Всем было весело. Воскресенский собрал отряд, стали думать, что нам предпринять. Рутенберг предложил запускать ракеты, остальные были против, решив, что в этом районе

встреча с каким-либо судном маловероятна, да и ракет у нас было мало — лучше побережь их для более серьезного случая. Рассчитывали, что, поскольку мы сели на мель в начале отлива, прилив должен вернуть сейнер в нормальное положение. Действительно, прилив выпрямил судно, но с мели сойти не удалось. Тогда придумали бросать якорь и подтягиваться к нему. Маневр удался. Нам повезло, что был полный штиль, при сильном ветре все могло кончиться плохо.

За рейс накопились пробы морской воды, и, чтобы избавиться от лишнего груза, надо было провести титрование для определения солёности. Решили оставить меня на базе дней на 8—10. Поселили меня в самом заметном доме поселка (бывшей гостинице для рыбаков) в японскую семью, состоявшую из хозяйки и девяти ее детей — девушки 21 года и восьми мальчишек, самому младшему из которых было 7 лет. Все свои продукты я выложила хозяйке: решено, что питаться будем вместе. Младшие мальчики, видя, как плохо я управляюсь с палочками, хихикали. Тогда хозяйка отыскала для меня ложку, и я, подмигнув япончатам (мол, посмотрим, кто теперь быстрее съест рис!), принялась за еду. Было очень интересно жить в настоящем японском доме, в поселке, где не было ни одного русского. Стены комнат раздвигались в стороны, пол выстлан толстыми матами. На стенах — длинные картины, заканчивающиеся толстыми деревянными палочками; вокруг низенькие столики, лакированные подносы, японская посуда. В доме имелось банное помещение, где посередине стоял огромный котел, а по стенам лавки с тазиками. Сначала все моются, сидя на лавках, а затем чистыми барахтаются в котле. Мужчины и женщины моются вместе. Вечером, когда происходило мытье, я заранее сдвигала стенки своей комнаты, так



Р.К.Кудинова. 1947 г.

как по коридору шествовали голые домочадцы.

Находясь среди японцев, надо было как-то общаться. Поскольку Сато-сан был нашим постоянным палубным помощником, я выучила примерно 50 японских слов, хозяйка дома знала чуть меньше русских, и, как дополнение, в ход шли рисунки и жесты. Встречаясь с японцами в поселке, я, как положено, кланялась, сложив вместе ладони.

За время нашего рейса можно было бы сделать много интересных снимков, но, увы, нам запрещалось иметь фотоаппараты из-за работы в пограничной зоне. На память остались фотографии отряда, сделанная во Владивостоке, и московские снимки, на которых Тамара Забелина и я, облачившись в настоящие кимоно и с зонтиками в руках (все было куплено на Южном Сахалине), изображаем японок.

Закончив титровать, я в ожидании сейнера осмотрела, наконец, поселок, берега бухты, и стала бродить в ее окрестностях. Поселок мне очень понравился, чистый, с аккуратными домиками. Через речушку и даже небольшой ручеек переброшены каменные горбатые мостики. Тропинки посыпаны битым красным кирпичом. Бухта окружена невысокими горами с крутыми склонами, покрытыми зеленью. Вид сверху поражал своей красотой.

Тем временем погода стала портиться, явно надвигался шторм. «Вест» показался на траверзе бухты, мне издали помахали чем-то белым, я ответила. Заходить в бухту даже при небольшом волнении было опасно из-за торчащих из воды скал. Сейнер ушел, как выяснилось позже, на расположенный всего в 3 км от нашей базы бывший японский маяк. Когда перестало штормить, за мной прислали шлюпку. Погрузив имущество и тепло попрощавшись с японским семейством, в котором я прожила 14 дней, пошли вдоль берега на маяк. А там уже вовсю



«Настоящие» японки Т.Забелина и Р.Кудинова. Москва. 1949 г.

шла подготовка к празднованию Дня победы над Японией и к нашей отвалной. Моряки обрадовались нашему появлению, приготовили много вкусного и даже испекли пирог.

На маяке была отличная баня, и мне предложили этим воспользоваться. Дверь в баню не заперлась, но меня заверили, что все уже вымылись и никто не войдет. Но только я успела намылить голову, как отворилась дверь и вошел старый японец (бывший служитель маяка). Не обращая на меня никакого внимания, стал расставлять принесенные с собой в тазике разные баночки и щеточки. В ужасе, прикрываясь шайкой, я пыталась спрятаться за лавкой. Обнаружив меня, японец с досадой махнул рукой, аккуратно собрал все принесенное в тазик и удалился. Конечно, я обидела старого человека. Ведь я знала об общих банях в Японии, и надо было спокойно продолжать мыться, но я, увы, не смогла. Вечером на нашей отвалной много шутили на банную тему.

Утром вышли в море. Когда проходили под берегом, под маяком, моряки нам долго семафорили, наверное, желали доброго пути. Прежде чем идти во Владивосток, нужно было зайти в порт Невельск (западный бе-

рег Сахалина), куда был приписан наш сейнер. Дошли благополучно, но тут начало штормить — выход задерживался. Воскресенский теребил портовое начальство, понимая, что мы опаздываем к началу занятий. В конце концов нас выпустили при еще не стихшем ветре, а к вечеру разразился сильнейший шторм. Мы провели ужасную ночь — нас выбрасывало из коек. Трубецкой потом говорил, что ему удавалось удерживаться в койке только благодаря своему росту (192 см): упирался головой и ногами в стенку.

В кормовом кубрике, где я жила, из-за сильной качки выбило несколько половиц и трюмная вода с примесью мазута катала по полу разные упавшие предметы. Картину, которую мы увидели утром, забыть невозможно. Наше маленькое суденышко лезет вверх на высокую гору (гребень волны), и когда взбирается на нее, то внизу видишь глубокую впадину, сейнер скользит вниз на ее дно, а затем снова поднимается на крутую гору. Дух захватывало, колотилось сердце. Казалось, что вот-вот мы окажемся под водой. В такой шторм я больше не попадала. На больших экспедиционных судах, таких как «Витязь» и «Академик Курчатов», ощущение



Современные виды Курильских о-вов. Последняя экспедиция Института океанологии 2010 г. Остров Итуруп: склон вулкана Баранского.

ния иные, и шторма, как я помню, были меньшей силы. Уже во Владивостоке из сводки Гидромета мы узнали, что в акватории, где мы штормовались, волнение было 12 баллов! Все очень вымотались. Особенно скверно было Воскресенскому и Скарлато, их укачивало, но всю дорогу они мужественно это переносили, теперь же лежали пластом.

Хотелось есть, а находившиеся в трюме продукты были не-

доступны. На камбузе оставалось только немного муки и соли. Трубецкой предложил сделать мучную затируху. Ему с большим трудом удалось развести огонь в плите. Вера и я в двух кастрюльках с небольшим количеством воды (иначе выплескивалось) растерли муку. Теперь надо было добраться до кубрика. Хорошо, что еще до начала шторма от борта к борту натянули канаты. Держась за них, мы ползком добрались до

кубрика. Затем надо было изловчиться и распределить еду по мискам. И даже съесть свою порцию было не так-то просто.

Утром ветер стал стихать, и мы увидели берег Приморья. В бухте Терней первыми нас встретили украинские женщины и начали причитать надо мной и Верой: «И зачем вас, таких молоденьких и таких красивеньких, несет в море!» Нас повели в столовую. Воскресенский сказал, что каждый может съесть



Остров Итуруп: вид на вулкан Богдан Хмельницкий.

Все цветные фото М.В.Флинта

или первое, или второе (он боялся заворота кишок). Чтобы подкрепить нас, принесли медухи. В результате никто, при ясной голове, не мог нормально двигаться, и мы, все шестеро, сцепившись руками и раскачиваясь из стороны в сторону, отправились на пирс.

На следующий день собрались уходить, а мотор не заводится. Оказалось, что сели аккумуляторы. Страшно даже подумать, что бы с нами произошло,

случись это во время шторма! Завелись от стоящего рядом судна. Но дошли только до следующей бухты Тетюхе — сломался мотор. Несколько дней пытались его чинить — не удалось. Воскресенский отправил декану телеграмму о бедственном положении отряда. Там была фраза, что отряд голодает. На самом деле у нас оставались кое-какие запасы: крупа, соленая рыба и жир нерпы. В поселке раздобыли лук, морковь, картофель и капусту.

Пока шли переговоры о том, как нам добраться до Владивостока, мы с удовольствием бродили по окрестностям. Однажды переходили маленькую речку, и Трубецкой почему-то не захотел разуваться и попросил Скарлато перенести его на плечах. Утро было туманное, и трое местных мужиков, не понимая, что это такое огромное движется (рост первого 192 см, второго — 189 см), бросились наутек.



Курильский отряд экспедиции. Верхний ряд (слева направо): А.В.Трубецкой, К.А.Воскресенский, О.А.Скарлато. Нижний ряд: сотрудница ТИНРО (к сожалению, не помню имени), В.С.Короткевич, Р.К.Кудинова (Пастернак).

Наконец удалось договориться, что нас захватит идущее во Владивосток суденышко Гидрометслужбы. Достать билеты было нелегко: на запад в это время возвращались многие отсидевшие в лагерях свои 10 лет (1937—1947). С трудом достали билеты в общий вагон.

На факультете встретила декана. Сергей Дмитриевич, увидев мой цветущий вид, ткнул пальцем в мою щеку и спросил: «А это что означает?» — «Это от голода, Сергей Дмитриевич!» — «Пускай сегодня же ко мне зайдет Воскресенский», — грозно изрек де-

кан. Конечно, никаких карательных мер не последовало.

При встречах в Москве или Ленинграде мы вспоминали приключения нашего отряда, а также фразу (не помню, кем сказанную на нашей отважной, но часто повторяемую): «Мы горды тем, что мы живы». Пожалуй, правильнее было бы сказать: «Как здорово, что мы оказались на редкость везучими!». По прошествии многих лет приятно было видеть среди коллекций Зоологического института АН СССР материалы, собранные во время нашей экспедиции.

Со времени описываемой Курило-Сахалинской экспедиции прошло уже 65 лет. С тех пор радикально изменились условия работы. Морские экспедиции в нашей стране проводятся на больших научно-исследовательских судах. Первый и наиболее заметный в этом ряду — легендарный «Витязь», затем — «Академик Курчатов», «Дмитрий Менделеев», «Академик Иоффе», «Витязь-2» и другие замечательные суда. Условия жизни и работы на борту вполне комфортабельны, кормят четыре раза в день и так, что обычно к концу рейса его участники набирают лишние 3—4 кг. В 80-х годах, когда в СССР с продуктами было туговато, коки на судах старались разнообразить меню, при заходах в заграничные порты покупали фрукты (включая и столь необычные по тем временам, как ананасы, манго, папайи), вовсе неизвестные тогда в стране йогурты и т.д. Экспедиции стараются делать комплексными, в состав их входят гидрофизики, химики, метеорологи, биологи. Приборное оснащение не сравнить с описываемой экспедицией 1947 г. Основы современного технического судового обеспечения — всевозможные специальные лебедки, электронные замыкатели, розетки, лендеры, а иногда и подводные аппараты, которыми управляют с борта судна (ROV), или даже обитаемые подводные аппараты. Так что условия проведения морских экспедиций в 40—50-х годах, на маленьком сейнере, с неподготовленной командой, отбором проб с помощью механических лебедок, самостоятельным приготовлением пищи, представляются изумительной экзотикой. Однако энтузиазм и настойчивость участников таких пионерских экспедиций позволили собрать обширные фаунистические коллекции, которые до сих пор хранятся в Зоологическом институте РАН (Санкт-Петербург) и Институте океанологии (Москва). ■

Запасливые полевки

Н.Е.Докучаев,

доктор биологических наук

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН (Магадан)

Запасаются на зиму кормом многие животные северных регионов, в том числе мелкие грызуны рода серых полевков (*Microtus*), причем один из видов этого рода даже назван полевкой-экономкой (*М. oeconomus*). В конце лета и осенью экономки заполняют свои «кладовые» корешками, клубнями, луковицами и т.п., которыми питаются в течение зимних месяцев — наиболее сложный период их жизни. Запасы бывают столь значительны, что в былые времена местные жители даже специально их искали и собирали. Об этом своего рода промысле упоминают, например, Н.П.Сокольников в статье «Охотничьи и промысловые звери Анадырского края», вышедшей в 1927 г. в «Бюллетене Московского общества испытателей природы, и А.Н.Формозов в популярной книге «Спутник следопыта», изданной в 1959 г. В Корякском нагорье в «кладовых» экономок были найдены аккуратно уложенные корневища, которые в сыром виде весили 915 г [1], а в Якутии подобные находки были еще больше — до 1600 г [2]. Но и это не предел: другой вид серых полевков *М. sachalinensis*, обитающий на Сахалине, умудряется собрать до 17 кг [3]. Иногда полевки запасают корм прямо на поверхности земли, где от «чужого глаза» и высыхания его защищает снежный покров.

У лесных полевков (*Clethrionomys*) некоторые виды названы соответственно их окраске — рыжая, красная и красно-серая. Особый интерес представляет красная полевка (*C. rutilus*), оби-



Запасы полевки-экономки на поверхности почвы (зимой они находились под снегом). Вес тщательно очищенных корневищ мелкой осоки в данном случае составил всего 30.2 г.

Здесь и далее фото автора



Красная полевка.

© Докучаев Н.Е., 2012



Зимние запасы красно-серой полевки из веточек брусники (слева) и шикши на поверхности, что довольно обычно для этого вида полевок.

тающая на обширной территории — от северо-восточных районов Фенноскандии до Чукотки и Камчатки. В таежной зоне Сибири красная полевка — один из самых обычных и массовых видов, при этом замечено, что селится она преимущественно в лиственничниках. Такая привязанность, по-видимому, объясняется тем, что красная полевка питается семенами лиственницы и эпифитными лишайниками, закрепляющимися на ветвях деревьев.

На северо-востоке Сибири к востоку от Верхоянского хребта основная лесообразующая порода — это лиственница Каяндера (*Larix cajanderi*). В годы обильного урожая вся крона лиственниц буквально усыпана шишечками. Обычно они красного

цвета, но у отдельных деревьев могут быть и нетипичного светло-зеленого окраса. Есть еще одна особенность лиственницы Каяндера: ее семена высыпаются из шишек не весной (в марте-апреле), как у лиственницы Гмелина (*L.gmelinii*) из Западной Якутии, а сразу после созревания — начиная с конца августа.

Очевидно, что у животных есть возможность сделать на зиму большие запасы семян лиственницы только при хорошем и обильном урожае, что случается не ежегодно. По моим наблюдениям, в Северном Приохотье (бассейн р. Чёломджа) каждый третий год неурожайный. В годы среднего плодоношения лиственницы могут дать до 30–40 кг семян на 1 га [4], а обильного — в два-три раза

больше. И тогда семена лиственницы в сентябре покрывают всю лесную подстилку и становятся «манной небесной» для многих обитателей леса. Рябчики ходят по земле и как куры собирают семена с поверхности почвы. В октябре 1974 г. в бассейне р. Омолон (правый приток Колымы) наши коллеги обнаружили в зобе одного из них 2500 крылаток лиственницы [5]. А у синиц зимой того же года желудки на 80% были наполнены ее семенами (для сравнения — в малоурожайные годы они составляют лишь 10–20%) [5]. Готовясь к зиме, синицы прячут семена в трещинах и среди чешуек коры на стволах и ветвях деревьев.

Семена лиственницы — основа рациона и землероек-бу-



Красные и зеленые шишки лиственницы Каяндера.



Съеденные полевкой запасы семян лиственницы (слева) и ее проросшие семена из зимних запасов красной полевки.

розубок, причем запасы бурого жира у этих зверьков резко возрастают в урожайные на семена годы, что позволяет им благополучно пережить зиму [6]. По нашим наблюдениям, популяция средней бурозубки (*Sorex caecutiens*), обитающая в Северном Приохотье (бассейн р. Чёломджа), в такие годы теряет каждый зимний месяц от 5 до 15% своего поголовья, а в неурожайные годы — 30—35% [6]. Когда семян много, их хватает всем и не только на зимний период: и бурозубки, и полевки кормятся ими даже следующим летом вплоть до нового урожая [7].

Из всех полевок только красные запасают семена лиственницы. Большинство видов серых полевок питается исключительно зелеными частями растений (зеленояды), даже красносерая полевка — близкая родственница красной — лишь изредка ест семена. В июне 1987 г. в пойменном лиственничнике бассейна р. Чёломджа, например, семена лиственницы были обнаружены в желудках 30% красной полевки, и лишь 7% — красносерой [8]. И по количеству съеденных семян (объему в содержимом желудков) красные полевки в разы превосходили красно-серых полевок.

Интересно, что хотя полевки входят в семейство хомяковых (*Cricetidae*), они не обладают какими-либо специальными при-

способностями (например, защечными мешками) для переноски большого количества семян. Тем не менее, они с успехом это делают. Мне доводилось ловить полевок, у которых рот был буквально забит семенами лиственницы, правда, предварительно очищенными от крылаток.

Поскольку увидеть, как полевки запасают семена, практически невозможно, то изучать эту их деятельность проще всего на следующий год после обильных

урожаев. Во-первых, при желании довольно легко можно найти места, где были спрятаны семена: даже если они были съедены, то остается небольшое углубление, а рядом остатки скорлупы. Во-вторых, поскольку не все полевки переживают зиму, то часть «кладовых» остаются нетронутыми, и семена начинают прорастать. Как раз по пучку проростков легче всего находить «зачапки» полевок, узнать, в каких местах они их чаще все-



Эпифитные лишайники из зимних запасов красной полевки.

го размещают и даже подсчитать, сколько было запасено семян. Мне удалось найти 42 таких «кладовых» полевков, где находилось от 27 до 275 (в среднем — 129) очищенных от крылаток семян лиственницы. Размещены они, как правило, на глубине до 2,5 см от поверхности (чаще в 1—1,5 см, иногда, на моховых участках, — до 5 см) и обычно группами, а значит принадлежат одному зверьку на его индивидуальном участке.

Красные полевки питаются не только семенами лиственницы, но и ягодами, грибами и т.д. [2, 9, 10]. Однако лишь однажды мне удалось найти в «кладовой» семена шиповника, который в отличие от лиственницы ежегодно хорошо плодоносит. К тому же в окрестностях нашей полевой базы, где была найдены запасы красной полевки, до-

вольно много росло кустов шиповника двух видов (иглистого и тупоушкового). И все же питаются красные полевки довольно разнообразно и не без изысков. Оказалось, что даже при обилии семян, ягод и грибов, эти полевки предпочитают есть эпифитные лишайники [8]. Они даже запасают их впрок в виде аккуратно скрученных шариков. В свое время А.Н. Формозов «улучил» в этом европейских рыжих полевков [11].

Хотя лишайники считаются малокалорийным кормом, специальные адаптации позволяют выживать некоторым животным именно благодаря этому, как правило, обильному и доступному корму. Хорошим примером тут может служить кабарга, в суточном рационе которой в снежный период лишайники группы *Usnea* занимают до 99% [12].

Красные полевки могут переваривать лишайник благодаря особенностям в строении их желудка, на что в свое время обратил внимание еще Н.Н. Воронцов [13]. У этих животных, питающихся в основном семенами, как ни странно, хорошо развит роговой эпителий в желудке, что более характерно для грызунов из рода серых полевков, питающихся зелеными частями растений [14]. Также установлено, что в желудке и толстом кишечнике красной полевки живут сообщества микроорганизмов, способные к интенсивной азотфиксации [15]. Это означает, что их хозяин может без ограничений питаться растениями с низким содержанием белка, получив в процессе эволюции приспособление, позволяющие пережить период зимней бескормицы. ■

Литература

1. Портенко Л.А., Кищинский А.А., Чернявский Ф.Б. Млекопитающие Коряцкого нагорья. М.—Л., 1963.
2. Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г. и др. Млекопитающие Якутии. М., 1971.
3. Воронов Г.А. Данные по экологии и постэмбриональному развитию сахалинской полевки (*Microtus sachalinensis*) (Rodentia, Cricetidae) // Зоол. журн., 1984. Т.63. Вып.11. С. 1693—1704.
4. Поздняков Л.К. Даурская лиственница. М., 1975.
5. Андреев А.В. Адаптация птиц к зимним условиям Субарктики. М., 1980.
6. Докучаев Н.Е. Экология бурозубок Северо-Восточной Азии. М., 1990.
7. Докучаев Н.Е. Потребление семян лиственницы мелкими млекопитающими в Магаданской области // Динамика численности грызунов на Дальнем Востоке СССР и их роль в экосистемах. Тезисы докладов III региональной научной конференции. Владивосток, 1988. С.42—43.
8. Докучаев Н.Е. О лихенофагии красной полевки (*Clethrionomys rutilus*) // Зоол. журн., 2009. Т.88. №8. С.1013—1016.
9. Юдин Б.С., Кривошеев В.Г., Беляев В.Г. Мелкие млекопитающие севера Дальнего Востока. Новосибирск, 1976.
10. Сафронов В.М. Зимняя экология лесных полевков в Центральной Якутии. Новосибирск, 1983.
11. Формозов А.Н. Мелкие грызуны и насекомоядные Шарьинского района Костромской области в период 1930—1940 гг. // Фауна и экология грызунов. М., 1948. Вып.3. С.3—110.
12. Устинов С.К. Зимнее питание кабарги (*Moschus moschiferus*) на Восточном Саяне // Зоол. журн., 1969. Т.48. Вып.10. С.1558—1563.
13. Воронцов Н.Н. Эволюция пищеварительной системы грызунов (мышеобразные). Новосибирск, 1967.
14. Воронцов Н.Н. Экологические и некоторые морфологические особенности рыжих полевков (*Clethrionomys Tilesius*) европейского северо-востока // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1961. Т.29. С.101—136.
15. Наумова Е.И., Ушакова Н.А., Мещерский И.Г. и др. Азотфиксация — новый феномен в питании грызунов // Известия Академии наук. Сер. биол. 2000. №3. С.329—331.

Непрямые истины Линн Маргулис

В.Фет

Университет Маршалла
Хантингтон (Западная Виргиния, США)

Имя знаменитого американского натуралиста Линн Маргулис (1938–2011) — одно из самых узнаваемых в нынешней биологической науке. Эту ниспровергательницу устоев и стандартов Э.О.Уилсон называл «одним из самых успешных синтетических мыслителей в современной биологии». Трудно сказать, какие области естественных наук не затронуты научной и просветительской деятельностью Маргулис — от альгологии до геномики, от медицинской биологии до биогеохимии. И в то же время сотни биологов во всем мире, знавшие Маргулис, звали ее без церемоний, просто Линн.

Она была необычным человеком. В 14 лет поступила в Чикагский университет, в 19 лет вышла замуж за Карла Сагана, знаменитого в будущем астронома. Всю жизнь Линн занималась водорослями и прочими протистами (в ее терминологии — протоктистами). Вместе со своим старшим сыном Дорионом Саганом написала ряд популярных книг. А главное — еще в 1960-х она предложила знаменитую теорию серийного эндосимбиогенеза — происхождения эукариотических клеток (тех самых протоктистов) путем симбиоза прокариот (бактерий). Ее первую, ныне классическую, статью «О происхождении митотических клеток» отвергли 15 журналов, а впоследствии она выросла в основополагающую книгу «Роль симбиоза в эволюции клетки»*.

* Русский перевод опубликован в 1983 г.

Резко полемические, эпатажные статьи Линн, такие как опубликованная в 1990 г. работа «Слова как боевые кличи: симбиогенез и новая область эндоситобиологии», будили воображение. Одна из последних спорных книг ее и Дориона Сагана, «Приобретение геномов» («Acquiring Genomes», 2002), о том, что основной механизм эволюции и видообразования — не медленное накопление небольших мутаций, а обмен геномами (горизонтальный перенос). И, как всегда у Маргулис, в этой книге читателю откроется «королевская дорога» в микрокосм бактерий и протоктистов.

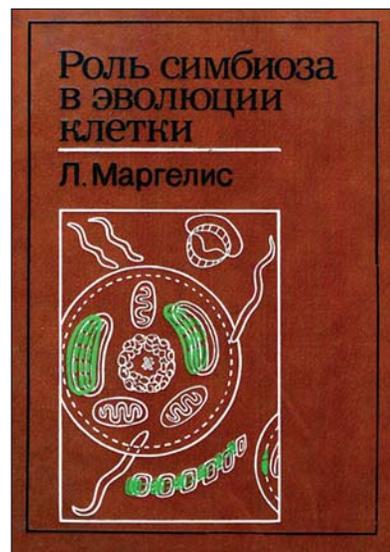
Последняя работа Линн и ее единомышленников, сборник работ «Химеры и сознание»**, посвящена эволюции сигналов и взаимодействий от вирусов и бактерий до планетарной биосферы Земли. Биосферный, экосистемный, уровень симбиогенеза (теория Геи, или, иначе говоря, биосфера Вернадского) — область, в которой Маргулис также работала десятилетиями и была в ней одним из самых выдающихся исследователей.

Именно Линн организовала первый полный перевод на английский книги В.И.Вернадского «Биосфера», увидевший свет только в 1998 г.! А еще ранее, в 1992 г., под ее руководством вышел перевод другой русской книги — монографии Л.Н.Хахиной об истории изучения симбиоза в России. Такое внимание Линн к истории науки и ино-

** «Chimeras and Consciousness» (MIT Press, 2011).



Линн Маргулис на церемонии вручения премии «Изучение разума» Общества Леонардо да Винчи.



Обложка книги Линн Маргулис (1983). В этом издании фамилия Линн была переведена как «Маргелис», и с тех пор в русскоязычной литературе употребляются оба варианта.



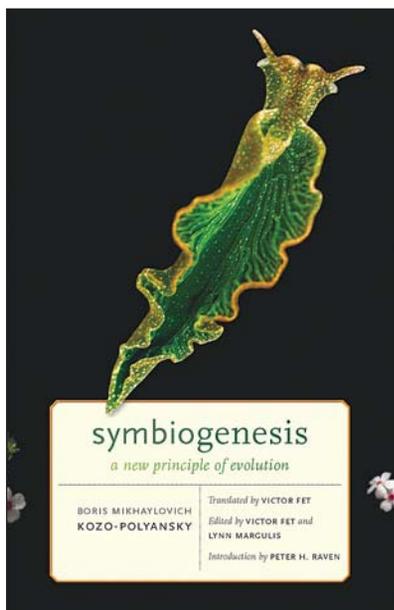
Б.М.Козо-Полянский. Воронежский государственный университет. 1950-е гг. Фото из семейного архива.

язычным исследованиям (не только на русском, но и на немецком, испанском и других языках) было особенно важно и необычно. В современной биологии английский стал доминирующим языком, и ученые англоязычных стран другими языками, как правило, не владеют.

Мы были знакомы всего несколько лет, но Линн неизгладимо вошла в мою жизнь, как она умела это делать для всех, знавших ее лично. Увы, люди такого

темперамента и уровня энергии часто сгорают быстро.

Мне посчастливилось не только встретиться с Линн несколько раз, но и работать с ней (в основном по переписке) в 2005–2010 гг. над переводом и изданием книги «Новый принцип симбиогенеза» (1924). Книга эта — классический и забытый труд ботаника Бориса Михайловича Козо-Полянского (1890–1957). Она была опубликована в нэповские времена частным издательством «Пучина», в основном издававшим фантастику, а вскоре, конечно, канувшем в лету. Сам оригинал редкой книги (экземпляр из личной библиотеки А.С.Серебровского!) отыскался в Новосибирске, в библиотеке Института цитологии и генетики. Перевод занял пару лет, и Линн приняла в нем самое непосредственное участие как со-редактор, скрупулезно помогала выверять значение зачастую неясных терминов и названий. Особенно она заботилась, чтобы мой «неродной» английский не только отражал старомодный, академический язык Козо-Полянского, но и был точен и понятен современному читателю. Книга была опубликована Гарвардским университетом под названием «Symbiogenesis: A New Principle of Evolution».



Обложка книги Б.М.Козо-Полянского «Симбиогенез». 2010 г.

Выход «Симбиогенеза» в 2010 г. стал особой радостью для Линн. Ее время было всегда распланировано по дням на год вперед. Но мы еще заранее договорились, что, когда книга Козо-Полянского выйдет, она приедет в наш университет на презентацию. Приезд ее в конце сентября 2010 г. в Западную Виргинию, в маленький городок Хантингтон (50 тыс. населения), стал незабываемым праздником научной мысли. В течение двух дней Линн часами без устали общалась не только с преподавателями, но и со студентами! Она сделала три доклада; после одного из них показывала видеозаписи других своих докладов, в том числе свои дебаты со знаменитым оксфордским ультрадарвинистом Ричардом Доукинсом. Все это продолжалось еще часа два — и в зале осталась только горстка самых лучших студентов, аспирантов и просто любознательных местных людей — не побоюсь назвать их интеллигентами. Некоторые из них были моими студентами на курсах эволюции и генетики... За 16 лет моей работы в Университете Маршалла это, конечно, был самый выдающийся приезд научной знаменитости.

На презентации книги 24 сентября 2010 г. мы устроили выступление в университетском театре, куда со всего городка собралось не менее 400 человек — а это очень много для биологического выступления в американском провинциальном университете. Наш книжный магазин закупил 100 экземпляров «Симбиогенеза», и после выступления мы с Линн сели за столик подле сцены, к которому выстроилась очередь — приобрести книгу и взять у нас автографы. Линн потом говорила нам, что такой церемонии с автографами у нее не было никогда: она ведь не возила с собой свои книги на продажу ящиками, как это делают «настоящие» писатели...

Во время презентации я сидел во втором ряду и совершенно не ожидал, что Линн вызовет

меня на сцену. Но, дойдя в своем показе слайдов до 16-строчного резюме доклада Козо-Полянского в 1921 г. на петроградском Съезде ботаников, она неожиданно попросила меня выйти на сцену и перевести эти строки для зала «с листа». Зал, наверно, не поверил, что это импровизация, не обговоренная заранее. В последние годы Линн постоянно цитировала это резюме в разных ситуациях. Ей нравилось, как Борис Михайлович с его склонностью с «гегельянству» обобщал свой тезис, что объединение двух разнородных вещей в систему (водород плюс кислород = вода) дает системе новые свойства — а значит, «промежуточных звеньев» зачастую не бывает. *Natura facit saltum* (природа делает прыжки), так переформулировал Козо-Полянский в 1921 г. старинное изречение «природа не делает прыжков» (*Natura non facit saltum*)... Это был девиз и самой Маргулис, и она очень радовалась, когда Хахина достала для нас копию странички из тезисов 1921 г., которых, конечно, не было в американских библиотеках.

В предисловии к нашему переводу «Симбиогенеза» выдающийся американский ботаник Питер Рейвен писал: «Очевидно, что отсутствие признания концепций Козо-Полянского в Западной Европе и Северной Америке происходит частью из чрезвычайной оригинальности этих концепций. Однако этому также способствовала недоступность иностранных языков для нас, говорящих только по-английски. В особенности же в целом нам неизвестна русская биологическая литература. Особо надо отметить роль Линн Маргулис, которая посвятила всю свою жизнь исследованию симбиотической природы сложных клеток» (пер. с англ. мой. — В.Ф.). Рейвен далее вспоминает: «В 1975 г. на Международном ботаническом конгрессе в Ленинграде Тахтаджян — в то время директор великолепного Ленинградского ботанического сада — организовал

Б. М. Козо-Полянский.

Теория симбиогенеза и „пангенезис, временная гипотеза“.

В докладе, по сравнению с брошюрой «Симбиогенезис», которая распространялась автором среди участников съезда, — выдвигались следующие новые тезисы:

1) Тезис Линнея и биологии: *Natura non facit saltum* теряет свое значение, ибо образование из 2 и т. д. существ третьего суммарного есть скачек.— *Natura facit saltum*.

2) Поэтому поиски промежуточных форм. *missing links* и т. п. во многих случаях вполне безцельны. Между 2 и т. д. слагаемыми и их суммой переходы не возможны.

3) Представление о родословном дереве, как о подобии настоящего дерева, ошибочно, так как родословие организмов выражается не только расхождением линий, но и схождением, и сращением их: две и т. д. ветви, срастаясь, дают суммарное продолжение (водоросль+гриб=лишай).

4) Формообразование по типу симбиогенеза у организмов повторяет способ формообразования, свойственный природе элементарной: два газа соединяясь, формируют жидкость. две жидкости—твердый осадок, железа и сера—кристаллы не похожие ни на железо, ни на серу. Новое есть результат соединения старого.

Страница из тезисов Козо-Полянского. 1921 г.

многолюдную секцию по происхождению хлоропластов, куда был приглашен и я. Я как раз написал статью, излагавшую гипотезу многократного происхождения пластид в различных группах окрашенных водорослей. Я предложил Линн Маргулис, бывшей тогда доцентом кафедры биологии Бостонского университета, также представить на конгрессе свои идеи о симбиогенезе и эволюции пластид. <...> Окончательная программа была составлена председателем конгресса д-ром А.Тахтаджяном, которому сразу стало ясно, что его западные коллеги (П.Рейвен и Л.Маргулис) не знали абсолютно ничего о симбиогенетических работах русских ботаников, а особенно одного из них, о котором на Западе вообще никто не слышал: его учителя Бориса Козо-Полянского. <...>

Д-р А.Тахтаджян упрекал нас тогда: «Вы, говорящие только по-английски, думаете, что вся ботаника и эволюционное учение зародились в ваших странах. Прочтите это!» — и он протянул мне переведенные им строки. И Тахтаджян был прав! Высокомерие думать, особенно

в середине XX в., что, подобно тому как немецкая наука доминировала в XIX в., все достойные внимания научные работы публикуются по-английски! Теперь, через 34 года, мы наконец можем ответить на эти упреки!»

Еще одна продолжающаяся история, параллельная проекту перевода книги, но тоже с российской тематикой. В те же годы (2006—2008), когда мы с Линн активно работали над переводом, она попросила меня связать ее с московскими микробиологами, открывшими особый тип бактерий в серных грязях Старой Руссы (Скотопригоньевске Достоевского — о чем Линн и не знала). Я помог наладить «межкультурную» связь Линн с московскими микробиологами (группой Г.А.Дубининой), переводил их письма друг другу и доклады на конференции в Берлине (2008). Статья об открытии новой бактерии была, наконец, опубликована в 2010 г. Согласно теории Линн, эти бактерии (свободноживущие спирохеты) сходны с нашими давними предками, которые в процессе симбиогенеза образовали эукариотические клетки. Зна-

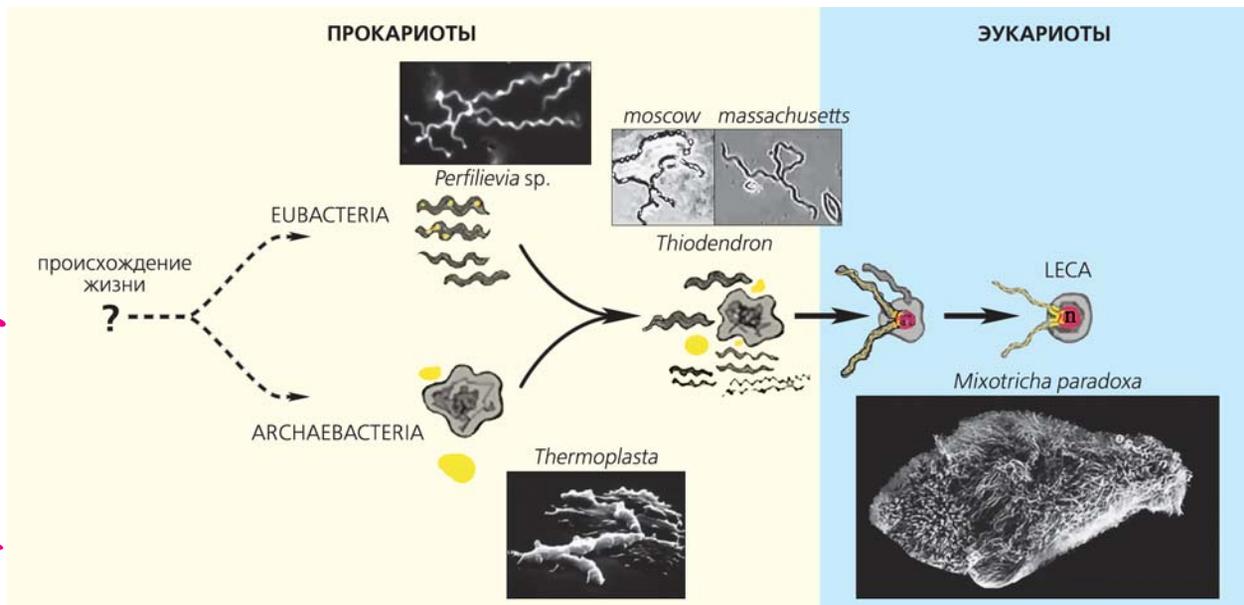


Схема происхождения эукариот по Л.Маргулис. Подвижные зубактерии-спирохеты (такие как *Perfilievia* или *Spirochaeta perfilievii*, недавно описанная Г.А.Дубининой и коллегами) и архебактерии (типа *Thermoplasma*) соединяются в консорциум типа *Thiodendron*. Спирохета становится органом движения, как у современной амёбы *Mixotricha*. LECA — последний общий предок эукариот.

чит, в этих бактериях (их клетках и генах) можно обнаружить сохранившиеся свидетельства давно ушедших времен, компоненты, вошедшие затем во всех нас. История эта еще далеко не закончена, а геном этой бактерии может подтвердить (или не подтвердить) «далековатые», как всегда, идеи Линн Маргулис.

Иногда Линн даже находила время отвечать на умные вопросы в Интернете. В 2007 г. на одном из блогов, посвященных эволюции, ей задали вопрос о том, насколько обычны симбиотические отношения за пределами микроорганизмов. Она отвечала: «Эти идеи, конечно, же относятся не только к микрокосму. Что такое корова (или бизон), неспособная питаться травой? Это — корова, умирающая с голода. Что такое подземный термит, неспособный питаться древесиной и ее переваривать? Это — мертвый термит. Существование обоих зависит от наличия обширных сообществ высокоспециализированных симбионтов, которые переваривают их пищу и приводят к изменениям в их организмах (конечно, с течени-

ем времени). Так появился рубец [у жвачных], так появился задний отдел кишечника [у термитов]. Литература об этом настолько обильна, что уже в 1924 г. Козло-Полянский написал книгу, объясняющую это. Он объединил «естественный отбор» Дарвина (который только удаляет формы жизни, но не создает их) с симбиогенезом, который и создает новые виды в пределах рода. Другие типы изменений видов включают: полиплоидию у растений, гибридизацию у морских личинок, расщепление кариотипа у млекопитающих... все они гораздо более значимы для происхождения новых видов, чем «случайные мутации». Конечно, случайные мутации оттачивают и отделяют (hone and refine) более крупномасштабные наследственные процессы, но я не знаю никаких данных, которые бы доказывали, что случайные мутации порождают эволюционные новшества, т.е. новые виды...»

В 2007 г. в своем письме в журнал «Nature» Линн и ее коллега Майкл Долан сетовали, что «из-за молекулярных деревьев» многим перестал быть виден «лес

биологии организмов». Сама же Линн предпочитала, чтобы ее называли «натуралистом», а не «биологом» (здесь трудно не вспомнить, что журнал «Природа» должен был, по первоначальному замыслу А.П.Чехова и В.А.Вагнера, называться «Натуралист»).

Замечательная черта американской университетской системы — то, что даже знаменитости не обязательно заперты в слоновых башнях своих лабораторий, а имеют возможность читать лекции начального курса — и часто, как в случае Линн, считают это своей обязанностью. На лекции ее записывались блестящие студенты — не только биологи, но и химики, геологи, астрономы.

Другим делом, на которое Линн беззаветно тратила энергию и время, было сохранение старых учебных фильмов о биологии водорослей и других протистов, их переводу в цифровой формат. Линн создала для таких фильмов особый фонд в Библиотеке Конгресса США. В 1950–1960-х годах в Америке (да и в других странах, конечно) еще имелось

много специалистов по этим группам, и с их помощью было снято на старинной киноплёнке множество таких учебных фильмов, запечатлевших поведение и привычки всяческих тварей. Сегодня, с переходом на компьютерные системы, фильмы это исчезли из употребления, да и кинопроекторов для них уже не существует. Жаль, если исчезнут эти удивительные свидетельства жизни микрокосма. Думается, и в российских университетах пылятся многие сотни метров учебных фильмов с комментариями замечательных специалистов.

В сентябре 2009 г. Линн была приглашена на Дарвиновскую конференцию в Санкт-Петербурге — одновременно праздновались 200-летие со дня рождения Дарвина и 150-летие выхода «Происхождения видов»). Ее пленарная лекция называлась «Симбиогенез, новый принцип эволюции: восстановление приоритета Б.М.Козо-Полянского (1890—1957)*». Бережно записанная на видео ее коллегой Джимом МакАллистером и воспроизведенная по записи, эта лекция сохранила прямую речь Линн, которую хочется перевести стихами.

«Сейчас я покажу вам всю мощь симбиогенеза. Начнем с янтаря. Вот ископаемый термит, *Mastotermes electrodominicus*, так хорошо сохранившийся в янтаре за 20 миллионов лет, что на срезе его можно увидеть структуру мускулов. Дэвид Гримальди из Нью-Йоркского музея естественной истории предложил посмотреть, не сохранились ли протисты-симбионты в кишечнике янтарного термита — и мы их нашли. И не только протистов: мы нашли самых древних известных спирохет! <...> А вот и видео из кишечника современных *Mastotermes*, обитающих в Национальном парке Какаду в Северной Австралии,

возле г.Дарвин. В 1956 г. профессор Л.Кливленд впервые заснял на 16-миллиметровую черно-белую плёнку протиста *Mixotricha paradoxa*, обитающего внутри этих термитов. Считалось, что у них имеются и реснички, и жгутики на одной и той же клетке! Однако же это не реснички — мы изучаем их с 1970-х годов; это симбионты-спирохеты, практически неотличимые от возбудителя сифилиса, бледной трепонемы. На одной миксотрихе сидят 250 000 маленьких трепонем. Иначе говоря, это симбиотический орган движения (motility symbiosis)! <...> А вот миксотриха и ее симбионты — пять разных типов спирохет, и еще другие бактерии, всего девять разных существ с девятью разными геномами. Без них термит не может переварить древесину. Вот крупная спирохета *Canaleparolina* с кусочком древесины внутри... Неодарвинисты, о чем же вы думаете, где же тут ваш “индивид”? (К аудиотрипу: Вы не смеетесь, наверно, не поняли, что я сказала...) Термит умирает от голода через два-три дня после удаления бактерий и протистов. Это же группа, сообщество! Конечно же, здесь идет групповой отбор.

<...> Новые виды эукариот появляются главным образом потому, что предковые формы приобретают новые геномы, которые в течение геологического времени поэтапно интегрируются в них. Лучшие современные работы на эту тему сделаны микробиологами и сельскохозяйственными энтомологами. <...> Вы знаете, наверно, давнюю книгу профессора Сорена Сонеа “Новая бактериология”. У него есть и новая книга “Прокариотология”. Сонеа — румын, всю свою профессиональную жизнь проживший в Канаде, в Квебеке. Они с коллегами пишут о всемирном геноме бактерий. Лабораторные культуры бактерий — это “терминалы” всемирной их системы, а сам компьютер, mainframe, согласно метафоре Сонеа, находится в природе. Бактерии име-

ют доступ к генам и геномам путем трансформации, конъюгации, плазмидного переноса и т.д. Значит — либо имеется один, всемирный, вид бактерий, либо же понятие видов к ним вообще не применимо».

Родственную душу Линн видела в знаменитой американской поэтессе Эмили Дикинсон (1830—1866). Случайно или нет, но они были земляками и даже соседями: дом Линн в Амхерсте (штат Массачусеттс), где она жила и работала в последние 20 лет, выходит своим задним двором на дом-музей Дикинсон. Линн — слышавшая отчаянным спорщиком и резким разрушителем общепринятых мнений — любила цитировать близкие ей строки Дикинсон:

Скажи всю Истину, но не прямо:

*Околичностью добьешься успеха.
Слишком ярка неожиданность*

Истины

Для наших некрепких восторгов.

Как ласковым объяснением

Примирают ребенка с молнией —

Так Истина должна озарять

постепенно,

Иначе мы все ослепнем.

(Перевод мой. — В.Ф.)

Две книги Маргулис и Дориона Сагана названы словами из этого стихотворения: «Slanted truths» («Истина, сказанная не прямо») и «Dazzle gradually» («Озарять постепенно»).

«Новый принцип» Козо-Полянского (1924) завершается выразительными фразами, где автор соединил цитату из Дарвина с легендарным галилеевским *Eppur si muove*:

«Даже сегодня для многих, несомненно, теория симбиогенеза покажется парадоксальной, более того — невероятной. Но ведь “когда в первый раз была высказана мысль, что Солнце стоит, а Земля вертится вокруг него, здравый человеческий смысл тоже объявил ее ложной”.

И все-таки она вертится!»

Те же слова десятилетия спустя с полным правом могла повторить Линн Маргулис. ■

* Опубликовано на английском языке в журнале «Историко-биологические исследования» в 2010 г.

Новости науки

Астрофизика

Антарктический нейтринный телескоп уточняет гипотезы астрофизиков

Нейтринный телескоп IceCube («Ледяной куб») представляет собой кубический километр прозрачного антарктического льда под Южным полюсом, внутри которого размещены 5160 чувствительных цифровых оптических датчиков. Решетка датчиков может точно измерять направление движения и энергию мюонов — тяжелых заряженных частиц, образующихся при взаимодействии нейтрино с атомами льда.

Этот телескоп сооружен на Южном полюсе международной группой ученых и инженеров из США, Германии, Швеции, Бельгии, Швейцарии, Японии, Канады, Новой Зеландии, Австралии и Барбадоса. Его строительство было завершено в декабре 2010 г., и недавно коллаборация IceCube опубликовала результаты обширной программы поиска наиболее энергичных нейтрино, которые, согласно теоретическим представлениям, могли возникать при так называемых гамма-вспышках — мощных внегалактических взрывах, служащих источниками космических лучей сверхвысоких энергий.

Космические лучи — это приходящие на Землю со всех направлений заряженные частицы высоких энергий, в основном протоны, изредка — более тяжелые атомные ядра. Большинство из них, вероятно, приобретают свою энергию

при взрывах сверхновых звезд. Однако небольшое количество космических лучей ускоряются до энергий в 100 млн раз больше тех, что достижимы в созданных учеными ускорителях, вроде Большого адронного коллайдера ЦЕРНа. Пока что есть только две основные гипотезы об источниках этих наиболее энергичных частиц: гравитационное ускорение потоков частиц вблизи сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик или же энерговыделение при коллапсе звезд с образованием черных дыр, наблюдаемом астрономами в виде гамма-вспышек.

Черные дыры в активных ядрах галактик поглощают вещество и испускают перпендикулярно аккреационным дискам мощные потоки частиц («джеты»), и эти потоки могут действовать как мощные линейные ускорители. Что касается второго возможного источника космических лучей сверхвысоких энергий, гамма-вспышек, то некоторые из них, как полагают, происходят при коллапсе сверхмассивных звезд в черные дыры, а другие — при столкновении черных дыр с другими черными дырами или с нейтронными звездами. Оба эти типа событий вызывают кратковременные, но очень яркие вспышки излучения.

Гамма-вспышки — это самые мощные во Вселенной взрывы, которые обычно сначала обнаруживаются орбитальными рентгеновскими и гамма-обсерваториями. В среднем такие вспышки происходят примерно раз в сутки, и они настолько яркие, что за-

метны на расстоянии до половины радиуса видимой Вселенной. Как правило, они длятся всего несколько секунд, и на это короткое время могут затмевать все другие небесные источники света.

Образующиеся во время этих взрывов оболочки («огненные шары») расширяются во все стороны почти со скоростью света, испуская большую часть своей энергии в виде гамма-излучения. Такие взрывы могут ускорять заряженные частицы до очень высоких энергий с помощью механизма джетов, аналогичного тому, который действует в активных галактических ядрах, но сосредоточенного в гораздо меньших объемах. Взрывы, вызванные коллапсом гигантских звезд или столкновением черных дыр, могут образовать джеты, в которых ускоряются протоны или более тяжелые атомные ядра, а ударные волны вызывают вспышки гамма-излучения. Модель «огненного шара» предсказывает также порождение потоков нейтрино сверхвысоких энергий, которые должны обнаруживаться нейтринными детекторами вскоре после того, как гамма-вспышка станет видна с Земли.

Ускоренные протоны в джетах гамма-вспышек должны взаимодействовать с интенсивным гамма-фоном и сильными магнитными полями, порождая нейтрино с энергиями около 5% от энергии протона наряду с намного более энергичными нейтрино ближе к концу процесса ускорения.

Нейтрино бывают трех разных типов, причем во время своего путешествия к Земле

одни превращаются в другие. Общий их поток можно оценить исходя из интенсивности потока мюонных нейтрино, которые детектирует IceCube. Мюоны, создаваемые этими нейтрино при взаимодействии со льдом, могут до своего поглощения пройти сквозь толщу льда до 10 км. Поэтому многие события взаимодействия нейтрино со льдом, детектируемые нейтринным телескопом, происходят за его пределами, что существенно увеличивает апертуру установки.

Телескоп осуществляет наблюдения с помощью более чем 5000 оптических датчиков, сконструированных, изготовленных и испытанных физиками и инженерами Berkeley Lab. Эти датчики регистрируют слабое свечение от каждого пролетающего мимо них мюона и отличаются замечательной надежностью. Почти ни один из них не вышел из строя после их установки, 98% работают идеально и еще 1% дает полезную информацию. Сейчас они заморожены в лед вплоть до глубины 2.5 км под поверхностью ледника и останутся там навсегда.

IceCube регистрирует в миллион раз больше треков мюонов, движущихся во льду сверху вниз, чем снизу вверх. В основном это осколки от реакций, вызванных или прямым падением первичных космических лучей на поверхность, или вторичными продуктами столкновений космических лучей с атомами в толще атмосферы. Однако мюоны, движущиеся вверх, указывают на нейтрино, прошедшие земной шар насквозь. Когда телескоп ищет яркие источники нейтрино на северном небе, наша планета представляет собой прекрасный фильтр.

Целая сеть спутников обращается вокруг Земли и ежегодно посылает сигналы о более чем 700 гамма-вспышках, выделяющихся на фоне слабого космического фона. Времена

этих вспышек регистрируются, их координаты на небесной сфере вычисляются триангуляцией, и полученные данные рассылаются международной группой исследователей. Некоторые вспышки длятся менее 2 с, другие — несколько минут. Порожденные ими нейтрино должны прибыть к IceCube во время вспышки или вскоре после неё.

Прецизионная регистрация нейтринным телескопом времени прибытия частиц и их заряда, а также его огромный размер позволяет точно определить, откуда пришло каждое нейтрино, подчас с погрешностью до 1°. Нейтрино от гамма-вспышки должно оставить трек во льду, направление которого с точностью около 1° указывает положение гамма-вспышки на небесной сфере.

Группа исследователей, обслуживающая IceCube, просеяла данные о 307 гамма-вспышках за два периода времени в 2008 и 2009 гг., когда сооружение телескопа еще не было завершено, ища записи о треках мюонов, совпадающих по времени и направлению с гамма-вспышками. (К 2008 г. было установлено 40 гирлянд по 60 оптических датчиков на каждой, а к 2009 г. — 59 таких гирлянд; в окончательном виде IceCube содержит 86 гирлянд.) Модель «огненного шара» предсказывает, что после суммирования ожидаемых потоков по всей выборке событий должно быть зарегистрировано в среднем не менее 8.4 связанных с ними мюонов в пределах телесного угла 1° от каждой гамма-вспышки в течение нескольких секунд или минут ее наибольшей яркости.

Различные варианты расчетов нейтринных потоков от гамма-вспышек основаны на слегка разных допущениях о том, как рождаются нейтрино, и на неопределенностях относительно того, как быстро движется ударная волна

«огненного шара» в сторону наблюдателя. Среди опубликованных расчетов самая низкая оценка потока нейтрино составляет около четверти того, что предсказывает модель «огненного шара». Однако до сих пор не удалось обнаружить ни одного нейтрино, связанного с гамма-вспышками. Тем самым прямые наблюдения впервые смогли существенно ограничить возможные модели внегалактической астрофизики.

Nature. 2012. V.484. №7394. P.351–354 (Великобритания).

Молекулярная биология. Теория эволюции

Простой путь к сложности

Главную роль в биохимических процессах, протекающих в живой клетке, играют так называемые молекулярные машины — комплексы из нескольких белков, очень точно подходящих друг к другу по размерам и форме и потому способных к самосборке сложной конфигурации, выполняющей разнообразные специализированные функции. Могут ли столь сложные конструкции появляться за счет случайных мутаций? Этот вопрос возник очень давно, как только Дарвин сформулировал теорию эволюции посредством естественного отбора ненаправленных (случайных) изменений. Но и до сих пор, несмотря на значительный прогресс в понимании того, как сложные структуры могут возникать в ходе простых и весьма вероятных процессов, общего решения пока не существует.

Такая ситуация приводит к многочисленным философским спекуляциям, неприятию естественнонаучного объяснения эволюции жизни и лежит в основе одного из направлений креационизма. Оно утверждает, что несводимая сложность живого доказывает

необходимость сверхъестественного вмешательства в эволюционный процесс — наличия разумного плана («intelligent design»). И хотя никакое количество частных биологических примеров не может разрешить этот идейный спор, теория эволюции несомненно нуждается в расширении набора известных способов возникновения сложности в результате сочетания случайных мутаций и отбора.

Группы ученых из Чикагского университета и Университета штата Орегон под руководством Дж. Торнтона (J. Thornton) недавно описали еще один такой способ. Исследователи воссоздали и экспериментально охарактеризовали все белки одной из молекулярных машин живой клетки непосредственно перед тем и после того, как эта структура усложнилась.

Предметом исследования был молекулярный комплекс, называемый АТФ-зависимой протонной помпой. Она помогает поддерживать необходимый уровень кислотности внутри разных внутриклеточных компартментов. Одна из главных деталей комплекса — кольцо, сквозь которое ионы водорода переносятся через разделяющие компартменты мембраны. У большинства видов эукариот это кольцо образовано шестью белковыми субъединицами — копиями двух разных белков, но у всех грибов в него входит еще один, третий тип белка.

Чтобы понять, как усложнялась структура кольца, Торнтон и его коллеги воссоздали предковые варианты всех белков кольца. Для этого использовался крупный кластер компьютеров, позволивший проанализировать последовательности ДНК, кодирующие 139 современных вариантов белков кольца, и проследить их эволюцию назад по времени вдоль дерева филогенетических линий, чтобы вычислить

наиболее вероятные предковые последовательности*. Затем эти древние гены синтезировали биохимически и изучили их экспрессию в современных дрожжевых клетках.

Исследователи обнаружили, что третий компонент белкового кольца протонной помпы, свойственный грибам, возник, когда ген, кодирующий одну из субъединиц более древнего, двухбелкового кольца, был дублирован, и дочерние гены затем разошлись по своим собственным эволюционным траекториям. Предшествовавший дубликации предковый вариант оказался универсальнее каждого из его потомков: его экспрессия в современных дрожжах восстанавливала их способность к росту в тех случаях, когда тот прекращался из-за делеции любого одного или обоих генов-потомков, кодирующих белковые субъединицы кольца. Напротив, каждый из воссозданных генов, возникших после дубликации, мог компенсировать утрату лишь одного из белков кольца. Исследователи сделали вывод, что функции предкового гена были разделены между копиями дублированного гена, и сложность кольца возросла в результате утрат белками исходных функций, а не приобретения их потомками новых функций.

Сконструировав набор предковых белков, сцепленных друг с другом в определенных ориентациях, исследователи установили, что дублированные белки утратили способность взаимодействовать с некоторыми другими белками кольца. Если предшествовавший генной дубликации предковый белок мог за-

нимать пять из шести возможных позиций внутри кольца, то продукт каждого из дублированных вариантов гена потерял способность занимать некоторые позиции, присущие другому варианту, так что оба превратились в незаменимые компоненты работоспособного комплекса.

Исследователи также попытались выявить конкретные генные мутации, приведшие к утрате потомками некоторых функций. Повторно введя в предковый белок мутации, возникшие после дубликации кодирующего его гена, они обнаружили, что лишь одной точковой мутации в каждой из двух линий оказалось достаточно, чтобы разрушить их исходные функции и сделать необходимым включение в кольцо трех различных белков.

По словам Торнтона, этот усложняющий механизм удивительно прост. Дубликации генов в клетках происходят нередко, и ошибки копирования ДНК легко нарушают способность одних белков взаимодействовать с какими-то другими белками. Нет никакой необходимости, чтобы в ходе эволюции возникла некоторая специфическая комбинация 100 мутаций для появления некой новой специфической функции.

Торнтон предположил, что благодаря накоплению простых дегенеративных изменений за долгое время могли сформироваться многие молекулярные машины, встречающихся в современных организмах. Подобный механизм служит аргументом против концепции «несводимой сложности», защищаемой сторонниками разумного проектирования. Торнтон полагает, что новые подобные исследования позволят проследить аналогичную динамику и в эволюции других молекулярных комплексов. Это группы молекул, которые случайно оказались сцепленными друг с другом в ходе эволюции

* Такой метод коалесценции (схождения) филогенетических линий был разработан для реконструкции предковых форм отдельных генов. В данной работе его впервые применили для воссоздания всех компонентов молекулярной машины.

и сохранились из-за того, что они помогали нашим предкам выжить.

Nature. 2012 (DOI: 10.1038/nature10724).

Молекулярная биология

Новый уровень пространственной организации хромосом

Хромосомы — весьма длинные нитевидные молекулы ДНК, компактно уложенные внутри клеточного ядра, поперечник которого не превышает нескольких микрометров. Эта укладка не хаотична, а строго упорядочена. Уже несколько десятилетий известно, что индивидуальные гены намотаны, как на катушки, на круглые «сердечники», называемые нуклеосомами, что создает классическую структуру «бусы на нитке». В исследовании под руководством Э.Хёрд (E.Heard; Институт Кюри, Франция) и Дж.Деккера (J.Dekker; Медицинская школа Университета штата Массачусетс, США) выявлен новый уровень сложной пространственной упаковки хромосом в живой клетке. Обнаружено, что эти «бусы на нитке» скручены в клубки. Такая доменная организация хромосом представляет собой ранее неизвестный, более высокий уровень укладки, который, по мнению исследователей, служит фундаментальным принципом организации геномов.

Хромосомные клубки имеют длину от нескольких сотен тысяч до миллиона пар оснований (полная длина генома человека — свыше 3 млрд пар оснований). Настоящей неожиданностью стало то, что эта пространственная укладка хромосом связана с их функциональной организацией. Каждый клубок содержит группу (до 10 штук) взаимодействующих генов и регуляторных элементов, а их близкое соседство внутри клубка обеспечивает им контакт друг

с другом и позволяет работать согласованно в процессе развития организма. Группа генов одного клубка с высокой вероятностью будет контактировать с одной и той же группой регуляторных элементов, что может привести к согласованной активности этих генов в ходе онтогенеза.

Новые наблюдения проливают свет на долго не поддававшуюся решению загадку молекулярной генетики: почему некоторые мутации ДНК влияют на активность генов, расположенных на расстоянии нескольких тысяч или даже миллиона пар оснований друг от друга? Клетка содержит огромное количество генов, так что включать и выключать их в нужном порядке — очень непростая задача. Собирая группы генов в изолированные домены так, чтобы они не смешивались и не мешали друг другу, клетка значительно упростила задачу независимого регулирования активности этих групп.

Однако повреждение одного из этих внутрихромосомных клубков может привести к неправильному поведению всех генов клубка. Трехмерная укладка хромосомы позволяет сблизить далеко отстоящие друг от друга вдоль нити ДНК генетические элементы, так что они могут функционально взаимодействовать. В определенные моменты онтогенеза это позволяет точно синхронизировать активности генов, разделенных тысячами пар оснований в линейном порядке молекулы ДНК, так как физически они окажутся соседями внутри хромосомного клубка. Недостаток этого типа организации — то, что одиночная мутация, изменяющая конфигурацию клубка, может подействовать на целую группу генов.

Хотя первоначально этот новый уровень укладки нити ДНК был обнаружен авторами работы при изучении критически важного участка X-хро-

мосомы, ее так называемого центра инактивации, дальнейшие исследования других групп показали, что такой принцип организации более универсален и распространяется на полные геномы мыши и человека.

Кроме прогресса в понимании фундаментальной биологии хромосом, эти исследования также открывают новые направления изучения некоторых болезней, вроде генетических заболеваний, которые вызваны мутациями ДНК, нарушающими активность определенных генов. Иногда эти мутации происходят не в самом гене, а затрагивают один из регуляторных элементов где-то в расширенной хромосомной окрестности этого гена. Искать такие мутации по всей длине хромосомы не легче, чем иголку в стоге сена, потому что неизвестно, какие гены связаны с теми или иными регуляторными элементами. Теперь поиск таких мутаций может быть сосредоточен на том участке хромосомы, в котором скорее всего расположены регуляторные элементы неправильно функционирующего гена, т.е. на том хромосомном клубке, к которому он принадлежит.

Nature. 2012. №485. P.381–385 (DOI:10.1038/nature11049).

Климатология

Малый ледниковый период был вызван вулканами?

В работе группы климатологов из Университета штата Колорадо в Боулдере (США), выполненной в сотрудничестве с Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) и другими организациями, получены данные, указывающие на то, что необычное сочетание четырех крупных извержений тропических вулканов на протяжении 50 лет спровоцировало начало малого ледни-

кового периода (МЛП) между 1275 и 1300 гг. Череда холодных лет после этих извержений лучше всего объясняется распространением на юг арктического морского льда, приведшим к ослаблению морских течений в Северной Атлантике.

В палеоклиматических реконструкциях использовались данные о распространении вымерзшей растительности и колонки озерных донных отложений. Впервые были получены точные датировки эпизодов резкого похолодания, отмечающих начало МЛП. На основании анализа климатических моделей предложена система положительной обратной связи, в течение длительного времени поддерживающая наступившее похолодание ослаблением меридиональной циркуляции океанских вод в Северной Атлантике.

На о.Баффинова Земля в Канадской Арктике в результате отступления ледника за последние десятилетия обнажилось ледниковое ложе, на котором исследователям стали доступны остатки растительности, погребенные под льдом в начале МЛП. Надземные части растений были разрушены в недавнее время замерзанием и оттаиванием, но корневая система хорошо сохранилась в многолетней мерзлоте. Было датировано около 150 образцов отмерших растений с сохранившимися корнями, собранных у границы ледника. Полученные датировки образуют обширный кластер «дат вымерзания» между 1275 и 1300 гг. Стало понятно, что похолодания были настолько резкими и внезапными, что корни растений

не успели разложиться и растения вмержли в лед наступавшего ледника. Это позволило точно датировать радиоуглеродным анализом эпизоды сильного похолодания, маркирующие наступление МЛП. Климатическая система подверглась тогда целой череде таких резких похолоданий, случившихся за сравнительно короткий период времени – примерно за 50 лет.

Для подтверждения глобального характера и датировок этих похолоданий изучены колонки донных отложений из ледникового озера, связанного ледовым куполом Лангджокулисе на центральной возвышенности Исландии; толщина ледника составляет около мили. Годовые слои этих отложений можно надежно датировать по отложениям вулканического пепла из известных по историческим хроникам извержений исландских вулканов (они охватывают период более 1000 лет). Годовые слои в колонках донных отложений ледникового озера внезапно становятся толще в конце XIII в. и затем в XV в. из-за усиления эрозии поверхности вследствие наступления ледника, вызванного похолоданием климата. Это указывает на то, что климатический сигнал, полученный из данных о.Баффинова Земля, отражает не местное, а по меньшей мере региональное похолодание во всей Северной Атлантике, внезапно наступившее в конце XIII в.

Для проверки предположения, что череда холодных лет, связанных с сильными вулканическими извержениями, может привести к долговре-

менному похолоданию, группа использовала модель климата, разработанную климатологами из NCAR в сотрудничестве с другими организациями и моделирующую воздействие глобального похолодания из-за вулканических извержений на площадь и массу арктического морского льда. Эта модель, описывающая различные ледниковые обстановки в арктическом бассейне с 1150 до 1700 г., показала, что несколько крупных, произошедших за короткий период времени вулканических извержений могли охладить Северное полушарие достаточно сильно, чтобы вызвать расширение площади арктического морского льда.

Модель показала, что продолжительное похолодание, вызванное вулканическими извержениями, привело бы к смещению границы морского льда на юг вдоль восточного побережья Гренландии, где он начал таять, распресняя поверхностный слой морской воды. Это уменьшило плотность поверхностных вод и ослабило их способность смешиваться с более глубинными водами Северной Атлантики. Это, в свою очередь, ослабило перенос тепла в арктический бассейн и создало положительную обратную связь, поддерживающую похолодание в Северной Европе и Канадской Арктике и экспансию морского льда на юг еще долгое время после того, как нижние слои стратосферы очистились от блокирующих солнечный свет вулканических аэрозолей.

Geophysical Research Letters. 2012. V.39. P.L02708 (США).

Разгаданная «тайна» академика Королева

В.С.Губарев
Москва

Я выбрал из жизни Сергея Павловича Королева три мгновения, которые символизируют как его судьбу, так и представление о ней близких. И в первую очередь дочери.

Десятилетний мальчик пишет отчиму:

«Милый папа! Я и мама здоровы... Я хочу написать тебе стихотворение.

В КУЗНИЦЕ

*Падает молот тяжелый,
Искры летают снопом,
С песней веселой
Плуг мы на славу куем.
Бейте же крепко, покрепче,
Здесь не жалейте труда.
Пахарю будет полегче,
Вознаградит всех земля.*

Я занимаюсь искусством и рисую красивые картинки...».

Проходит 22 года. Это было время, когда почти все заключенные обращаются к верховному прокурору Союза ССР, требуя справедливости. Обратный адрес одного из них: «ДВК. Нагаево. Берелех. Лагпункт прииска Мальдяк».

Для несведущих: Мальдяк — это золотой прииск. Он находился в семистах километрах к северу от Магадана. Путь лежал сначала по Колымскому тракту, потом по грунтовке до Сусумана, а за ним направо на Мальдяк. Золото добывали на глубине сорока метров. «Отколотую кирками породу лопатами насыпали в тачки, доставляли к подъемнику, поднимали по стволу вверх и тачками по проложенным доскам подвозили к бутарам. На столь тяжелую ра-

боту посылали, как правило, «врагов народа». Среди них был и отец...»

В письме прокурору он писал: «...Я неоднократно заявлял на следствии, писал наркому внутренних дел СССР и верховному прокурору, а также категорически заявил на суде и заявляю еще раз сейчас, что я никогда, нигде и ни в какой антисоветской организации не состоял и ничего об этом не знал и не слышал. Мне 32 года... Я вырос при советской власти и ею воспитан. Все, что я имел в жизни, мне дала партия Ленина—Сталина и советская власть. Всегда, всюду и во всем я был предан генеральной линии партии, советской власти и моей советской Родине».

И еще одно мгновение жизни. В тот день, когда он ушел в бессмертие, соратники, друзья и коллеги написали дочери:

«...Ваш отец был не только замечательным ученым-энтузиастом межпланетных полетов, талантливым конструктором, неутомимым организатором и общественным деятелем. Он был настоящим Человеком. Он был самым близким нашим товарищем, отзывчивым и внимательным, принципиальным и требовательным...»

Мы знаем, Сергей Павлович горячо любил Вас. Он часто говорил о Вас с большой нежностью и едва уловимой грустью. Обожал он и Андрюшку и гордился им. И мы не сомневаемся, что Вы воспитаете своего сына похожим на деда — характером, мыслями и делами...».

Три мгновения из очень короткой жизни — ведь он прожил

всего 60 лет! Почему именно на его долю выпали все страдания и радости народа в XX в.?

Ответ искали многие, но нашла только его дочь. К счастью для всех нас, потому что иначе мы не смогли бы понять всю глубину подвига человека, который вывел цивилизацию в космос. Он освободил человечество от земных оков, разорвал их и открыл нам просторы Вселенной: летайте, познавайте, овладевайте!

Этот человек — Сергей Павлович Королев.

А дочь его Наталья Сергеевна помогла нам понять его душу, чувства, мысли, характер и отношения с окружающим миром.

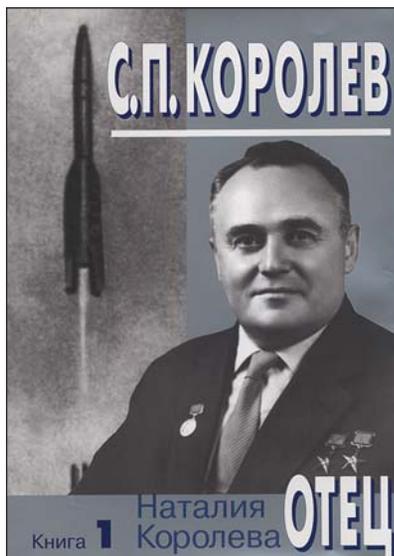
В лагере на Колыме каждое утро он начинал с зарядки. Товарищам по несчастью говорил, что ему предстоят великие дела.

Только дочь смогла рассказать нам, почему он был в этом убежден.

Три тома «С.П.Королев. Отец», подготовленных издательством «Наука», раскрывают нам удивительный мир, который был бы навсегда скрыт от нас, если бы у Сергея Павловича Королева была другая дочь. Впрочем, я не прав: она просто не могла быть другой! Как и все нестандартное, великое, почти фантастическое, что связано с делами и жизнью Главного Космического Конструктора человечества.

Он жил стремительно, будто зная, что ему отведено всего 60 лет.

Он считал, что настоящая мечта не должна иметь границ, а потому космические путешествия были для него повседневностью, хотя никто еще не мог преодолеть земного притяжения.



Он умел увлекать своими идеями, и тысячи людей работали «от гимна до гимна», не подозревая, что есть день и ночь, праздничные и выходные дни.

Он шагал впереди, и, казалось, не существует преград, способных его остановить.

Он так и погиб, мгновенно и неожиданно, как это бывало с его ракетами, которые иногда взрывались при старте. Но можно сделать новые ракеты, а найти ему достойную замену было невозможно, и дальнейший ход истории лишь подтвердил, что незаменимые все-таки есть!

Сегодня мы четко знаем, что XX в. стал для цивилизации «веком космоса», а, значит, и «веком Королева».

В канун 100-летия со дня рождения Сергея Павловича Королева я выпустил книгу «Русский космос». Это рассказ о самом великом конструкторе, о его соратниках и друзьях. Мне хотелось показать, что все великие достижения — от запуска первого искусственного спутника Земли и Юрия Гагарина до полетов орбитальной станции «Мир» и экспедиций к Луне, Венере и Марсу — так или иначе связаны с именем академика Королева. Когда я работал над книгой, то понял, что никаких доказательств просто не нужно:

во всех достижениях мировой космонавтики есть присутствие Королева. Причем не только в том, что уже осуществлено на ближних и дальних орбитах, но даже в проектах, которые только начинают рождаться в умах ученых, конструкторов и космонавтов.

В юбилейные дни появится много статей, фильмов и телепередач о Королеве и космонавтике. Но сколько бы их ни было, все равно, будет недостаточно, потому что невозможно представить будущее человечества без космоса. Чтобы прорваться в него, надо было быть гением. Быть Сергеем Павловичем Королевым.

Он жил стремительно, будто зная, что ему суждено остаться в веках.

Мы — писатели, журналисты, сценаристы и режиссеры — смотрели на Сергея Павловича как бы со стороны, будто всегда на его пиджаке сверкали «Золотые Звезды» и лауреатские знаки. Но в жизни-то он надевал их очень редко, только по праздникам и на официальные мероприятия. А мы пытались писать и рассказывать о нем только так, и потому для большинства читателей и зрителей он оставался далеким, недоступным и непонятным: мол, у гениев своя судьба.

Н.С.Королева. С.П.КОРОЛЕВ: ОТЕЦ. К 100-летию со дня рождения: В 3 кн. Совет РАН по космосу.

М.: Наука, 2007. Кн.1: 1907—1938 годы. 360 с. Кн.2: 1938—1956 годы. 314 с. Кн.3: 1957—1966 годы. 253 с.

Дочь Королева возвратила нам и будущим поколениям Сергея Павловича открытым, человеческим, таким, каким он был в жизни. Мы ведь любим и уважаем людей, а не памятники.

Она сделала то, на что, пожалуй, не способен никто. Отставив в сторону собственные заботы, повседневные трудности, научные поиски (Наталья Сергеевна — доктор наук), житейские будни, дочь «погрузилась» (другое слово трудно придумать!) в жизнь отца, пройдя его путь от детства до стартовых площадок. Ох, как ей было нелегко! И не только на колымских трактах или в «шарашках» Омска и Казани, но и в борьбе за новые ракеты, за аппараты, которые поднимали на орбиты Юрия Гагарина и уходили к красным пескам Марса, облакам Венеры и кратерам Луны.

Для того чтобы писать об отце честно и открыто, надо было все происходящее переживать вместе с ним. Наталья Сергеевна делала это откровенно, а главное — искреннее. Все-таки исповедь родственных душ! А потому книга «Отец» поражает своей искренностью, и благодаря этому к каждому слову испытываешь полное доверие.

Мне довелось быть свидетелем начала космической эры. Я самоуверенно полагал, что мне известно о Сергее Павловиче

настолько много, что удивить чем-то уже невозможно. К тому же мой друг, талантливый писатель и журналист Ярослав Голованов написал объемный труд «Королев». Что греха таить, его книгу я читал внимательно, пытаясь раскрыть «тайну Королева». Но так она мне и не открылась, даже когда я перевернул последнюю страницу.

Почему именно он? Как он выстоял? Почему шел вперед, не оглядываясь на прошлое: не забывая его, но и не остава-

ясь в нем? Наконец, как судьба выбирала его, а он — ее?

Книга «С.П.Королев. Отец» ответила на все эти вопросы. И я уверен, что написать ее могла только дочь, которая, на мой взгляд, совершила человеческий и гражданский подвиг, потому что никто иной не мог так рассказать о Сергее Павловиче. Это и есть, пожалуй, главная «тайна Королева».

Теперь, уверен, наши внуки и правнуки лучше поймут, почему мы первыми вышли в космос. ■

Астрофизика

В.Г.Сурдин. РАЗВЕДКА ДАЛЕКИХ ПЛАНЕТ. М.: Физматлит, 2011. 352 с.

Мечта каждого астронома — открыть новую планету. Раньше это случалось редко (одна—две за столетие), но в последнее время стало происходить очень часто. Точного количества планет уже не знает никто. Наши предки знали. С древности и вплоть до середины XVI в. планет было семь. Точнее, пять «настоящих» планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн), плюс Луна и Солнце (тоже называвшиеся тогда планетами) — итого семь. Но после того как Коперник «переместил» центр мира от Земли к Солнцу, Земля тоже перешла в разряд планет, но Солнце стало центральным светилом, а Луна — спутником Земли, так что количество планет уменьшилось до шести. В конце XVIII в. В.Гершель открыл Уран — планет вновь стало семь. В середине XIX в. был открыт Нептун, а спустя век — Плутон. Нынешнее поколение с детства знает, что в

Солнечной системе девять планет. Всю вторую половину XX в. ученые искали десятую планету. Наконец открытие состоялось, и планет стало... восемь. Астрономы решили, что Плутон и похожие на него тела — не настоящие планеты, а карликовые. Их в Солнечной системе обнаружено уже немало.

Автор книги рассказывает о том, как велись и ведутся поиски больших и малых планет в Солнечной системе и вдали от нее, какая техника для этого используется, что помогает и что мешает астрономам в этой работе. И о том, как дают имена планетам и какие открытия ждут ученых в будущем. В приложении приведены точные данные о планетах, созвездиях и крупнейших телескопах.

История науки

МОСКОВСКИЙ АСТРОНОМ НА ЗАРЕ КОСМИЧЕСКОГО ВЕКА: Автобиографические заметки А.А.Гурштейна. М.: НЦССХ им.А.Н.Бакулева РАМН, 2012. 686 с.

Будучи непосредственным участником событий, автор

книги подробно излагает историю исследований Луны в СССР. Им рассматриваются непростые взаимоотношения в советском космическом истеблишменте. Последние главы посвящены жизни А.А.Гурштейна в США, куда он был приглашен на преподавательскую работу в 1995 г. Уделено внимание бытовым подробностям и живым зарисовкам реалий времени, включая, например, судьбу московского народного ополчения 1941 г., историю столичного планетария, злодейское убийство С.М.Михоэлса, денежные реформы и ограбление вдовы писателя Алексея Толстого.

Книга автобиографична. Однако это рассказ не только о себе и своих близких, но и о времени, в котором довелось жить. Как коренной москвич, автор знакомит читателей с любопытными достопримечательностями столицы, вспоминает о личных встречах с выдающимися деятелями науки и культуры: М.В.Келдышем, С.П.Королевым, П.Л.Капицей, И.С.Шкловским, Э.Г.Казакевичем, А.Д.Салыньским, К.П.Флоренским, Б.В.Раушенбахом и многими другими.

Первый русский вулканолог — В.А.Петрушевский

Встречи с забытым

А.Б.Белоусов, М.Г.Белоусова,

кандидаты геолого-минералогических наук
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
г.Петропавловск-Камчатский

В 2009 г., во время подготовки к полевым работам в Индонезии, мы читали прекрасную научно-популярную книгу С.Винчестера (S.Vinchester) «Кракатао». Там среди многих интересных фактов отмечалось, что название Анак Кракатау (Дитя Кракатау) для нового вулканического островка, появившегося в кальдере Кракатау в 1928 г., дал русский вулканолог Владимир Петрушевский. Мы знаем историю отечественной вулканологии достаточно хорошо, но это имя было нам абсолютно неизвестно. Удивляла и дата — никаких экспедиционных работ на вулканах, да еще и за границей, АН СССР, по понятным причинам тогда не проводила. Первая специализированная вулканологическая экспедиция на Камчатку, которой руководил академик А.Н.Заварицкий, состоялась только в 1931 г. Камчатская же вулканологическая станция им.Ф.Ю.Левинсон-Лессинга, с созданием которой принято связывать рождение вулканологии в России, начала работу 1 сентября 1935 г. Так кто же такой этот Петрушевский, и как он оказался на Малайском архипелаге в начале бурного XX в.?

Всезнающий Интернет оказался немногословен. Google упорно выдавал информацию, что Владимир Петрушевский (1891—1961) — гусар, поэт и общественный деятель. Это, казалось, не соответствовало цели нашего поиска. И только вчи-

тавшись в его биографию, обнаруживаем: «...Был в армии адмирала Колчака. В 1920-м из Владивостока эвакуировался на о.Яву, где с 1921 по 1950 г. работал в Горном департаменте...». Так вот почему о нем в СССР ничего не было известно! Далее сообщалось: «...Проявил недюжинную волю, целеустремленность, подлинный талант организатора и исследователя... имел на своем попечении 130 вулканов, принимал участие в 280 экспедициях... изъездил, исходил и облетал острова Яву, Суматру, Целебес, Борнео, Бали и ряд островов Океании. В обязанности входило давать заключение о характере поведения вулкана и соответствующие рекомендации относительно эвакуации местного населения и ее сроков. Пройдя последовательно все ступеньки служебной лестницы, закончил свою профессиональную деятельность начальником Геологической службы разведки вулканов...». И о таком человеке в России не знают даже специалисты-вулканологи!

Приведенные цитаты взяты из предисловия к сборнику стихов Петрушевского, опубликованном вскоре после его смерти в Австралии в 1961 г. (переизданном в 2004 г.), который оказался практически единственным общедоступным свидетельством его многолетней работы на вулканах. Желая узнать больше о таком неординарном человеке, мы решили разыскать его потомков. Удивительно, но это оказалось довольно просто. Дело в том, что написание фами-



Кавалерист, полковник в армии Колчака. Владивосток. 1918 г.

лии на английском языке унаследовало голландскую транскрипцию — Petroeschewsky. И мы смогли найти именно тех Петрушевских, которых искали. Вскоре мы связались с сыном исследователя Сергеем, живущим в Австралии, недалеко от г.Брисбана. Сергей Владимирович бережно сохранил архив своего отца, содержащий множество уникальных фотографий, рисунков и дневников.

Далее мы расскажем о вулканологической части многогранной деятельности Владимира Петрушевского, которую проиллюстрируем небольшими выдержками из его дневников и стихов.

Дворянский род Петрушевских до большевистского

ГУСАРЬ НА ВУЛКАНЕ

Хорошо у меня на вулкане,
 Где вдали отъ вражды и страстей,
 Я живу, какъ въ чудесномъ романе,
 Лишь съ мечтою волшебной моей.
 Ветеръ шепчетъ мне дивныя сказки,
 Тучи ходять ко мне на поклонъ,
 По утрамъ мне эфирныя краски
 На востоке дарить небосклонъ.
 И трубять и гудять сольфатары,
 Извергая клубящийся паръ,
 Какъ въ минувшіе годы фанфары
 Въ Лету канувшихъ черныхъ гусаръ.
 Кратеръ, въ виде гигантской подковы,
 Изверженія тайну хранить
 И лежать на немъ лавы оковы
 И, какъ золото, сера блестить.
 Если жъ тучи внезапно заплачуть,
 Засверкають зигзаги огней,
 Водопады, какъ серны, поскачуть,
 Пробираясь межъ скаль и камней.
 Близъ бивака, въ лесу орхидеи,
 Кружева безконечныхъ лианъ,
 Ночью звезды во тьме, какъ камеи,
 Какъ безсмертныхъ гусаръ доломанъ.
 Мне поеть о любви серенады
 Соловьевъ экзотическихъ хоръ
 И трещать мне легенды цикады,
 По цветамъ совершая дозоръ.
 А колибри, такія малютки
 Не страшась подлетаютъ ко мне,
 И сгорають за сутками сутки
 Въ солнца вечнаго яркомъ огне.
 Лишь порою лазурныя дали,
 Где безбрежный лежитъ океанъ,
 Мне напомнить о вечной печали
 И окутаеть душу туманъ.
 Хорошо у меня на вулкане,
 Въ ясный день онъ красивъ безъ прикрасъ,
 Я живу, какъ въ чудесномъ романе,
 Но... на родине лучше въ сто разъ.

derzoek) при Горном управлении. В момент приезда Петрушевского служба активно развивалась, и ему повезло. Он смог найти там квалифицированную работу. Из дневника:

Батавия, 1–3 марта 1921 г. Был у вице-губернатора, которая сама взялась найти мне службу. Она дала письмо. Вчера я снес его, а сегодня принят в Горное управление на 320 гульденов со всеми добавками и 4 марта должен выехать в центр Явы на вулканы. Я доволен, что есть служба. Об остальном не знаю пока. Занимался покупкой вещей. Купил походную кровать, плед, горные ботинки и т.д. Обошлось в 150 гульденов.

Работа в Горном управлении не только давала средства к существованию, но и соответствовала его душевному складу. Частые экспедиции в дикие горные районы с красивейшей, нетронутой природой требовали отличной физической подготовки и умения действовать в опасных для жизни ситуациях. Как военный офицер, Владимир знал топографию, химию, физику, разбирался в технической документации, хорошо рисовал и, что очень важно, был привычен к походной жизни. Эти качества компенсировали отсутствие специального геологического образования, которое он впоследствии постепенно приобретал в процессе практической работы на вулканах.

Некоторые разрозненные сведения имелись в то время только о наиболее активных вулканах Ост-Индии, большинство же их никогда не посещались учеными. На первом этапе работа носила больше географический характер. Надо было найти или проложить тропы в кратеры вулканов, зарисовать, сфотографировать, сделать топографические карты, нанести положение фумарол и горячих источников, измерить их температуру.

Первые несколько лет Петрушевский практически непрерывно находился в экспедици-

ях. Выдержки из дневника дают представление о характере его работы:

Остров Бали, вулкан Батур, 8 апреля 1921 г. ...Сегодня доктор (Джорж Кеммерлинг — первый директор службы. — Авт.), резидент и я в сопровождении кули-носильщиков отправились в 7 часов утра на большой Батур. Шли без тропы. В кратере у него есть площадка. Сам кратер глубокий, 120—130 м. Из дыр и щелей струится сернистый горячий газ. С края кратера делали снимки действующего вулкана. Дорога ужасна. Лава острая, как игла, и царапает обувь. Поднимались одним путем, а спускаться стали другим, я с двумя туземцами попал в такое ущелье, что два раза еле-еле спустились с обрыва крутизной 80 градусов. Вечером не было тумана, и можно было видеть вулкан во всей красе — беспрерывный фейерверк.

Остров Сангир, вулкан Аву, 18 мая 1921 г. Пытаемся работать, но каждый день дождь. Утром доктор ушел вниз в город, а я остался на две недели один с восемью арестантами (в качестве носильщиков. — Авт.). Запасся ананасами и кокосами. Ананасы ем во всех ви-

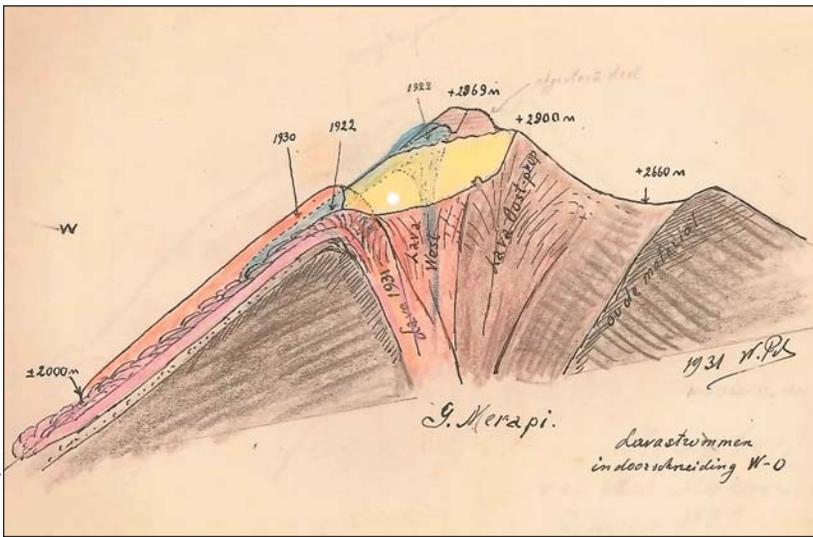
дах — соленые, жареные, с супом и с рисом. Есть три куры и консервы. В «резерве» даже пиво и виски. По вечерам в палатку налетают тараканы. Удивительно, как наш русский, а летает... Надо закончить обмер кратера, тогда пойдем вниз к морю и вокруг острова. С 3 до 5 часов был перерыв дождя, и мне удалось немного порисовать — это моя работа. Вот никогда не думал быть художником.

Больше всего приходилось работать на вулкане Мерапи (о.Ява) — одном из наиболее активных и опасных. Уже тогда его окружало плотное кольцо деревень и рисовых полей, которые поднимались высоко по склонам, и почти каждое извержение сопровождалось гибелью людей. Работа была очень опасной. Из дневника:

Мерапи, 27 марта 1921 г. Утром опять лазил на вулкан и зарисовал еще раз кратер. Я думаю, что скоро вулкан заработает так сильно, что будет плохо. Вокруг кратера масса дымков, и лаву он извергает иногда так сильно, что страшно становится. Сегодня в момент, когда я нагнулся над краем, он так ахнул, что мою шляпу точно сорвало с головы.



Готов к восхождению на вулкан.



Геологический разрез через вулкан Мерапи. Выполнил В.А.Петрушевский. 1931 г.

18 февраля 1922 г. С ночи вулкан был беспокоен и выбрасывал камни. Утром он был покрыт облаками. Еще по дороге к вулкану я слышал громкие удары у вершины. В 10 часов утра я и мой кули с фотоаппаратом были у места, докуда докатываются камни. Я посидел минут 40 — ничего не видно. Только начали спускаться, как опять удары. Было 10:45. Я уже спустился на дно глубокого оврага р.Блонкенг. Кули оглянулся и закричал: «Газ уже близко. Надо бежать». Действительно, черные облака газа приближались, скатываясь с вулкана. 5 минут мы бежали вдоль речки. Я остановился и, не смотря на страх кули, стал делать снимки. Сегодня не видать хорошо вершину, но недалеко от того места, что мы были, остановилась лава (пирокластический поток. — Авт.). Видно, что зелень покрыта пеплом. На следующий день ходил на разведку. Вулкан выкинул камни и пепел, которыми завалено дно ущелья реки Сенова. Камни диаметром до 2,5 м были горячие. Сучья деревьев гнуты под тяжестью пепла. Пепел на глубине 15 см до 100 градусов.

26 августа 1922 г. Ходил на вершину, и чуть не убили меня летящие с вершины камни. Хуже, чем артиллерийский

огонь. На самой вершине обнаружил сольфатару с температурой +145.

Со временем наблюдения за вулканами становились инструментальными. Петрушевский осваивал новые методы анализов, учился пользоваться разнообразными научными приборами. Из дневника:

Мерапи, 18–26 февраля 1924 г. Сегодня доставили наконец с большим трудом сейсмограф, который здесь хотя и установить. Утром разведка, потом сейсмограф до вечера. Изобретатель с-фа «Омори» — японец, погиб во время страшного последнего землетрясения в Японии. Делали усовершенствования, из которых часть выпала и на мою долю. Ходил на вершину, чуть не задохнулся, измерил я температуру +365 градусов. Наверное, скоро будет извержение.

Вулкан Папандайян, 3 апреля 1925 г. Работаю много. Теперь у меня три сейсмографа, барограф, гальванометр, милливольтметр...

3 мая. Второй месяц в кратере. Для кармана полезно сидеть в кратере. Может быть, расплачусь с зубным врачом и на налоги отложу. Только уж больно тоскливо одному сидеть. Я давно уже почти ничего

не записываю, что делается на свете божьем. Вот опять весна, а надежды на то, что будет перемена в России, нет и нет. Я по целым часам сижу в тоннеле у сейсмографа Вихерта — вот чертовская машина. Хорошо, если в день 6 колебаний, а вот сегодня я 22 колебания получил.

7 мая. Сегодня день землетрясений — в 13:25 и 17:45. Так трясло, что один сейсмограф даже остановился — не рассчитан на такие толчки. В чем причина? Уж не извержение ли будет?

Вулкан Танкубан Праху, 9–23 декабря 1925 г. Неожиданно здесь до 23 декабря. Учусь количественному анализу газов H_2S и CO_2 . Во время анализа газов, одна из «вулканосторожевых» собак попала в газ. От этого она почти лишилась чувств, и я угостил ее кислородом. К вечеру отошла... Погода ужасная — ветер сильный, облака нависли и мелкий дождь.

Проблему опасности наблюдений за извержениями Петрушевский решил по-военному. У кратеров строил блиндажи, или форты, как он их еще называл, с потолком в несколько накатов из бревен, которые несколько раз спасали жизнь наблюдателям. Из дневника:

Вулкан Папандайян, 25 августа 1924 г. Сегодня в полдень — представление: неожиданно заработал новый кратер Кава Бару. С 12 до 17 часов я был под «огнем». Блиндаж выдержал бомбардировку прекрасно. Летали в воздухе камни, деревья, грязь. Даже до домика моего грязь долетела. Теперь работа будет чертить и описывать происшествие (фреатическое извержение.— Авт.).

Позднее, в 1941 г., на Мерапи он построил настоящее бомбоубежище с бронированной дверью и запасом кислорода в баллонах. Этот туннель до сих пор — гордость ВулканоLOGической службы Индонезии. Из дневника:

Я начал постройку нового бетонного поста в Бабадоне — за-

ложил фундамент. Это мой проект, мне поручено и выполнение. С 6 часов утра до 5 часов вечера я на ногах. Занят так, что даже газет не читаю. Ужасно трудно смотреть за кули — работают плохо и медленно. К старому туннелю я приделываю галерею 18 м и бетонный каземат. Хочу предусмотреть все мелочи и сделать этот пост «идеально-образцовым», так как Мерапи — опасный вулкан и пост должен быть рекламой для нашей службы. Я устаю, но счастлив видеть плоды своей работы. Мой бетонный блок, я надеюсь, будет служить сотни лет наблюдателям за Мерапи.

В 1927 г. в центре затопленной морем кальдеры вулкана Кракатау началось длительное подводное извержение. Было решено организовать постоянные наблюдения за извержением, так как местное население опасалось повторения катастрофы 1883 г., когда погибло около 38 тыс. человек. Главным назначили Петрушевского, который многократно по несколько месяцев жил на одном из необитаемых островков (о.Ланг, ныне Панджанг) архипелага Кракатау, документируя извержение. Из дневника:

2 мая 1928 г. Ночью вулкан, как и весь день вчера, стрелял, а потом почти час на поверхности воды было видно пламя от лавы, которая уже близко к поверхности. Наверное, скоро появится остров. Высшая точка извержения (вулканических выбросов. — Авт.) пока 500 м. Раньше было до 400 выстрелов в день и до 580 колебаний, а теперь тихо и никаких землетрясений.

18 мая. Три дня кратер не работал. Я решил, что надо измерить глубину, а то будет поздно. В 9 часов утра мы были на поверхности точки извержения. Глубина, как я и думал, 5 м, поплавали, пошли на остров Верлатен, бродили там часа два. Вдруг через 3 часа после наших измерений кратер выбросил массу пепла и лавы на высоту 500 м. Мы и снять не успели.



Измерение температуры сольфатары на вулкане Папандайян. 1924 г.

20 января 1929 г. Вулкан работает вовсю. Большие 5000 извержений в день на высоту 500—1000 м, сейсмограф пишет непрерывные колебания. Сейчас было очень красивое извержение 1100 м в высоту, с массой пепла и бомб.

22 января. Вчера было 6800 извержений в день. Ночью показался было кратер из воды, но потом его размыло. Несколько раз посыпало нас пеплом. Потом была гроза, и на вершине видны были разряды электричества. После полудня стало спокойней, извержение уменьшалось, и в 7 часов вечера прекратилось. Только подземный гул давал знать, что вулкан не умер.

28 января. Вчера кратер заработал почти без остановки. 8000 извержений! Сегодня опять показался из воды кратер.

1 февраля. Вчера было уже более 9000 извержений в день.

Сегодня было извержение высотой 1200 м. Из воды показался кратер высотой 15 м,

вернее, два его края — восточный и северный.

10 февраля. Новый островной окрещен Анак Кракатау — Дитя Кракатау, растет не по дням, а по часам. Уже 24 м в высоту. Я устал, голова тяжелая, желудок в беспорядке. Были бы деньги, попросил бы смену.

18 февраля. Вчера мне стукнуло 38 лет. Кратер зачих, сегодня почти не работает. Вот бы первому русскому гусару ступить на него!

20 февраля. Сегодня был «набег гусар Ее Величества» на Анак Кракатау. В числе захваченных — один большой камень, лапилли и пепел.

22 февраля. Сегодня опять набег. Эти минуты напоминают мне атаки во время войны.

23 февраля. Опять плывал на новый остров. Теперь я собрал большую коллекцию камней — лавы, песку, пеплу и т.д.

4 мая 1930 г. Сегодня день мой начался с 3 часов утра. До 6 была вахта. Вулкан работал мало. Далее были следующие со-



Наблюдательный «форт» Петрушевского на вулкане Папандайян. 1924 г.

бытия. Сперва я составил телеграммы для начальника, генерал-губернатора, губернатора западной Явы и двух резидентов Явы и Суматры: «За 13 часов 114 извержений до 125 м, 429 всплесков, 264 фонтана и бо-

лее 3000 выстрелов. С-Ю компонент сейсмографа: 158 слабых колебаний, 50 очень слабых и много микроколебаний. В-З компонент: 175 слабых, 58 очень слабых и немного микро». В 8 часов пошел разыскивать



Вулканическое убежище на Мерапи и его главный инженер В.А.Петрушевский. 1941 г.

триангуляционный пилляр. По дороге собаки поймали легуана (варана. — Авт.), отобрал и повесил на сучок. Встретил массу крабов. Нашел пилляр, в 11 часов вернулся. Рыбаки с Суматры привезли кокосов и бананов в подарок. Обнаружил, что семена рижской ели принялись. Сел за вахту. В 1 час дня вывелся первый цыпленок. В 4 часа кончил вахту и пошел спать. Надо еще написать дневной рапорт и приготовить бумагу для барографа и гигрометра. С полуночи до 3 часов утра опять вахта. Вот день Гусара Ее Величества.

27 июня. Сегодня послал последнюю (№534) телеграмму за моей подписью и сдал пост. Ночью вахту не нес, завтра на борт «Альбертины» и заканчивается мое 130-дневное сидение на острове. Кратер работает вовсю, остров уже 20 м высотой, кратер весь наружу.

В 1934 г. вулканологическая карьера Петрушевского внезапно прервалась. Разразился мировой экономический кризис, и все работы на вулканах были резко сокращены. Первое время он существовал на государственное пособие, подрабатывал сбором и продажей агатов, топографической съемкой на плантациях. С 1936 по 1939 г. работал топографом на о. Борнео.

В 1940 г. Петрушевский вернулся на работу в Вулканологическую службу и к своим старым друзьям — вулканам. Из дневника:

Кракатау. 13–19 декабря 1940 г. Давно я там не был! Плыл на корабле с пушкой. Погода отличная. Мой старый бивак на Лонг-острове сильно зарос, и кокосы сильно выросли. Масса пепла. Был на Анаке. Он 120 м высотой. В кратере все тихо, и он полон воды. Я выкупался в кратере. Все 5 дней был сильно занят — построил бетонное убежище (три метра блиндажа), привел в порядок бивак, цистерны для воды и т.д. Убил двух легуанов из пистолета.

Вторая мировая война и последовавшее обретение Ост-Ин-

дией независимости нанесли серьезный удар по работе Вулканологической службы. Сначала в 1940 г. ее директор Ч.Штейн, как немецкий подданный, был отстранен голландскими властями от должности. Он умер в Индии, в лагере для интернированных, в 1945 г. Вместо него начальником службы стал В.ван Беммелен. В 1941 г. о.Ява был оккупирован японцами, и ван Беммелена (гражданина Дании) поместили в концентрационный лагерь (однако ему позволяли выполнять геологические работы). На тот момент Япония с Россией не воевала, и японцы назначили директором Петрушевского. Забавный факт: когда температура фумарол на вулкане Тангкубан Праху, где был пост японских ПВО, повысилась на 1° (что вполне обычно), он убедил оккупантов в возможности извержения. Пост поспешно убрали. Директором Петрушевский пробыл недолго. Его уличили в передаче еды в лагерь военнопленных и отстранили от занимаемой должности. Когда же в 1945 г. СССР объявил войну Японии, Петрушевского тоже хотели арестовать, но не успели.

С окончанием войны на Яве начались массовые волнения, направленные против голландских властей. Жить и работать здесь становилось все труднее. Многие специалисты стали уезжать в Европу и Австралию. В 1946 г. в Голландию уехал ван Беммелен, и Петрушевский опять стал директором службы. Из дневника:

14 июля 1946 г. За последнее время наш сейсмограф при музее, за которым я ухаживаю как «последний вулканолог», стал записывать много землетрясений из района средней Явы. У нас со службы опять уходят люди, желающие покинуть Ост-Индию. Жаль мне очень доктора ван Тангеррена из лаборатории, такой он славный, вежливый и всегда готовый помочь. Он был одним из 8 военнопленных, из-за которых меня выгнали японцы.

Декабрь 1946 г. Тяжело: я — единственный работник из 28 человек, шеф и все остальное. Мне надо делать карты, перерисовывать сделанные для иллюстраций рисунки, просматривать литературу, наводить порядок в нашей библиотеке, в картах, в инвентаре.

Несмотря на смуту, в послевоенные годы Петрушевский осуществил несколько длительных экспедиций на многочисленные вулканы, расположенные на маленьких островах севернее и восточнее Сулавеси. Из дневника:

Вулкан Дуконо, остров Хальмахера, 13–16 августа. Сегодня встали рано, в темноте при лунном свете собирались и в 4 часа утра тронулись на грузовике: 9 кули, доктор, 2 солдата и я. В 6 часов утра приехали в деревню, где мы должны были получить проводников, но я взял еще, и очень кстати, 6 кули, чтобы прорубать дорогу и нести воду. Последнее, к счастью,

не понадобилось. Уже через час ходьбы мы начали очищать дорогу от поваленных из-за пепла бамбуков и обломившихся сучьев. Нужно представить себе клубы пыли, которые производили наши кули при каждом ударе ножа. Выглядели они как черти, двигались мы медленно и остановились на первый бивак в 2 часа дня в месте, где среди камней была дождевая вода. На следующий день шли мало. Уже в 11 часов подошли к границе лавы. До вулкана еще далеко — верст 4–5. Как идти с багажом через лаву? Сегодня неожиданно лопнула пружина в хронометре, я порвал брюки, и стали отрываться подошвы у сапог. Проводник «дорогу» дальше не знал. Я решил разбить бивак у лавы на высоте 450 м, так как здесь на наше счастье была дождевая вода. Вулкан высотой 1200 м. У кратера еще никто никогда не был. 15 августа я, доктор, солдат и пять кули пошли на разведку. Идти не по лаве ужас-



Дома в своем кабинете. Бандунг. 1932 г.

но: много пепла, проваливаешься в ямы.

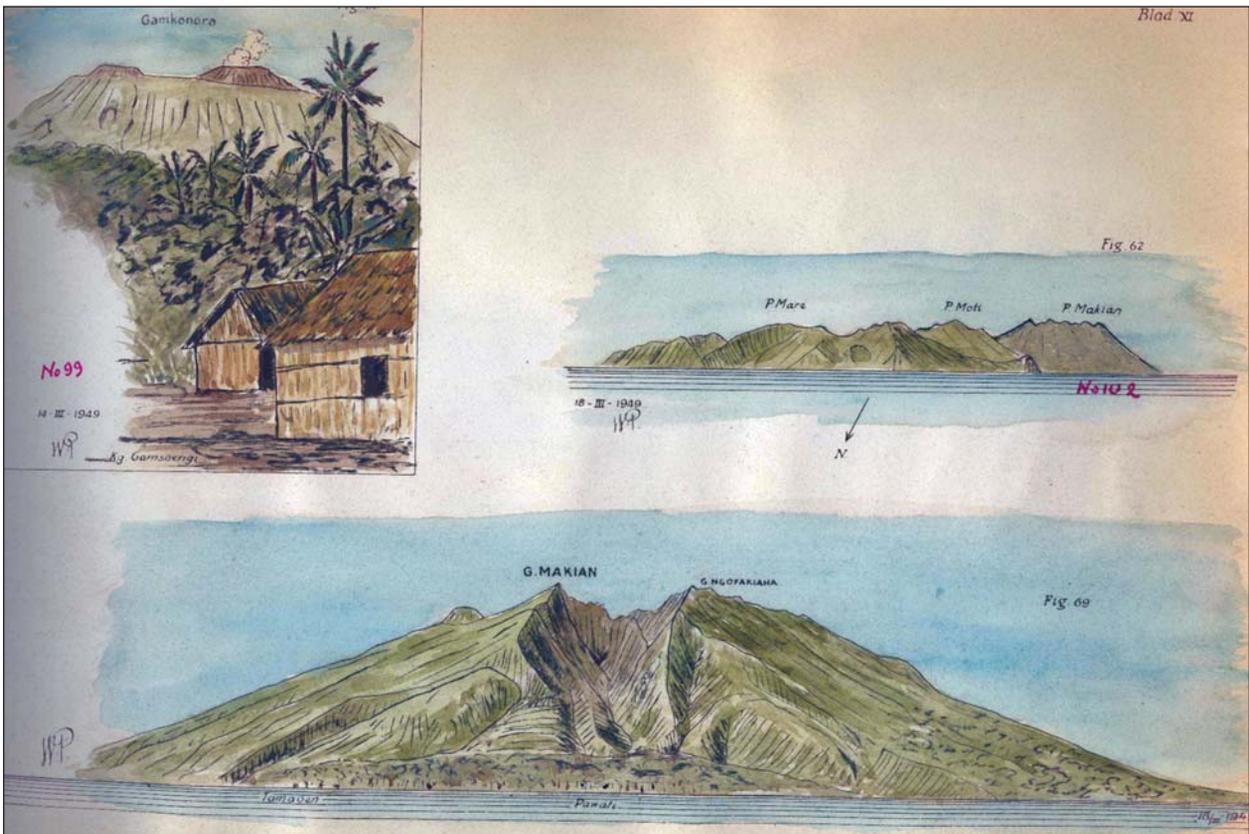
Много погибших деревьев — стоят сухие стволы. Решили пойти по лаве и обнаружили два оазиса: лава почему-то не тронула эти места, и там была прекрасная зелень: папоротники, бананы. Лава очень острая. К 12 часам дня я понял, что бивак перенести трудно, и решил пойти на авантюру — идти вперед, часам к 4 вечера добраться до кратера и там ночевать под открытым небом. 4 кули получили приказ идти обратно на бивак и завтра утром выйти нам навстречу с запасами чая, кофе и т.д. К 4 часам мы добрались до края кратера, который стоял отдельно от лавы и издали был похож на срезанную верхушку голландского сыра. Сначала я решил, что он спокоен, но, судя по колеблющемуся около сольфатар воздуха, их температура была выше +500. На дне кратера были от-

четливо видны четыре точки извержения различной величины. Устал я как никогда и с удовольствием сидел и делал рисунки и наблюдения. Кратер сравнительно невелик: 300—350 м в диаметре и 120—140 м в глубину. Через час мы пошли искать место ночлега в другой старый кратер и до захода солнца успели собрать ветки для костра. Воды было мало, а пить хотелось ужасно. Ночью мы с доктором пытались заснуть под его дождевиком, но это удавалось плохо, так как дул сильный ветер. Рано утром пустились в обратный путь и в 8 часов утра встретили кули с водой, кофе, чаем и едой. В 10 часов я видел, как вулкан выстрелил, но мы были далеко. В 11 часов были на биваке.

Вулкан Руанг, 12—18 сентября. Каждый вулкан имеет свою «физиономию», свой характер. Два часа мы употребили на подъем из-за того, что часть

спутников отставала. На краю старого кратера я устроил привал и прочел лекцию о том, как надо делать наблюдения и как называть вещи своими именами, а не говорить про пар, огонь. Все сильно были поражены, когда я на расстоянии сказал: «Это пар без запаха серы с температурой 70—80». Кратер вулкана оказался очень интересным, с его края я обнаружил подозрительные места с температурой до 480 градусов. Много времени ушло на рисунки. Я решил еще раз побывать в кратере и предупредил начальство, чтобы оно позаботилось об эвакуации беспечных жителей острова.

Запись позднее, Бандунг. Пришел рапорт из Тагуладанга: 2 октября Руанг был разведан моими учениками, температура поднялась до +505 (может быть, выше, они боялись за термометр). Будет ли извержение в этом году и какого сорта —



Остров Хальмахера. 1949 г. Рисунок В.А.Петрушевского.

медленный поток лавы или кратковременное разрушение вершины? Подождем новых данных. 12 ноября положение на Руанге, судя по телеграмме от резидента, стало очень опасным. Я решил взять на себя ответственность и дал телеграмму об эвакуации 5–6 тыс. человек.

Извержение, предсказанное Петрушевским, произошло через три года и благодаря эвакуации обошлось без жертв.

Достижения Петрушевского были высоко оценены: в 1947 г. его перевели в чин геолога-практика — высший для инженера без специального образования, а на Всемирной вулканологической конференции в Осло в 1948 г. профессор Дж.Эсхер (организатор Вулканологической службы) предложил назвать в честь него один из вулканов. Так в Индонезии появился вулкан Илипетруш (Pirpetrus) — купол вязкой лавы высотой 190 м, выжатый в том же году на юго-восточном склоне вулкана Иливерунг на о.Ломблен (ныне о.Лембата), формирование которого изучал Петрушевский. Из дневника:

8–10 мая 1948 г. Вулкан Иливерунг. *Всюду до 3–4 см пепла. Это неприятно. Остановились в деревне. Конечно, население обложило дом и заглядывает в окна. На следующий день я совершенно неожиданно решил «атаковать» кратер. Со мной пошло семь человек. По дороге мы потеряли час, так как было извержение, и пепел был такой густой, что резал глаза. Оказалось, что в лавовом куполе вулкана образовалось четыре кра-*

тера, а на востоке у берега моря — пятый, где выдавило уже много лавы, и теперь он стреляет. С 7 апреля было почти 30 извержений. В Лереке падает легкая пемза размером с куриное яйцо. Убыток большой, так как погибло около 300 коз и 100 садов-огородов. Около вулкана — настоящая «зима», но вместо снега пепел.

После выхода на пенсию в 1950 г. Петрушевский с семьей уехал в Австралию и поселился около г.Сиднея, где активно занимался общественной работой в русской общине. Волею судьбы Владимир Александрович большую часть жизни был вынужден прожить вне Родины. Но он никогда не переставал считать себя русским и не принял ни голландского, ни индонезийского, ни австралийского гражданства. Умер Владимир Александрович 30 августа 1961 г.

Вулканологии нельзя научиться в университете. Вулканологами становятся в процессе практической работы на вулканах. Таким огромным опытом документирования извержений, оценки степени вулканической опасности, принятия решений об эвакуации населения, какой был у Петрушевского, могут похвастаться немногие профессионалы. Ван Беммелен даже как-то назвал его «чемпионом по изучению вулканов». Он единственный из вулканологов спустился в 68 кратеров.

Работа Петрушевского носила больше инженерный характер — результаты наблюдений за извержениями содержатся



Измерение температуры в кратере. Одна из последних фотографий на вулканах.

в многочисленных отчетах вулканологической службы Ост-Индии. Многие карты и рисунки в классических трудах В.ван Бемеллена, Н.ван Паданга и других голландских вулканологов выполнены Петрушевским. Сам он опубликовал только несколько научных статей. Одна из них, о последствиях извержения вулкана Тамбора в 1815 г., до сих пор часто цитируется.

Сейчас имя Петрушевского постепенно пробивается из искусственно созданного забвения, появилось несколько интернет-страниц (например, <http://russky.com/history/library/petrushesky.htm>), где можно прочитать его стихи, написанные немного старомодным, но проникнутым большой любовью к России слогом. Мы надеемся, что эта статья поможет найти место Петрушевскому-вулканологу в истории науки России. ■

Мы ищем заинтересованных в издании дневников и других архивных материалов В.А.Петрушевского.

Опубликованные статьи В.А.Петрушевского

1. *Petroeschewsky W.A.* Preliminary historical register of volcanic activity in the East Indian Archipelago (1000—1941 A.D.) // *Bull. East Indian Volcan. Survey.* 1943. V.95—98. P.15—52.
2. *Petroeschewsky W.A.* A Contribution to the knowledge of the Gunung Tambora (Sumbawa) // *Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, Tijdschrift.* 1949. V.66. P.688—703.
3. *Petroeschewsky W.A.* The volcanic activity in Indonesia during the period 1942—1948 // *Volcanological Survey of Indonesia.* 1953. V.I. P.17—30.
4. *Petroeschewsky W.A., Klompe T.H.F.* Het vulkanologisch onderzoek in Indonesia // *Chronica Naturae.* 1950. V.106. №5. P.51—70.

Поселок Борок и его музеи

В.С.Чесноков,

кандидат экономических наук
Москва

В Некоузском р-не Ярославской обл. в недалеком прошлом существовала целая сеть дворянских усадеб. Среди них своей необычной и удивительной историей выделялся Борок, ныне расположенный на берегу Рыбинского водохранилища.

Борок привлекает и притягивает меня по двум причинам. Первая — это близость села Веретей, расположенного в 5 км от Борка. В этом селе в послевоенное время существовал детский дом №47, в который в августе 1942 г. привезли детей из блокадного Ленинграда [1]. Я был среди них, будучи его воспитанником с 1942 по 1954 г., учился в местной школе с первого по седьмой класс, затем вернулся в свой родной город. В деревне Иванцево, расположенной недалеко от Веретей, в 2007 г. я посетил своего учителя по труду, физкультуре и рисованию Федора Алексеевича Монахова, который проработал в веретейской школе (вернувшись с фронта) с 1945 по 1998 г. (6 июня 2012 г. ему исполнилось 90 лет). Встреча состоялась спустя 53 года, было много воспоминаний.

Сегодня на стене школы можно увидеть две мемориальные доски. На одной из них написано: «Веретейская школа имени народовольца Н.А.Морозова — старейшая в России. Открыта в 1848 г. по решению крестьян». (Немалое участие в становлении школы приняла фрейлина императрицы Е.М.Ольденбургская.) Мемориальная доска была установлена в 2004 г. стараниями местного краеведа, полковника медицин-

ской службы К.К.Озерова. На другой доске читаем: «Здесь в 1910—1915 гг. учился выдающийся советский ученый-геохимик, член-корреспондент Академии наук СССР Александр Александрович Сауков (1902—1964)». Ее поставили в честь 75-летия ученого. Учить в веретейской школе сегодня некого, ее закрыли в 2007 г. Редкие ученики вынуждены ездить в Борок. Ныне школа в Веретее благодаря стараниям местных краеведов и учителей превращается в музей крестьянского быта.

Вторая причина заключается в следующем. В 2001 г. в издательстве «Наука» вышла моя книга «Сергей Андреевич Подолинский» (второе дополненное издание — в 2006 г.). Подолинский жил во второй половине XIX в. и был лично знаком с Н.А.Морозовым. В.И.Вернадский называл Подолинского «забытым научным новатором» и одним из своих предшественников в разработке учения о живом веществе, биосфере и ее эволюции в ноосферу. В книге много портретов общественных деятелей того времени, но я не нашел в Москве (может быть плохо искал) портрета первой жены Морозова Ольги Спиридоновны Любатович. Подолинский в свое время удочерил их малолетнюю дочь Бэтти, которая вместе с двумя родными детьми Сергея Андреевича умерла во время эпидемии в Монпелье на юге Франции. Я написал письмо в Борок заведующей музейным отделом Института биологии внутренних вод РАН и Мемориальным домом-музеем Н.А.Морозова Т.Г.Захаровой. Она прислала мне искомый портрет, пригласив на

ежегодные Морозовские чтения, которые 8 июля проходят в Борке (с 1979 г.) и просила выступить с сообщением о Подолинском. Таким образом, в 2007 г. я посетил Борок и познакомил научную общественность с жизнью и творчеством ученого. Теперь я ежегодно приезжаю туда на Морозовские чтения и делаю научные сообщения, так или иначе связанные с именем Н.А.Морозова.

Интересна и увлекательна история самой усадьбы Борок. В начале XVIII в. земли современного Некоузского р-на и частично Брейтовского принадлежали генерал-фельдмаршалу князю М.М.Голицину. После его смерти перешли к его сыну обер-гофмаршалу князю Н.М.Голицину, а затем к его дочери княгине А.Н.Голициной (мужем ее был граф А.А.Мусин-Пушкин). Через несколько лет она продала принадлежащие ей земли Е.А.Алексееву. В то время самой усадьбы еще не было, до середины 17-го столетия существовала лишь небольшая деревня Борок. Дочь Е.А.Алексеева вышла замуж за А.П.Щепочкина, который и основал усадьбу. Его сын Петр Алексеевич Щепочкин (отец Н.А.Морозова) взял в гражданские жены Анюту Плаксину, свою крепостную. Н.А.Морозов, их старший сын — последний хозяин усадьбы. После 1917 г. усадьба Борок была передана ему в собственность по личному указанию В.И.Ленина. В 30-х годах XX в. Морозов организовал в усадьбе Верхневолжский биологический стационар при Академии наук СССР. После смерти ученого постановлением Совета министров СССР от 31 июля 1946 г. на Академию наук были



Улица Центральная. Борок.

Здесь и далее фото автора

возложены обязанности «организовать при биологическом стационаре Борок музей им.Н.А.Морозова в доме, где он жил и умер».

Сегодня в Борке с удивительной заботой и трепетом сохраняется память обо всех выдающихся представителях Мологского края. Уникальность этого поселка заключается в том, что здесь при одном академическом институте живут пять музеев, притягивающих не только местную молодежь. На Морозовские чтения собирается творческая интеллигенция из Санкт-Петербурга, Москвы, Ярославля, Рыбинска и других мест.

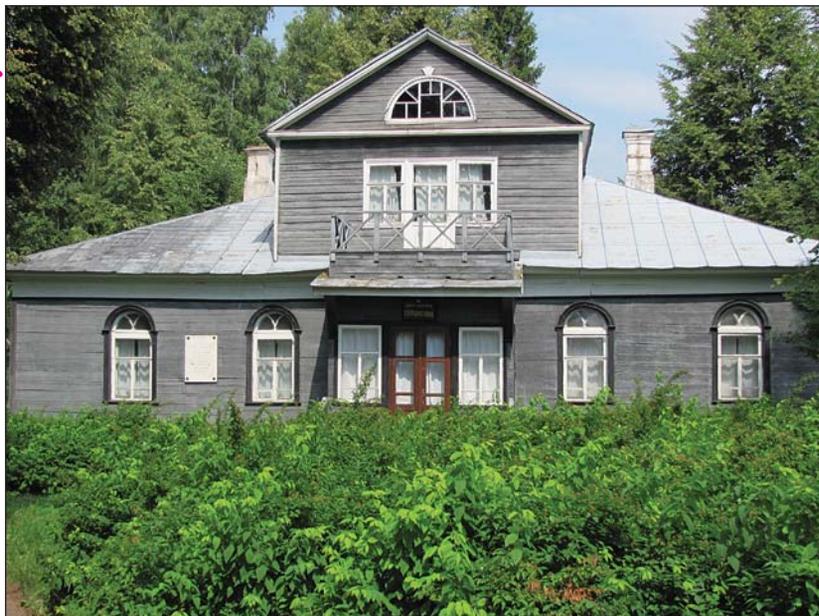
Парк пос.Борок — памятник природы. Здания института и поселка большей своей частью вписываются в парк, поэтому и воспринимаются как единое целое. Здесь наряду с аборигенными обычными видами, высажено много деревьев и кустарников, не характерных для средней полосы. Так, в насаждениях можно увидеть орех маньчжурский, рододендрон жел-

тый, клен сахарный, черемуху виргинскую, пихту сибирскую, кедр, бархат амурский и другие деревья.

Мемориальный дом-музей Н.А.Морозова

Николай Александрович Морозов (1854—1946) родился в имении-усадьбе «Борок» в семье помещика и крепостной крестьянки. Он рано увлекся революционной деятельностью, встречался с К.Марксом, почти 30 лет отсидел в одиночных камерах, в том числе 21 год в Шлиссельбургской крепости. Здесь он создал свою главную работу — фундаментальный труд по теоретической химии «Строение вещества». Всего в заточении им было написано 26 объемистых томов по различным отраслям знания. В 1907 г. из печати вышел труд «Периодические системы строения вещества», в котором он развивал мысль о сложном строении атомов и об эволюции элементов во Вселенной.

По представлению Менделеева за эту работу ему была присуждена ученая степень доктора химии honoris causa (без защиты диссертации) Петербургского университета. Первая жена Морозова О.С.Любатович, считая, что он погиб в тюрьме, будучи в сибирской ссылке, вторично вышла замуж. Женился и Николай Александрович, его избранницей стала талантливая пианистка К.А.Бориславская. В течение 15 лет после событий 1917 г. Морозов занимался в основном вопросами применения естественнонаучных методов к истории. Его идеи нашли свое отражение в фундаментальном труде «История человеческой культуры в естественнонаучном освещении». Семь томов этой работы увидели свет под названием «Христос», а пять остались ненапечатанными до конца XX в. В предисловии к седьмому тому он писал: «Основная задача — согласовать исторические науки с естествознанием и обнаружить общие законы психического развития человечества на основе эволюции



Дом-музей Н.А.Морозова.



Памятник Н.А.Морозову. 2011 г.

его материальной культуры, в основе которой, в свою очередь, лежит постепенное усовершенствование орудий умственной и физической деятельности людей».

В 1932 г. Морозова избрали почетным академиком АН СССР. Он автор многих публикаций по астрономии, химии, физике, математике, воздухоплаванию, языкознанию, философии, политэкономии, истории, также увлекался поэзией, писал стихи [2].

А.А.Сауков в 1944 г. посетил В.И.Вернадского, чтобы обсудить предстоящие работы, связанные с геохимией радиоактивных элементов. Уходя, Сауков сказал, что направляется домой в деревню Чурилово и попутно заедет в Борок к Морозову. Мнение Вернадского о Морозове интересовало Саукова, он вспоминает: «Это, безусловно выдающийся человек, — сказал Владимир Иванович, — быть приговоренным к пожизненному заключению и сохранить веру в жизнь, и непрерывно учиться, и бесконечно работать в условиях одиночного заключения — на это способны немногие. Отсутствие систематического законченного

высшего образования, конечно, мешало Морозову, поэтому некоторые его выводы недостаточно строго научно обоснованы, однако некоторые из них замечательны и потом подтвердились». При этом Владимир Иванович вспомнил астрономические работы Морозова и его выводы о разложимости атомов и о превращении элементов, сделанные еще в Шлиссельбургской крепости в то время, когда в это еще почти никто не верил, в том числе и Д.И.Менделеев. В заключение нашей беседы Вернадский просил передать поклон Николаю Александровичу и сердечно поздравить его с юбилеем.

Посетители музея имеют возможность ознакомиться с русским усадебным бытом конца XIX — начала XX в., поскольку в доме сохраняется прижизненная обстановка, своеобразное соединение дворянской культуры, сельской простоты и научных увлечений обитателя дома.

Музей И.Д.Папанина

Иван Дмитриевич Папанин (1894—1986), известный полярник, дважды Герой Советского Союза, кавалер девяти орденов Ленина, контр-адмирал, доктор географических наук, создатель и первый директор Института биологии внутренних вод АН СССР/РАН, ныне носящего его имя. Участвовал в Октябрьской революции и Гражданской войне. В 1931—1932 гг. возглавлял экспедиции на Землю Франца-Иосифа, в 1934—1935 гг. — на мыс Челюскина. В 1937 г. он руководил экспедицией на Северный полюс (СП-1). В конце 1939-го — начале 1940 г. организовал спасение ледокола «Георгий Седов». В 1939 г. стал начальником Главсевморпути. Во время Великой Отечественной войны он выполнял обязанности уполномоченного Госкомитета обороны по перевозкам на Севере, в том числе организацию приема и переправки на фронт военных грузов, кото-

рые поступали от наших союзников. С 1951 г. до конца жизни Папанин возглавлял Отдел морских экспедиционных работ АН СССР.

В 1938 г. в Борке была основана Верхневолжская база АН СССР, в 1947 г. преобразованная в биологическую станцию «Борок» им.Н.А.Морозова. В 1950-х годах на базе станции создали Институт биологии водохранилищ, а в 1962 г. — Институт биологии внутренних вод АН СССР.

Папанин вложил много сил в строительство и благоустройство Борка, развитие научной деятельности и превращение небольшого поселка в крупный научный и культурно-просветительский центр. В одном из коттеджей, построенных еще в 1953 г. для научного персонала, жил сам Иван Дмитриевич, когда приезжал в Борок. В этом домике и открыт музей, где сохранен прижизненный интерьер. На фотографиях представлены разные периоды жизни Папанина. В экспозиции — его личные вещи: китель контр-адмирала, форменная фуражка, побывавшее на станции СП-1 радио, патефон, подаренный герою Арктики американцами, ксерокопии документов времен Гражданской и Великой Отечественной войн. Руководит музеем В.А.Романенко, племянница И.Д.Папанина [3].



Бронзовый бюст дважды Героя Советского Союза И.Д. Папанина установлен на площади поселка Борок в 2007 г.

Музей природы

В 1949 г. Иван Дмитриевич для создания коллекции местной фауны пригласил в Борок замечательного охотника-таксидермиста В.В.Аверкиева. В настоящее время в Музее природы экспонируется 287 видов позвоночных животных из 350, обитающих на территории Ярославской обл. Все они собраны вокруг Борка в районе радиусом не более 18 км.

В начале осмотра экскурсанты попадают в комнату с холоднокровными животными, знакомятся с видовым составом местных рыб, земноводных, пресмыкающихся. Узнают, что в местных водах обитают 42 вида рыб. Здесь же находятся экзотические экземпляры: рыба-шар, рыба-бык, морская игла, морской конек, прилипало, долгопер, лопатонос, веслонос, панцирная щука, кумжа, форель, малек рыбы-молота длиной 50 см. Затем идет знакомство с видовым составом земноводных, в числе которых тритоны, лягушки, жабы и др. Среди пресмыкающихся — гадюка, уж, веретеница, ящерицы. Шкуры четырехметрового удава боа и броненосца, панцири черепах — все это подарено учеными, ездившими за границу. Теплокровные животные представлены большой коллекцией птиц, дневных и ноч-



Экспонаты Музея природы: ласка (слева) и чибис.

ных пернатых хищников (имеются также птичьи гнезда и яйца). Обзор зверей начинается с самой маленькой мышки-малютки (массой до 5–6 г), далее идут крысы, кроты, зайцы, затем белка, ласка, горностай, хорек, норка, куница, енотовидная собака, лисица, рысь, волк, кабан, медведь, лось.

Имеется палеонтологический и минералогический отделы, фенологическая комната, в которой экспонаты расположены по сезонам года. В экспозиции можно видеть календари и таблицы за 36 лет фенологических наблюдений. Здесь же имеются стенды с лекарственными и полезными растениями, коллекция насекомых. Многие годы музеем заведовал А.А.Сорин [4]. Сегодня музей возглавляет М.Е.Елизаров.

Музей академика живописи Ф.Г.Солнцева

Федор Григорьевич Солнцев (1801–1892) — художник-археолог, академик живописи, реставратор, знаток древнерусского искусства. Он родился рядом с Борком, в селе Верхне-Никульском. Будучи сыном крепостного, отпущенного на волю графом А.А.Мусиным-Пушкиным,

Федор Григорьевич обучался в Императорской академии художеств в Санкт-Петербурге, по окончании которой ее президент А.Н.Оленин оставил Солнцева при академии для занятий художественной археологией [5]. Солнцев рисовал предметы знаменитого древнего золотого клада, открытого в 1822 г. близ Старой Рязани, в 1830–1835 гг. работал в Московском Кремле. Акварели и рисунки Солнцева запечатлели не только сокровища московских государей, но и кремлевские соборы, и реликвии, хранящиеся в них. В Великом Новгороде он рисовал Софийский собор и его древности, работал в других храмах и монастырях. Свыше 500 лучших акварелей и рисунков Солнцева были переведены в литографии и составили первый уникальный иллюстрированный свод памятников отечественной старины «Древности Российского государства», который вышел в шести выпусках в 1849–1853 гг. В 1836 г. Солнцев руководил восстановительными работами в Московском Кремле [6]. По его проектам реставрировались Теремной дворец, Святые сени, храмы Рождества Богородицы, Воскрешения Лазаря, Спаса на Бору. С 1843 по 1869 г. художник преподавал иконописание в Пе-

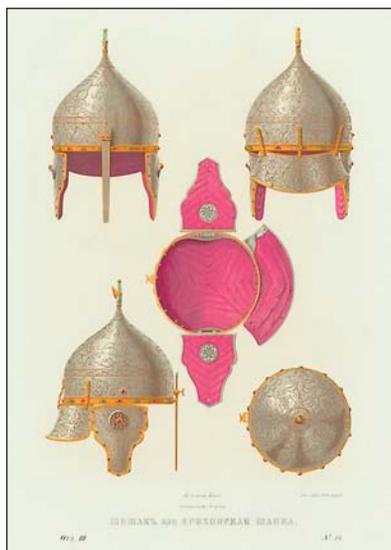
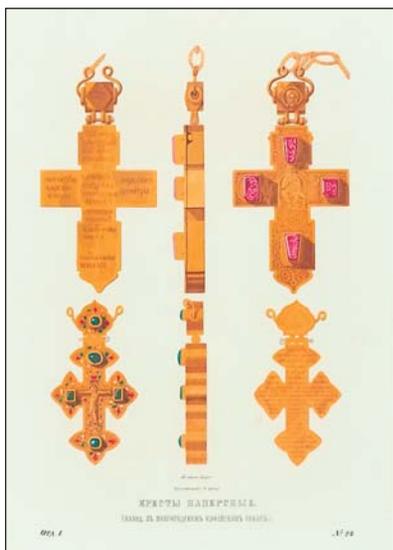


Федор Григорьевич Солнцев.

тербургской духовной семинарии, а с 1858 г. обучал крестьянских детей живописи в стенах Академии художеств [7]. 27 апреля 2004 г. в Борке был открыт музей Ф.Г.Солнцева, которым руководит Н.А.Носова [8]. В экспозиции есть биографические материалы, виды родного села Солнцева, его рисунки, книги с выполненными им иллюстрациями, предметы крестьянского быта. Часть экспозиции напоминает интерьеры гостиных XIX в.

Музей-аквариум

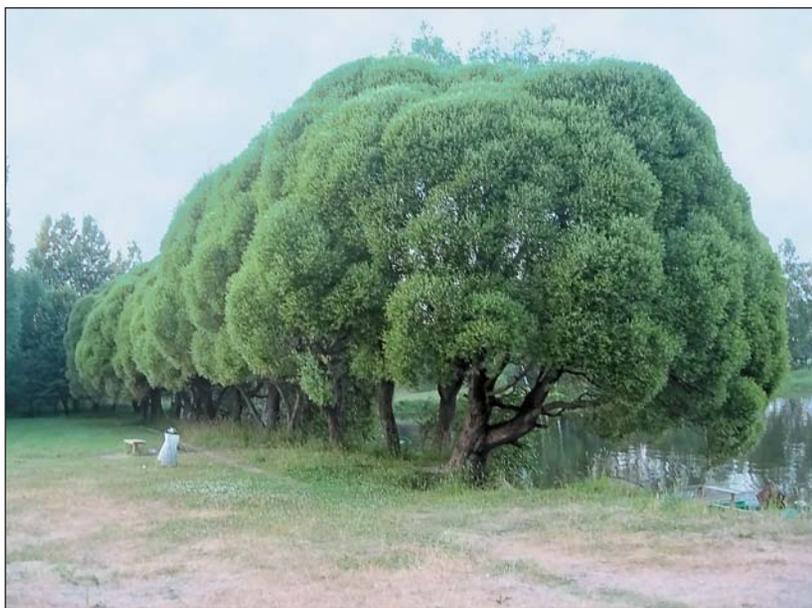
Музей-аквариум расположен на берегу Рыбинского водохранилища в ихтиологическом корпусе Института биологии внутренних вод РАН. Многие столетия в верховья Волги и ее притоки — Мологу и Шексну — ежегодно на нерест шли многочисленные проходные рыбы: белорыбца, осетр, белуга, севрюга. В местных водах в изобилии водилась стерлядь. Осетра весом до пуда рыбаки обязаны были отпускать на волю. «Ежегодник “Ярославских губернских ведомостей”» за 1864 г. сообщал, что в этом году только пошехонские рыбаки поймали 80 тыс. пудов рыбы. С появлением парохозяйства резко сократился ход на нерест бе-



Иллюстрации Ф.Г.Солнцева к «Древностям Российского государства».

лорыбицы. С постройкой каскада грандиозных плотин на Волге ход осетровых на нерест в верховья Волги прекратился совсем. С созданием Рыбинского водохранилища экология вод Молого-Шекснинской поймы настолько изменилась, что стерлядь практически исчезла.

Музей-аквариум основан в 1972 г. на базе бывшей лаборатории ихтиологии. Здание этой лаборатории — любимое детище доктора биологических наук А.Г.Поддубного, который почти 40 лет руководил исследованиями и выступил инициатором создания музея. Для этого в лабораторном корпусе института были установлены вместительные аквариумы, в которых для научных целей содержались различные виды рыб. Было принято решение разместить здесь небольшую экспозицию, составленную из наиболее интересных представителей ихтиофауны Волги. Был построен бассейн (около 30 м³), в котором в разное время обитали сом длиной 1,3 м и весом около 40 кг и щуки. Они не уступали ему по величине. В аквариумах объемом 2—3 м³ содержались карпы, караси, лещи, лини, угри, судаки и представители осетровых. В музее были оформлены стенды с фотографиями, отражающими ис-



Ивы шаровидные. Рыбинское водохранилище.

торию института, лаборатории экологии рыб (лаборатории ихтиологии), иллюстрирующие основные направления исследований. В дальнейшем появились представители пресноводной ихтиофауны тропических и субтропических регионов: пирания, астронотус, боция-зебра, платидор полосатый и др. Но основной в экспозиции всегда была коллекция «Рыбы Волги». В ней представлены: щука, речной угорь, пескарь, елец, язь, жерех,

карась, сазан, карп, линь, вьюн, сом, налим, окунь, ерш, подкаменщик и осетровые. Официальный статус Музей-аквариум получил только в 1996 г.

Все музеи Борка охотно посещают экскурсанты и отдыхающие со всей России, ученики биологических школ и различных детских экологических организаций, участники научных конференций, симпозиумов и совещаний, а также иностранные ученые. ■

Литература

1. Бикбулатов Т.Э. Веретейская волость: Историко-краеведческий очерк. Ярославль, 2008.
2. Валянский С.И., Недосекина И.С. Отгадчик тайн, поэт и звездочет. М., 2004.
3. Романенко В.А. Штрихи к портрету И.Д.Папанина // Музейные записки. Вып. II. Рыбинск; Борок, 2008. С.26—31.
4. Сорин А.А. Историческое и настоящее состояние животного мира нашего региона // Музейные записки. Статьи и доклады Музейного отдела ИБВВ РАН. Вып. I. Рыбинск; Михайлов Посад, 2007. С.79—86.
5. Путинцева А.Н. Встречи в салоне А.Н.Оленина. А.С.Пушкин и Ф.Г.Солнцев // Музейные записки. Вып. III. Ярославль; Борок, 2009. С.83—97.
6. Путинцева А.Н. Работы Федора Солнцева в Московском Кремле // Музейные записки. Вып. II. Рыбинск; Борок, 2008. С.55—60.
7. Носова Н.А. Известные и неизвестные (О судьбах учеников Императорской академии художеств из государственных крестьян под попечительством Ф.Г.Солнцева) // Музейные записки. Вып. III. Ярославль; Борок, 2009. С.76—82.
8. Носова Н.А. Художник Ф.Г.Солнцев (1801—1892) в истории Ярославского края. Неизвестные документы // Музейные записки. Статьи и доклады музейного отдела ИБВВ РАН. Вып. I. Рыбинск; Михайлов Посад, 2007. С.73—79.