

ПРИРОДА

3 12



В НОМЕРЕ:**3 Чугунов А.О., Полянский А.А.,
Ефремов Р.Г.****Липидный фундамент жизни**

В настоящее время стало понятно, что липиды биомембраны — не просто «океан», в котором плавают белки, это — «умный океан», создающий необходимые условия для корректной и эффективной работы белков.

13 Скорохватов М.Д.**Нейтринная геофизика —
первые шаги**

Геонейтрино — электронные антинейтрино, рождающиеся в цепочках ядерных реакций в недрах Земли, — несут важную информацию об энергетическом балансе нашей планеты.

18 Козлов А.И.**Витамин D и все, все, все**

Изучение витамина D, продолжающееся не одно десятилетие, в последние годы ознаменовалось интересными открытиями. Сегодня стало очевидно, что витаминный статус человека определяет не только состояние его костной и мышечной систем — это еще и важный фактор эволюционной и экологической пластичности.

23 Захаров-Гезехус И.А.**«Ископаемая» ДНК в современных
геномах**

Сравнительное изучение геномов современных организмов и их далеких предков показало, что фрагменты молекул ДНК ископаемых существ до сих пор хранят информацию, записанную в них когда-то.

28 Соколов В.И.**Новые формы углерода, открывшие
эру нанохимии**

Появившиеся в последние 20 лет новые углеродные формы — фуллерены, нанотрубки — уже находят применение. В химии они могут служить катализаторами органического синтеза как простых, так и сложных молекул и даже привести к оптически активным продуктам катализируемых реакций, важным для биологии и медицины.

34 Берман Д.И., Алфимов А.В.**Не холодно ли углозубу
на вечной мерзлоте?**

Известно, что углозуб обладает уникальной способностью зимовать при низких температурах в мерзлотной зоне Евразии. Что именно позволяет ему переносить столь сильное охлаждение и есть ли у него специальные адаптации к размножению в ледяной воде мерзлотных луж?

46 Расцветаева Р.К.**Родезит или гюнтерблассит?****Заметки и наблюдения****50 Горбунов А.П., Горбунова И.А.****Наледи поднебесья****Научные сообщения****53 Алифанов В.Р.****Кулинда — первое в России
местонахождение позднеюрских
динозавров****Рецензии****55 РЕДКИЙ ДАР —
ВО ВСЕМ ВИДЕТЬ ХОРОШЕЕ**

К 100-летию А.А.Ляпунова

Тихомиров В.М.

Недосягаемо высок

на кн.: Н.Н.Воронцов. Алексей Андреевич Ляпунов (55)

Демидов С.С.

Учитель в профессии и в жизни

на кн.: Алексей Андреевич Ляпунов.
100 лет со дня рождения (57)

Голубовский М.Д.

**А.А.Ляпунов и полтора века
интеллектуальной династии**

Размышление о книге Н.Н.Воронцова (60)

69**Новые книги****Встречи с забытым****70 Пушаровский Ю.М.****Мой первый учитель**

Воспоминания об А.В.Фурсенко

В конце номера**75 Цвельх А.Н.****Ускользящая птица:**

история кеклика в Крыму

CONTENTS:

- 3 Chugunov A.O., Polyansky A.A., Efremov R.G.**
Lipid Foundation of Life
Now it became clear that lipids in biomembrane are not just an «ocean» in which proteins float: they comprise a «smart ocean» which provides necessary conditions for correct and efficient functioning of proteins.
- 13 Skorokhvatov M.D.**
Neutrino Geophysics: The First Steps
Geoneutrino — electronic anti-neutrino originating in cascades of nuclear reactions in Earth interior — convey important information on energy balance of our planet.
- 18 Kozlov A.I.**
Vitamin D and All, All, All
Study of vitamin D that has been conducted for several decades was marked recently by interesting discoveries. Now it became evident that sufficiency or deficiency of this vitamin in humans not only determines condition of their bone and muscular tissues but also is an important factor of evolutionary and ecological plasticity.
- 23 Zakharov-Gezekhus I.A.**
«Fossil» DNA in Modern Genomes
Comparative studies of genomes of modern organisms and their ancient ancestors show that fragments of DNA of fossil creatures still keep information written into them long ago.
- 28 Sokolov V.I.**
New Forms of Carbon that Opened an Age of Nanochemistry
New forms of carbon emerging during last two decades — fullerenes, nanotubes — are already finding applications. In chemistry they can serve as catalysts of organic synthesis of both simple and complex molecules and even lead to optically active products of resulting reactions, important in biology and medicine.
- 34 Berman D.I., Alfimov A.V.**
Doesn't Siberian Salamander Feel Cold Dwelling on Permafrost?
It is known that Salamandrella keyserlingii has an unique ability to winter at low temperatures in permafrost zone of Eurasia. What exactly allows it to survive such extreme cold and does it have some special adaptations for reproduction in ice-cold permafrost pools?
- 46 Raszvetaeva R.K.**
Rodesite or Gunterblasseite?
- Notes and Observations**
- 50 Gorbunov A.P., Gorbunova I.A.**
Frazils of High Mountains
- Scientific Communications**
- 53 Alifanov V.R.**
Kulinda: The First in Russia Site of Late Jurassic Dinosaurs
- Book Reviews**
- 55 A RARE GIFT TO SEE GOOD IN EVERYTHING**
 To Centenary of A.A.Lyapunov
Tikhomirov V.M.
Unattainably High
 on book: N.N.Vorontzov. Alexey Andreevich Lyapunov (55)
- Demidov S.S.**
Teacher in Profession and Life
 on book: Alexey Andreevich Lyapunov. To 100th Anniversary (57)
- Golubovsky M.D.**
A.A.Lyapunov and One and a Half Century of a Dynasty of Intellectuals
 A Reflection on a Book by N.N.Vorontzov (60)
- 69** **New Books**
- Encounters with Forgotten**
- 70 Pushcharovsky Yu.M.**
My First Teacher
 Recollections about A.V.Fursenko
- In the End of the Issue**
- 75 Tzvelykh A.N.**
Elusive Bird: History of Partridge in Crimea



Липидный фундамент жизни

А.О.Чугунов, А.А.Полянский, Р.Г.Ефремов

Зарождение жизни на Земле — вопрос, на который пока нет окончательного ответа, но мало кто сомневается, что ее возникновение стало возможным лишь в тот момент, когда в «первичном бульоне» стали появляться маленькие изолированные области пространства, ставшие основной ареной для эволюции. В этих «первичных клетках» биохимические процессы могли протекать существенно быстрее, нежели на безбрежных просторах океана, и это послужило одной из предпосылок для первых, добиологических, шагов эволюции. Именно компартментализация (от англ. compartment — отсек, отделение) — один из обязательных признаков жизни.

Структурообразующую функцию биологических мембран выполняют липиды — амфифильные молекулы, имеющие полярную головку и неполярный (гидрофобный) хвост. Они малорастворимы в воде и склонны к образованию моно- и бимолекулярных слоев благодаря своей амфифильной природе.

Любопытно, что среди первых исследователей свойств липидов оказался один из отцов-основателей США Б.Франклин. В 1773 г. он измерял площадь масляных пятен на поверхности пруда, остающихся от ложки (5 мл) растекающегося оливкового масла: пятна неизменно оказывались размером $\approx 2000 \text{ м}^2$. (Зная это, несложно оценить и толщину мономолекулярного



Роман Гербертович Ефремов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией моделирования биомолекулярных систем и заместитель директора Института биоорганической химии имени академиков М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова. Занимается изучением биологических мембран, теоретическим моделированием структуры и динамики мембранных белков.



Антон Олегович Чугунов, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — образование пространственной структуры (фолдинг) белка, мембранные рецепторы, моделирование структуры рецепторов, действующих через активацию G-белка (GPCR).



Антон Александрович Полянский — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — физика белка, молекулярная организация мембран, направленная разработка лекарств. Вместе с А.О.Чугуновым создал научно-популярный сайт «Биомолекула» (<http://biomolecula.ru>).

слоя: разделив объем ложки на площадь пятна, получим 2.5 нм^*). Более 100 лет спустя Ч.Овертон заметил, что через биомембраны сравнительно легко проникают вещества, хорошо растворимые в липидах. Из этого он сделал заключение, что мембрана должна

* Если бы Франклин имел представление о молекулярном строении вещества, он легко мог бы вычислить и площадь одной молекулы триглицерида олеиновой кислоты (основного компонента оливкового масла) в этом мономолекулярном пятне, причем довольно точно: $S_{\text{мол}} = S_{\text{пятна}} \cdot M_r / (N_A \cdot V_{\text{ложки}} \cdot \rho_{\text{масла}})$, где M_r — масса 1 моля триолеина, N_A — число Авогадро, $S_{\text{пятна}}$ — площадь пятна, $V_{\text{ложки}}$ — объем ложки, $\rho_{\text{масла}}$ — плотность масла. В результате получается, что площадь молекулы $\approx 1 \text{ нм}^2$.

быть образована тонким липидным слоем. Так эксперименты Франклина оказались впереди современных биофизических изысканий. 1925-м годом датируется идея бислоиности мембраны: Э.Гортер и Ф.Грендель обнаружили, что монослой липидов, выделенных из мембран эритроцитов, ровно вдвое превосходит площадь поверхности самих клеток.

Однако тогда же было замечено, что мембрана содержит значительное количество белков, которые сильно влияют на ее свойства (в частности, поверхностное натяжение). Это открытие повлекло появление в 1935 г. концепции мембраны-«сэндвича»: Х.Доусон и Дж.Доннелли образно сравнили липидный бислой, заключенный между двумя слоями белка, со слоем масла в бутерброде. Прошло не одно десятилетие, пока точные данные по соотношению белков и липидов в мембранах различных клеток и современные методы исследования (такие как рентгеноструктурный анализ и электронная микроскопия) не доказали ошибочность этого представления: на самом деле белки не окружают бислой — они в него «встроены», подобно элементам мозаики. Эта метафора дала название теории «жидкостно-мозаичного» строения мембраны: мембрана — своего рода липидный «океан», в котором, как айсберги, плавают молекулы белков [1]. Сравнение с океаном появилось не случайно — липиды в мембране находятся в жидком (точнее, в жидкокристаллическом) состоянии. Хотя эта теория Сингера—Николсона явно устарела, ее зачастую называют классической, ведь современные представления еще не достигли той лаконичной изящности, чтобы их начала запросто можно было изложить в школьном учебнике [2].

Мембрана сравнительно свободно «течет» в плоскости, в то время как вне ее — строго упорядочена геометрией двойного молекулярного слоя. Текучесть липидной фазы мембраны обусловлена присутствием в углеводородных цепях большинства структурных фосфолипидов минимум одной ненасыщенной связи, понижающей температуру плавления липида. Проследить такое фазовое поведение достаточно просто на примере растительного масла и маргарина. При комнатной температуре растительное масло жидкое, так как содержит ненасыщенные жирные кислоты, в частности триолеин, температура плавления которого составляет 5°C. Маргарин же — твердый, поскольку получают его из растительного масла гидрированием, а у образующегося в результате насыщенного жира стеарина $T_{\text{плавления}} = 55^\circ\text{C}$. Полиненасыщенные жирные кислоты (в избытке присутствующие в рыбьем жире) обладают еще более уникальными свойствами: они поддерживают липидный матрикс мембран в «рабочем» состоянии в широком диапазоне температур, что позволяет рыбам быстро погружаться в холодные слои и всплывать обратно. Кстати, эти уникальные качества полиненасыщенных жирных кислот полезны и для человека.

В настоящее время стало понятно, что липиды мембраны — не просто пассивные носители белков, а равноправные участники большинства биохимических процессов. На поверку оказывается, что липидный состав тщательно оптимизирован эволюцией и позволяет создать необходимые условия для корректной и эффективной работы мембранных белков. Например, при частичном несмешивании липидных компонентов мембраны эукариотической клетки появляются наноскопические неоднородности — так называемые мембранные рафты (от англ. raft — плот). По-видимому, они образуют функциональные платформы, в которых комплексы мембранных белков выполняют все разнообразие своих функций.

Каковы же современные представления о биофизике липидов биологических мембран и, в частности, о способности липидов к самоорганизации, которая широко используется клетками в своих нуждах?

Многообразие биомембран

Неудивительно, что мембраны клеток разных организмов отличаются между собой, и эти различия носят принципиальный характер: помимо «населяющих» эту мембрану белков функции той или иной мембраны определяет ее «липидный портрет» [3]. Так, мембраны бактерий и эукариот отличаются тем, что в состав первых входит большее количество отрицательно заряженных фосфолипидов (например, фосфатидилглицеролы), тогда как вторые в основном содержат липиды цвиттерионной природы (которые, обладая как отрицательным, так и положительным зарядом, в целом электронейтральны) — например, фосфатидилхолины (рис.1). Это фундаментальное отличие используется системой врожденного иммунитета многих эукариот — например, антимикробные пептиды селективно разрушают мембраны бактерий именно благодаря наличию отрицательного заряда на их поверхности*.

Другая важная особенность мембран эукариот — холестерол (он же — холестерин), отсутствующий у прокариот. Вопреки дурной славе у обывателей, холестерол играет важнейшую и еще, видимо, не до конца понятую роль в работе мембран наших клеток (не говоря уже о том, что он — предшественник половых гормонов). Вместе со сфингомиелином холестерол образует рафтовые структуры, придающую эукариотическим мембранам прочность и особую функциональную гетерогенность.

Липидный состав разных органелл существенно различается (рис.2). Например, у митохондрий и пластид он гораздо больше напоминает бакте-

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

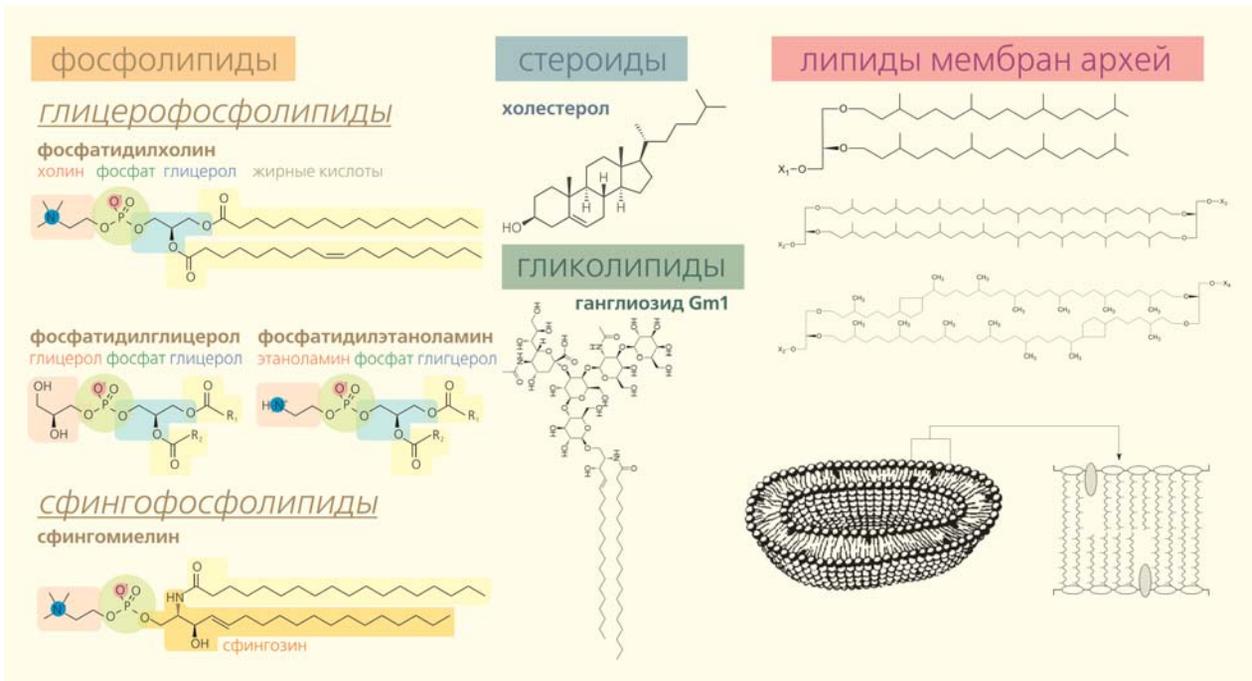


Рис.1. Основные типы липидов, встречающихся в биологических мембранах. Разнообразие (до 1000 разновидностей) липидов обеспечивается сочетанием разных гидрофобных, гидрофильных и «адапторных» фрагментов.

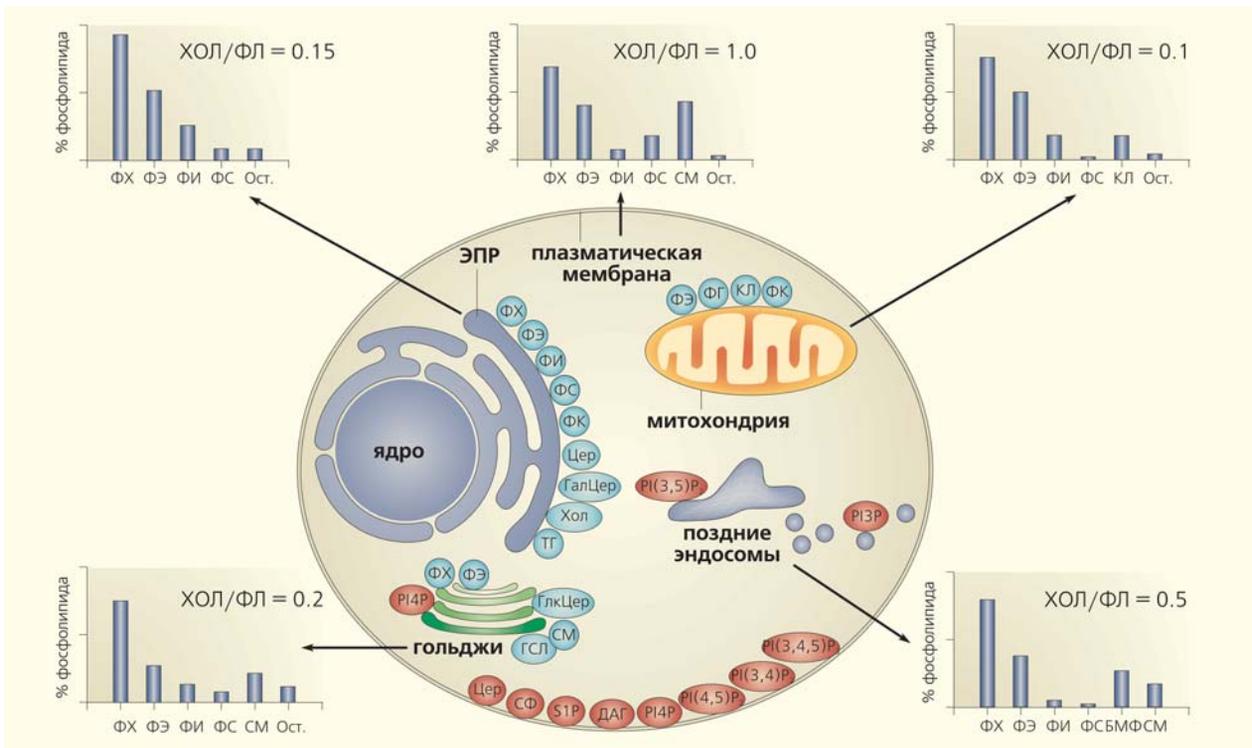


Рис.2. Липидный состав различных мембранных структур клеток млекопитающих [3]. На диаграммах содержание холестерина (ХОЛ) дано в отношении к суммарному количеству фосфолипидов (ФЛ). Внутри клетки обозначены места синтеза основных фосфолипидов (голубые овалы) и сигнальных липидов (красные овалы). В эндоплазматическом ретикулуме (ЭПР) синтезируются в основном глицерофосфолипиды, жиры, холестерол и церамиды. Аппарат Гольджи — «поставщик» сфингомиелина и сложных гликофосфолипидов. Около половины липидов митохондрий — в основном фосфатидилэтанолamina (ФЭ), фосфатидной кислоты (ФК) и кардиолипина (КЛ) — синтезируется этими органеллами автономно.

риальный, нежели эукариотический, подтверждая тем самым химерную гипотезу становления эукариот, согласно которой эти органеллы — бывшие бактерии, захваченные в плен путем фагоцитоза какими-то ранними формами эукариот [4]. В эндоплазматическом ретикулуме — «стартовой точке» метаболизма большинства липидов — состав обоих листов мембраны примерно одинаков, однако в аппарате Гольджи, плазматической мембране и эндосомах различия уже весьма существенны, что говорит о наличии активных процессов, создающих эту асимметрию. В частности, фосфатидилсерина (ФС) и фосфатидилэтаноламина (ФЭ) в норме присутствуют только в цитоплазматическом листке плазматической мембраны. Наличие ФС на поверхности клетки может говорить о злокачественном перерождении и запускает программы фагоцитоза и сворачивания крови.

Совершенно уникальной организацией мембран обладают (наряду с бактериями и эукариотами) архебактерии — третий «домен» жизни. Эволюционно они считаются более близкими родственниками эукариот, нежели бактерий, хотя по строению липидов мембраны этого не скажешь [5]. Видимо, в качестве адаптации к экстремофильности (способности обитать при высоких температуре, и/или солености, и/или кислотности), мембраны архей содержат липиды с нетипичным химическим строением (см. рис.1):

- конфигурация остатка глицерола иная;
- неполярные «хвосты» прикрепляются к этому остатку не сложными, а простыми эфирными связями;
- хвосты имеют не линейную структуру, а состоят из изопреновых звеньев, и, что самое интересное, архейные липиды могут быть биполярными («сшитыми» кончиками и пронизывающими всю мембрану насквозь) и содержать для большей прочности циклопентановые кольца, предположительно выполняющие функцию двойных связей в «обычных» фосфолипидах (регулирование температуры плавления).

Из всего сказанного следует, что липидный состав мембран отнюдь не является чем-то выбранным раз и навсегда [6]: он претерпел существенные изменения в процессе эволюции. По всей видимости, липидную организацию мембран эукариот можно считать эволюционно наиболее прогрессивной, поскольку она обеспечивает максимально гибкую адаптацию микроскопического окружения под нужды белковых молекул, создавая частично изолированные области в пределах одной, казалось бы, жидкой фазы.

Латеральная гетерогенность

Что же заставило исследователей усомниться в модели Сингера—Николсона и предположить, что мембрана — это нечто более сложно устроен-

ное, нежели липидный «океан», в котором плавают «айсберги» белков?

Во-первых, в каждой эукариотической клетке присутствует более 1000 разновидностей липидов — такое разнообразие обеспечивается комбинацией различных полярных «головок» и гидрофобных «хвостов» [7]. Из этого следует, что липиды играют множество ролей в организме (правда, структурные свойства мембран определяются, видимо, основными тремя-четырьмя компонентами, если не считать белки).

Во-вторых, распределение липидов и белков в плоскости мембраны неоднородно и характеризуется определенной структурой — латеральной гетерогенностью. Такая организация свойственна и сравнительно простым (например, трехкомпонентным) смесям липидов, которые используют в качестве моделей биомембран: в пределах единой жидкокристаллической фазы появляются микрофазы, не смешивающиеся между собой. В мембранах клеток подобная самоорганизация обеспечивает сортировку мембранных белков в различные компартменты в пределах одной и той же поверхности, повышая эффективность взаимодействия белков между собой.

И, в-третьих, функциональное состояние мембраны неустойчиво: может быть стационарным (когда концентрации разных липидов сохраняются примерно на том же уровне), но обязательно включает непрерывный обмен веществом (регенерация и «отпочковывание» участков мембраны).

В практическом смысле вышеперечисленное означает, что липиды, будучи жидкими, способны образовывать частично изолированные области бислоя, обладающие особыми структурными свойствами. Эти участки представляют собой кластеры («островки») молекул липидов, сравнительно более упорядоченные и «твердые», чем окружающая их более «жидкая» фаза. В конце 1990-х такие кластеры получили уже упомянутое название рафтов [8], и то же самое название было дано новой теории организации биологических мембран.

Существование двух жидких липидных фаз — относительно более и менее упорядоченное — оказывается возможным, если смесь содержит как минимум три разновидности липидов: «легкоплавкие» (с низкой температурой плавления и ненасыщенными «хвостами»), «тугоплавкие» (у которых температура плавления выше физиологической, насыщенные хвосты и/или высокая склонность образовывать водородные связи с соседями), а также холестерол (рис.3). «Тугоплавких» липидов в эукариотической мембране немного, в основном — сфингомиелин (производное церамида). Молекулы холестерола, по всей видимости, играют роль центров кристаллизации для доменов из «тугоплавких» липидов, однако его присутствие в то же время не позволяет им образовывать твердую (гелевую) фазу. Чтобы лучше представить возможные фазовые состояния в мембра-

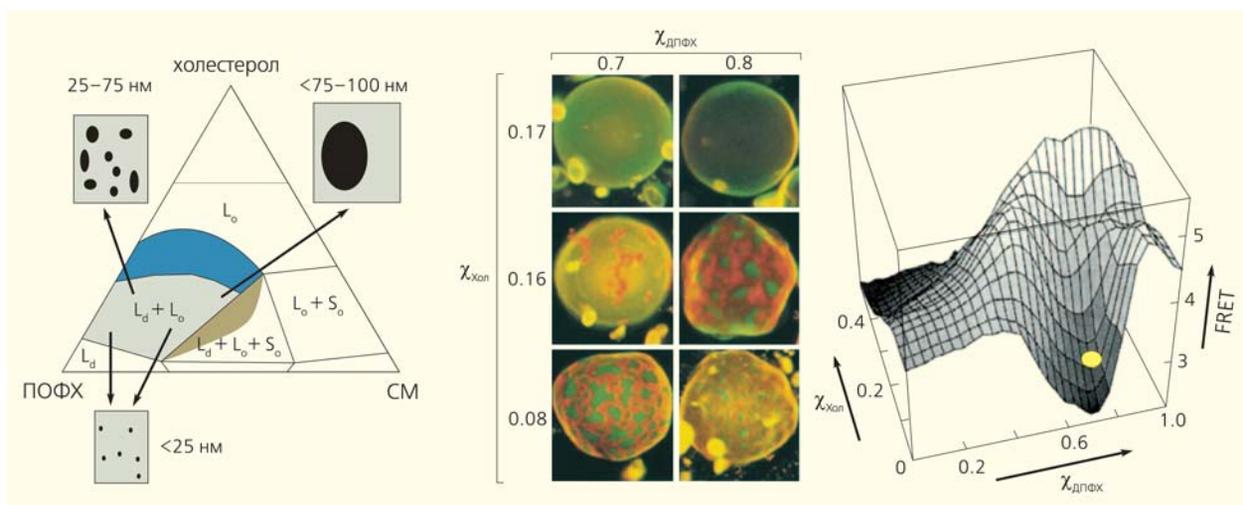


Рис.3. «Жидкое упорядоченное» состояние липидов в модельных мембранах [18]. Слева — фазовая диаграмма тройной смеси холестерина (Хол), сфингомиелина (СМ) и пальмитоилэтилфосфатидилхолина (ПОФХ). Цветные области соответствуют составам, при которых мембрана пребывает в жидком состоянии. Сосуществование жидкой упорядоченной (L_o) и жидкой неупорядоченной (L_d) фаз показано синим цветом: здесь при увеличении концентрации холестерина в диапазоне 10—35% размеры доменов L_o -фазы постепенно увеличиваются. В центре — микрофотографии гигантских везикул, состоящих из насыщенного (ДПФХ) и ненасыщенного (ДОФХ) фосфолипидов, а также холестерина. Образующиеся в везикулах макроскопические мембранные домены окрашиваются флуоресцентными красителями, «предпочитающими» упорядоченную (оранжевый цвет) или неупорядоченную (зеленый) фазу. При увеличении концентрации (χ) холестерина сверх 16% макроскопические домены уже не видны, но разделение L_o/L_d продолжает существовать, о чем говорит низкий сигнал флуоресцентно-резонансного переноса энергии (FRET) между молекулами красителя разных типов, находящихся в разных доменах (примерное положение двух верхних микрофотографий везикул обозначено справа желтым кругом).

не и в сложных липидных смесях, ее имитирующих, развясним основные понятия.

Твердую фазу, или гель (S_o , от англ. solid ordered), проще всего представить, вспомнив маргарин. Для нее характерно высокоупорядоченное состояние липидных «хвостов», приблизительно параллельных друг другу. Толщина бислоя, состоящего из липидов в этой фазе, будет максимальной, а площадь молекулы — минимальной.

Жидкая, или жидкокристаллическая, фаза (L , от англ. liquid) в биологических мембранах и сложных смесях существует в двух разных (и взаимно несмешивающихся) видах: упорядоченном (L_o , от англ. liquid ordered) и неупорядоченном (L_d , от англ. liquid disordered). L_o -фазу, с одной стороны, можно считать синонимом рафтов и липидных доменов в мембране, поскольку она отличается довольно высокой упорядоченностью липидных «хвостов», а значит и большей толщиной состоящих из нее липидных доменов; с другой стороны, это мезофаза, так как она обладает высокой латеральной подвижностью (за счет малого размера рафтов в мембране), что помещает ее примерно посередине между жидкостью и твердой фазой. L_d -фаза — это настоящая, свободно перемешивающаяся, жидкость, только в двух измерениях. Липидные «хвосты» в этой фазе максимально неупорядочены. Проще всего жидкую фазу L_d представить, посмотрев на масляное пятно, на по-

верхности которого переливаются радужные узоры.

Равновесие между L_o - и L_d -фазами было давно найдено в искусственных мембраноподобных системах — например, гигантских везикулах, изготовленных из липидов легочного сурфактанта (см. рис.3,б). Однако наблюдать такое разделение непосредственно в биологической мембране долгое время не удавалось. Но ведь липидный состав искусственных мембран был подобран максимально похожим на мембраны настоящие — так в чем же дело?

Проблема заключается в том, что в биологических мембранах L_o -фаза сильно раздроблена — максимальный размер рафтов не превышает 100 нм, а это недоступно для непосредственного наблюдения в оптический микроскоп. Причины, не позволяющие рафтам в живой клетке сливаться в крупные домены, видимые в оптический микроскоп (а именно это и происходит в искусственных мембранах), мы обсудим чуть позже.

На маленьком липидном плоту

Гипотеза рафтов возникла, когда увидели, что гликофинголипиды перед тем, как направиться к полюсам поляризованных эпителиальных клеток, не равномерно распределяются в комплексе Гольд-

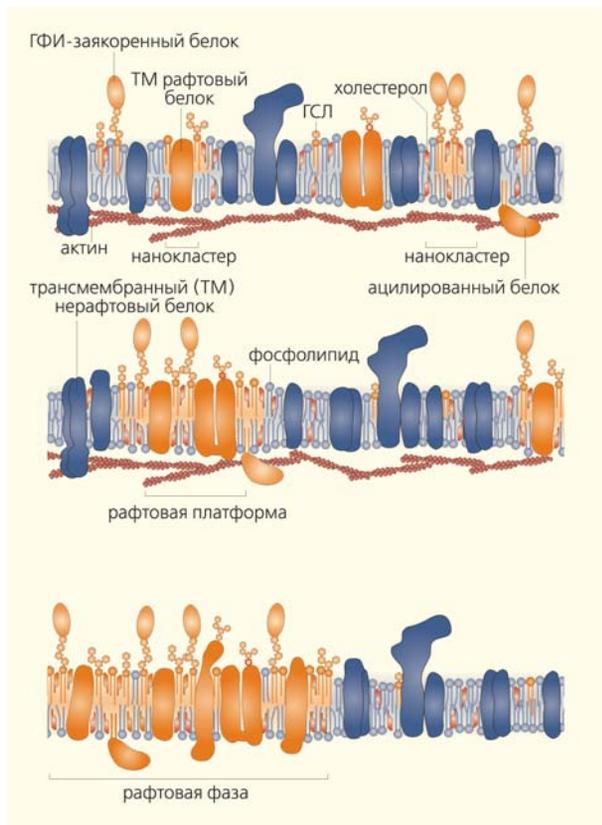


Рис.4. Рафтовые неоднородности в мембране различного масштаба [9]. Вверху — нанокластеры холестерина, сфингомиелина, гликофинголипидов и белков плазматической мембраны различаются по составу. Считается, что в эти кластеры входят ГФИ-заякоренные белки, трансмембранные (ТМ) белки, специфичные для рафтов, и цитоплазматические белки, связанные с актиновыми филаментами. «Обычные» ТМ-белки не входят в состав рафтов. В середине — в ответ на внешние сигналы нанокластеры могут сливаться с образованием рафтовой платформы, важной для ТМ-передачи сигналов и мембранного транспорта. Внизу — рафтовая фаза, видимая в микроскоп (диаметр ≈ 1 мкм), наблюдается исключительно в равновесных мембранных системах, таких как гигантские синтетические или мембранные везикулы. В «нативных» мембранах постоянный обмен веществом и энергией «дробит» рафтовую фазу до субдифракционных размеров.

жи, а кластеризуются вместе. Затем оказалось, что эти кластеры прочнее и устойчивее «обычных» участков мембран (не растворяются в детергенте «третон X-100») и состоят преимущественно из холестерина и сфингомиелина, а кроме того, в эти кластеры неизменно попадают белки — гликозилфосфатидилинозитол (ГФИ)-заякоренные белки. Логично было предположить, что эти плотные кластеры образуют стабильные «плоты» (размером примерно 50 нм), в которые встроены определенные типы белков. Подтверждением тому стали исследования, в которых синтетические мембраны,

содержащие холестерол и гликофинголипиды, проявили примерно те же свойства: липиды, разделяющиеся на две несмешивающиеся фазы, даже можно было разглядеть в микроскоп (рис.3,б).

Однако с течением времени стало понятно, что такое представление — противоположная крайность по сравнению с жидкостно-мозаичной моделью Сингера—Николсона: рафты далеко не столь стабильны, как это было постулировано первоначально. Вероятно, это динамические структуры, постоянно обменивающиеся молекулами липидов и белков с остальной частью мембраны; при этом липиды в рафтах упакованы гораздо более плотно и структурированно, нежели в окружающей «жидкой» мембране. Современное определение рафтов звучит так:

«Мембранные рафты — это маленькие (10–200 нм), гетерогенные и очень динамичные липидные кластеры (или домены), обогащенные холестеролом и сфинголипидами и принимающие участие в клеточной компартиментализации. В некоторых случаях рафты могут стабилизироваться за счет белок-белковых и белок-липидных взаимодействий, формируя более крупные «рафтовые платформы»» (рис.4) [9].

Однако, несмотря на то, что определение рафтам дано, само их существование представлялось до недавнего времени довольно-таки спорным, т.е. не подтвержденным в прямом эксперименте. Как же понимать этот парадокс?

Непосредственное изучение рафтов затруднено тем, что их очень сложно наблюдать «напрямую» из-за малого размера: типичный их предполагаемый диаметр меньше дифракционного предела оптической микроскопии (≈ 200 нм). Правда, в последние годы уже появились экспериментальные методики непосредственного наблюдения рафтовых кластеров. В частности, одна из разновидностей оптической микроскопии сверхвысокого разрешения — наноскопия индуцированного излучения — позволила установить, что ГФИ-заякоренные белки в течение достаточного длительного времени (10–20 мс) захватываются в сфинголипидно-холестерольные домены размером < 20 нм в мембранах живых клеток, т.е. в рафты (рис.5) [10].

Но даже с помощью этих точнейших наблюдений невозможно проникнуть в детали межмолекулярных взаимодействий, заставляющих липиды собираться в кластеры, а также «захватывать» с собой белки. Такую информацию могут дать методы компьютерного моделирования (*in silico*).

Кластеризация липидов *in silico*

Современные методы молекулярного моделирования позволяют изучить процесс самоорганизации липидных смесей с разной степенью детализации. Расчеты молекулярной динамики (МД) мо-

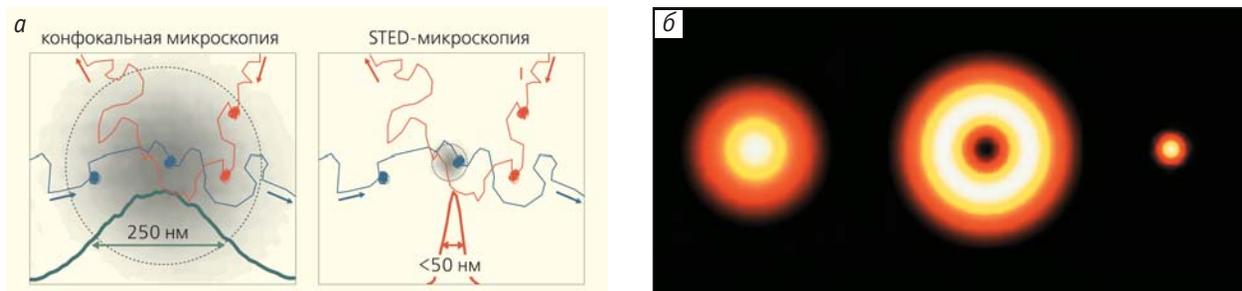


Рис.5. Преимущества микроскопии подавления индуцированного излучения (STED) в сравнении с конфокальной (а) [10]. STED-микроскопия — инновационный способ наблюдения липидной динамики мембран позволяет «заглянуть» за дифракционный барьер (т.е. различать объекты <200 нм). Образование L_0 -фазы связано с формированием доменов, обогащенных холестерином и сфингомиелином, что можно установить при помощи FRET-метода. Однако размер зоны, в пределах которой обычный конфокальный микроскоп позволяет различать детали (≈ 250 нм), оказывается слишком велик, чтобы точно определить, движутся ли две молекулы совместно (т.е. образуют домен) или независимо. STED-микроскопия с размером «зоны наблюдения» всего 50 нм позволила установить существование холестерольно-сфингомиелиновых доменов на живых клетках, положив конец спору о существовании рафтов в живых клетках. Принцип STED-микроскопии сходен с конфокальной микроскопией, но в этом случае кроме возбуждающего лазерного импульса (б, слева), запускающего свечение молекул-флуорофоров, используется также кольцевой формы гасящий импульс (б, в центре), уменьшающий эффективный радиус зоны возбуждения флуорофоров до ≈ 50 нм (б, справа), что в 4–5 раз меньше пресловутого «дифракционного барьера».

дельных мембран*, в которых все атомы липидов и окружающего растворителя представлены в явном виде, дают наиболее полную информацию. И хотя при таком подробном рассмотрении системы, доступные для моделирования даже на современных суперкомпьютерах, ограничены в своих размерах (10^2 – 10^3 молекул липида) и длительности наблюдения за их динамическим поведением ($<10^{-6}$ с), получаемые результаты дают атомарную картину возникновения мембранных неоднородностей в наномасштабе. Даже в случае однокомпонентной липидной мембраны ее поверхность не является однородно полярной, как это можно было бы предположить из схематического представления липидов в виде «шариков с хвостиками»; часть этих «хвостиков» всплывает на границу вода–мембрана и формирует гидрофобные участки (рис.б). В итоге мы имеем мозаично организованную поверхность, на которой в полярном «море» рассредоточены гидрофобные «островки» размером до нескольких квадратных нанометров [11].

При смешивании двух компонентов, например насыщенного (дипальмитоил-) и ненасыщенного (диолеил-) фосфатидилхолинов (ДПФХ и ДОФХ соответственно), картина усложняется — наблюдается обособление более «твердой» фазы (ДПФХ) в стабильные нанокластеры, равномерно распределенные в плоскости мембраны [12]. При моделировании трехкомпонентных мембран, в состав которых входят холестерол, сфингомиеин и ДОФХ, даже на небольших временах МД ($2 \cdot 10^{-7}$ с) наблюдается настоящее фазовое раз-

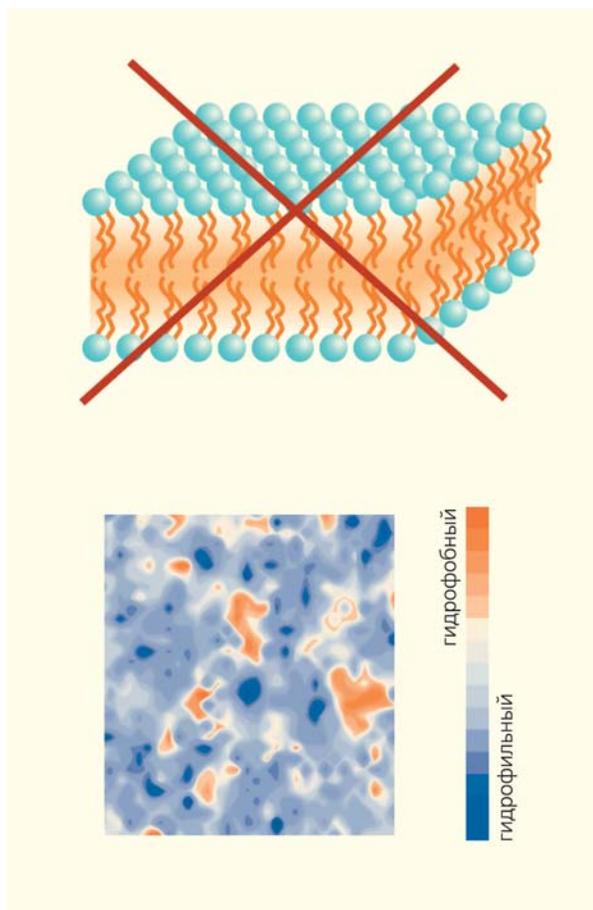


Рис.6. Мозаичная организация поверхности простейшей однокомпонентной мембраны. Вверху представлена идеальная модель мембраны, внизу — поверхность полноатомной мембраны (ДОФС), раскрашенной по гидрофобности.

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

деление, при котором «тугоплавкий» сфингомиелин формирует островок, по границе которого располагается холестерол, обращенный своей «щетинистой» стороной во внешнюю фазу «легкоплавкого» ДОФХ [13].

Увеличить размер моделей, а также время наблюдения за многокомпонентными мембранами *in silico* позволяет упрощенное («крупнозернистое») описание молекул (когда группы из трех-четырех атомов для ускорения расчетов объединяют в «зерна»). Такая методика позволила впервые «увидеть» разделение L_o/L_d -фаз в мембране из нескольких тысяч молекул, содержащей 40% насыщенного ДПФХ, 30% ненасыщенного дилинолеилфосфатидилхолина (ДЛФХ) и 30% холестерола, моделируемых в течение 20 мкс [14]. Более того, если к такой модельной мембране добавить трансмембранные спиральные пептиды (минимальные «строительные блоки» большинства мембранных белков), можно будет наблюдать, как происходит их сортировка между фазами — моделируемые фрагменты белка предпочитают находиться в более жидкой L_o -фазе ДЛФХ и избегают упорядоченной L_d -фазы ДПФХ (рис.7) [15].

Стоит отметить, что возникновение латеральной гетерогенной структуры в мембране наблюдается при смешивании не только «тугоплавких»

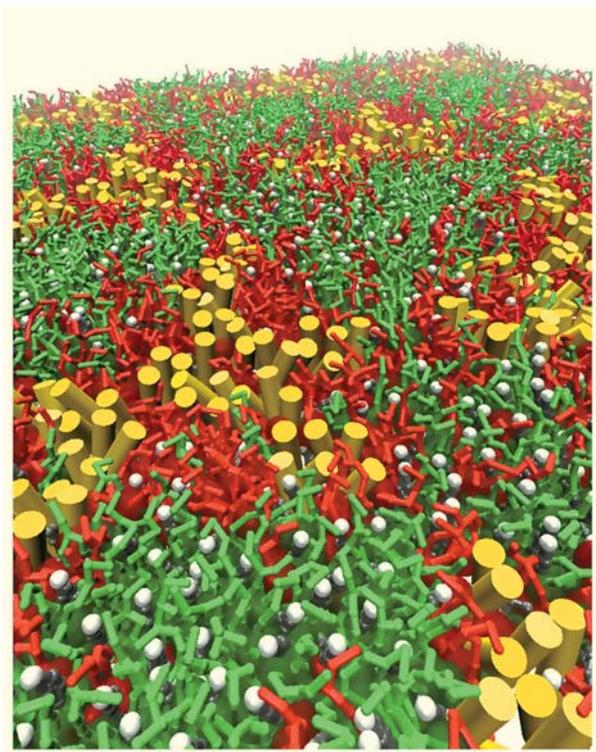


Рис.7. Предпочтительная локализация трансмембранных пептидов WALP23 (выделено желтым) в L_o -фазе. Модельная мембрана состоит из липидов ДЛФХ, ДПФХ (показано красным и зеленым, соответственно) и холестерола (серые вкрапления круглой формы).

и «легкоплавких» липидов, но и любых других, отличающихся по своим физико-химическим свойствам (например, по заряду полярной головки и склонности образовывать водородные связи с соседями). В частности, в модельной бактериальной мембране, содержащей 70% фосфатидилэтанолamina (ФЭ) и 30% отрицательно заряженного фосфатидилглицерола (ФГ) также формируются нанодомены. Происходит это за счет того, что молекулы ФЭ эффективно взаимодействуют друг с другом и вытесняют «невыгодного» партнера ФГ. Использование «крупнозернистых» моделей позволило установить, что такая латеральная организация мембран бактерий участвует в процессе связывания антимикробных пептидов, которые при этом вызывают рост доменов ФГ и возникновение фазового разделения [16].

Что ограничивает размер рафтов в биомембранах

В реальных экспериментальных системах существует достаточно парадоксальный контраст с искусственными мембранами, в которых разделение фаз L_o/L_d наблюдали неоднократно и при разных условиях. В живой клетке это удалось сделать непосредственно лишь недавно, да и то с использованием самых современных технологий субдифракционного наблюдения [10]. В чем же причина такого разительного отличия?

На границе рафтовой фазы создается поверхностное (линейное) натяжение, а значит, там присутствует избыточная свободная энергия, снизить которую можно путем слияния отдельных «плотиков» в одну большую макрофазу. Примерно то же самое наблюдается в супе, на поверхности которого мелкие капли жира постепенно объединяются в более крупные пятна. Фактически то же самое происходит и в искусственных мембранах (например, в мембранных везикулах): самопроизвольный термодинамический процесс толкает к глобальному разделению L_o - и L_d -фаз. Но это означает, что отсутствие в живой клетке крупных L_o -кластеров — следствие активных процессов, протекающих с затратой энергии. (Возвращаясь к аналогии с супом — мы никогда не увидим одного большого пятна жира в кипящей кастрюле.) С одной стороны, это может происходить «само», поскольку мембрана, как и сама жизнь, — система, далекая от термодинамического равновесия. С другой — эволюция физико-химических свойств мембраны могла направленно выработать такое приспособление, поскольку оно позволяет мембранам выполнять свои функции более эффективно.

Так или иначе, в мембранах протекает ряд процессов, постоянно «дробящих» рафты, — именно поэтому их так долго и не могли с достаточной степенью уверенности «нащупать». Это постоян-

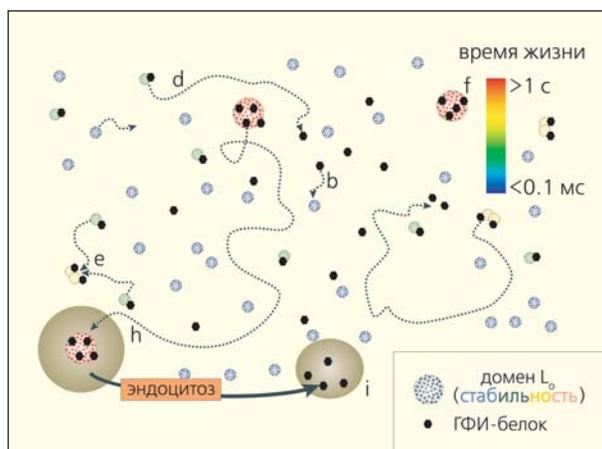


Рис.8. Динамическая модель рафтов. Домены L_o -фазы в мембране гетерогенны как по размеру, так и по времени существования ($0.1 \text{ мс}^{-1} \text{ с}$, показано цветом): это зависит от размера, липидного состава и «захваченных» белков, способных стабилизировать рафт. Длина пунктирных стрелок, изображающих латеральную подвижность доменов, пропорциональна времени жизни ($a - i$). Рафтовые платформы в биомембранах, хотя и выполняют важные функции, являются динамическими структурами, постоянно возникающими и исчезающими вновь.

ный обмен веществом и энергией, ведь мембраны представляют собой открытые системы: помимо многочисленных разновидностей везикулярного транспорта отдельные фрагменты мембраны выполняют и другую работу — «заглатываются» внутрь клетки и после какой-то переработки возвращаются обратно.

Анализ огромного массива биохимических и биофизических данных, накопившихся за последние 15 лет, привел ученых к выводу, что состав липидного матрикса мембран эволюционно подобран так, чтобы при физиологических условиях всегда находиться вблизи фазового перехода (рис.8). Это способствует образованию в мембранах рафтов. Какова же их роль?

Биологическая роль наноразмерных неоднородностей в мембране

Роль такого сложного фазового поведения липидного матрикса мембран еще только предстоит понять в полной мере. Впрочем, уже сегодня ясно главное — такие свойства позволяют группировать (сортировать) разные белки в частично изолированные области, что дает им возможность выполнять свои функции. Эти свойства определяют и то, как мембранам делиться и сливаться, что важно и для деления самих клеток, и для везикулярного транспорта, и для проникновения внутрь клеток вирусов, токсинов и т.д. Приведем лишь несколько примеров [17].

Передача сигналов при дифференциации T-лимфоцитов. В основе приобретенного иммунитета лежит процесс «обучения» T-лимфоцитов распознавать определенные антигены и уничтожать их, при этом «учителями» становятся антиген-презентирующие клетки (АПК). «Обучение» T-лимфоцитов происходит в непосредственном контакте с АПК с образованием иммунологического синапса. Оказывается, рецепторы T-клеток, входящие в этот синапс, кластеризуются именно в рафтовой фазе. Если эта фаза образовываться не будет (например, в лабораторном эксперименте из мембран исключают холестерол), то никакого «обучения» не будет и иммунитет не сформируется.

«Почкование» вирусных частиц. Многие вирусы, покидая зараженную ранее клетку, облачаются в липидную оболочку — часть мембраны клетки-хозяина. Некоторые из них, в частности ВИЧ и вирус гриппа, «отпочковываются» от рафтовых участков мембраны, что приводит к тому, что вокруг их собственного нуклеокапсида образуется липидная «скорлупа», состоящая целиком из рафтовых липидов. Делается это, видимо, затем, чтобы в оболочку попали вирусные гликопротеины и не попадали ненужные вирусу мембранные белки клетки-хозяина.

Участие рафтов в мембранном транспорте. Выработка секретируемых белков и доставка мембранных начинают с эндоплазматического ретикулума (ЭР) с «промежуточной остановкой» в комплексе Гольджи. В этом транспорте на основе все тех же принципов разделения фаз в липидных системах играет роль жидкая упорядоченная фаза (рафты). Установлено, что существует три различных пути выхода везикул с белковым «грузом» из ЭР: два из них отвечают за транспорт растворимых белков, а третий служит «портом отправления» ГФИ-заякоренных белков, расположенных внутри рафтов в мембране клетки. Так вот, уже на стадии ЭР эти белки транспортируются в везикулах, близких по составу рафтам (насыщенных холестеролом и церамидами).

Некоторые рафтовые липиды — «тройные кони» для бактериальных токсинов и вирусов. В частности, шигатоксин (токсин бактерий, вызывающих дизентерию) и холерный токсин, формируя пентамерный «бублик», захватывают рафтовые гликофинголипиды — ганглиозиды Gb3 и GM1, что провоцирует образование «впячиваний» мембраны в виде трубочек, а это и лежит в основе токсического действия этих микроорганизмов.

Кажущаяся простота липидного «океана» осталась в прошлом, но и сейчас исследователи лишь приблизительно представляют все молекулярные тонкости образования кластеров в липидах. Точно так же далек от понимания и механизм «сортировки» одних белков в рафтовую фазу, а других —

в более жидкую область мембраны. Между тем это понимание дало бы возможность создать стратегию рафт-селективной доставки в клетку различных веществ, в том числе лекарств.

Все рассказанное в этой статье относится в первую очередь к мембранам эукариот, но это еще не означает, что у бактерий нет ничего подобного (раз нет и холестерина). Изучение латеральной неоднородности бактериальных мембран может привести к созданию новых антибио-

тиков, избирательно уничтожающих патогенные микроорганизмы и свободных от проклятия резистентности, давно уже нависшего над «традиционными» антибактериальными средствами.

История с изучением липидного матрикса мембран в очередной раз показывает, что живая материя устроена значительно сложнее, чем представлялось ранее, и изобретение новых высокоточных методик наблюдения лишь подчеркивает эту сложность. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 07-04-01514-а, 10-04-01217-а и 11-04-01606-а.

Литература

1. Singer SJ, Nicolson GL. The fluid mosaic model of the structure of cell membranes // *Science*. 1972. №175. P.720–731.
2. Bagatolli LA, Ipsen JH, Simonsen AC, et al. An outlook on organization of lipids in membranes: searching for a realistic connection with the organization of biological membranes // *Prog. Lipid. Res.* 2010. №49. P.378–389.
3. Meer G.van, Voelker DR, Feigenson GW. Membrane lipids: where they are and how they behave // *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* 2008. №9. P.112–124.
4. Cavalier-Smith T. Predation and eukaryote cell origins: a coevolutionary perspective // *Int. J. Biochem. Cell Biol.* 2009. №41. P.307–322.
5. Itob YH, Sugai A, Uda I, Itob T. The evolution of lipids // *Adv. Space Res.* 2001. №28. P.719–724.
6. Gotob M, Sugawara A, Akiyoshi K, et al. Possible molecular evolution of biomembranes: from single-chain to double-chain lipids // *Chem. Biodivers.* 2007. №4. P.837–848.
7. Piomelli D, Astarita G, Rapaka R. A neuroscientist's guide to lipidomics // *Nat. Rev. Neurosci.* 2007. №8. P.743–754.
8. Simons K, Ikonen E. Functional rafts in cell membranes // *Nature*. 1997. №387. P.569–572.
9. Jacobson K, Mouritsen O.G., Anderson R.G. Lipid rafts: at a crossroad between cell biology and physics // *Nat. Cell Biol.* 2007. №9. P.7–14.
10. Eggeling C, Ringemann C, Medda R, et al. Direct observation of the nanoscale dynamics of membrane lipids in a living cell // *Nature*. 2009. №457. P.1159–1162.
11. Polyansky AA, Volynsky PE, Arseniev AS, Efremov RG. Adaptation of a membrane-active peptide to heterogeneous environment. II. The role of mosaic nature of the membrane surface // *J. Phys. Chem.* 2009. B.113. P.1120–1126.
12. Pyrkova DV, Tarasova NK, Pyrkov TV, et al. Atomic-scale lateral heterogeneity and dynamics of two-component lipid bilayers composed of saturated and unsaturated phosphatidylcholines // *Soft Matter*. 2011. №7. P.2569–2579.
13. Pandit SA, Jakobsson E, Scott HL. Simulation of the early stages of nano-domain formation in mixed bilayers of sphingomyelin, cholesterol, and dioleoylphosphatidylcholine // *Biophys. J.* 2004. №87. P.3312–3322.
14. Risselada HJ, Marrink SJ. The molecular face of lipid rafts in model membranes // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2008. №105. P.17367–17372.
15. Domanski J, Marrink SJ, Schäfer LV. Transmembrane helices can induce domain formation in crowded model membranes // *Biochim. Biophys. Acta*. 2011. doi:10.1016/j.bbammem.2011.08.021.
16. Polyansky AA, Ramaswamy R, Volynsky PE, et al. Antimicrobial Peptides Induce Growth of Phosphatidylglycerol Domains in a Model Bacterial Membrane // *J. Phys. Chem. Lett.* 2010. №1. P.3108–3111.
17. Simons K, Gerl MJ. Revitalizing membrane rafts: new tools and insights // *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 2010. №11. P.688–699.
18. Hancock JF. Lipid rafts: contentious only from simplistic standpoints // *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 2006. №7. P.456–462.

Нейтринная геофизика — первые шаги

М.Д.Скорохватов

Как читатели узнали из статьи Н.М.Буднева в последнем номере журнала за прошлый год, нейтринная обсерватория позволяет попутно проводить интересные геофизические исследования, поставляя информацию о важных физических характеристиках среды. Однако этим роль нейтринной физики в геофизике не ограничивается — заметное место здесь принадлежит, как ни странно, самим нейтрино. В настоящей заметке речь пойдет о так называемых геонейтрино.



Михаил Дмитриевич Скорохватов, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института общей и ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», заведующий кафедрой физики элементарных частиц НИЯУ МИФИ, руководитель с российской стороны международного проекта «Борексино» (Borexino). Область научных интересов — ядерная физика и физика частиц, в том числе нейтринная.

Что такое «геонейтрино»

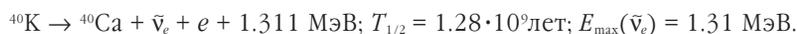
Что скрывается за этим названием? Начальная часть сложных слов «гео», как известно, говорит о принадлежности предмета к Земле. Так что же такое «земные нейтрино», каковы их источники и почему нужно их регистрировать и изучать? Здесь мы попытаемся ответить на эти вопросы.

Согласно современным представлениям, наша планета состоит из нескольких внутренних слоев: земной коры, верхней и нижней мантии, разделенных переходной зоной, и внешнего и внутреннего ядра. Это стало известно благодаря косвенному методу получения информации о внутреннем строении Земли — в результате исследований распространения сейсмических волн. Распространение

сейсмических волн, возникающих при землетрясениях и мощных взрывах, зависит от свойств внутренних пород, через которые они проходят, отражаясь и преломляясь на границах раздела между пластами разного типа. А вот о том, как сформировалась подобная структура нашей планеты, мы можем лишь строить более или менее правдоподобные гипотезы. Во всех моделях существенная роль отводится теплу: при образовании Земли происходило высвобождение гравитационной энергии, запасенной при начальной конденсации материи. Планета продолжает остывать до сих пор, тепло из внутренних областей излучается в океан, атмосферу и далее в космическое пространство.

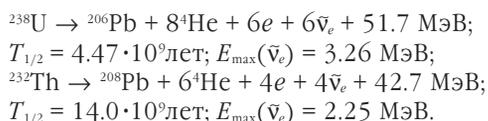
После открытия радиоактивности и изучения свойств радиоактивных элементов стало ясно, что может существовать и другой источник нагрева планет — содержащиеся в породах нестабильные изотопы, которые претерпевают превращения в результате альфа- и бета-распадов с выделением энергии. Такие естественные источники радиоактивности хорошо известны. Это несколько радиоактивных ядер с большими периодами полураспада, сравнимыми с временем жизни нашей планеты, т.е. ядра, которые еще не успели распастаться. Основными генераторами тепла служат три изотопа — это уран-238, торий-232 и калий-40.

В случае бета-распада калия образуется стабильное ядро кальция:



Уран и торий претерпевают цепочки превращений, которые в итоге приводят к рождению стабильных изотопов свинца. В ходе этих трансформаций возникают многочисленные тяжелые осколки, которые так и остаются в глубинах Земли. Однако некоторые из

данных распадов, как и распад калия-40, приводят к появлению электронного антинейтрино:



Свойства электронных антинейтрино и их распространение в веществе к настоящему времени изучены достаточно хорошо — эти частицы почти не взаимодействуют с веществом, легко пронизывают всю толщу земного шара и несут информацию о процессах своего рождения. Такие электронные антинейтрино и принято называть «геонейтрино», что отражает их происхождение.

Очевидно, что количественная информация о радиогенных элементах — производителях тепла имеет первостепенное значение для определения энергетического баланса, который, в свою очередь, служит ключом к пониманию образования и эволюции Земли. В частности, особый интерес представляет распределение тепла в мантии, так как оно определяет конвективные движения, которые связаны с вулканической деятельностью и перемещениями тектонических плит.

Радиогенное тепло в геотермическом балансе

Геологические исследования внутреннего состава Земли ограничиваются корой, где используются данные приблизительно 40 тыс. буровых скважин, распределенных по земному шару. Правда, самые глубокие из них не превышают 10–12 км (12 262 м на Кольском п-ове) — при толщине коры на суше в десятки километров. Усредненный тепловой поток из недр Земли составляет примерно 80–90 мВт/м² (для сравнения: средний солнечный поток на поверхности — 400 Вт/м²). Измерение геотермического градиента в разных точках земной поверхности позволяет сделать оценки глобальных тепловых потерь планеты. Однако такие оценки для разных расчетов расходятся до полутора раз: от ≈30 до ≈46 ТВт. В наиболее популярной модели значение суммарного потока тепла от Земли составляет 44±1 ТВт, причем вклад радиогенного тепла предсказывается на уровне 20 ТВт: 8 ТВт от цепочек распада урана-238, еще 8 ТВт от цепочек распада тория-232 и 4 ТВт от распада калия-40. Таким образом, в этой модели приблизительно половина тепла планеты производится радиоактивными изотопами, а другая половина — это остаточное тепло нашей планеты, запасы которого еще не исчерпаны.

Отметим и другие модели, в которых предполагается разный вклад радиоактивных распадов в глобальное производство тепла планеты, от полностью радиогенного происхождения тепла до минимального вклада, когда в расчет принимается

распад урана, тория и калия только в коре и верхней мантии. Более подробное описание моделей радиогенного тепла можно найти в обзоре [1].

Скорее всего, основные запасы урана и тория сосредоточены в континентальной коре, в недрах которой производится связанное с их распадами тепло — от 5 до 10 ТВт по разным оценкам, а массовые отношения Th:U и K:U по данным космохимических и геохимических наблюдений составляют около 4 и примерно 1.4·10⁴. Но существует также гипотеза, что некоторая часть урана, тория и других очень тяжелых элементов в процессе дифференциации первичного вещества планеты могла опуститься к центру Земли и сконцентрироваться там в небольшой области. Такое предположение подразумевает возможность протекания цепной реакции деления, т.е. образования в центре планеты природного ядерного реактора. Этот реактор может генерировать энергию для поддержания механизма геодинамо. Накопление продуктов деления (шлаков) при выгорании урана ослабляет интенсивность цепной реакции и может даже привести к прекращению работы реактора, которая, однако, возобновляется при удалении шлаков в результате диффузии. Эта гипотеза, следовательно, способна объяснить изменение и даже инверсию земного магнитного поля, происходящую каждые 200 тыс. лет. Согласно гипотезе мощность геореактора может составлять 5–10 ТВт.

Нейтринные установки

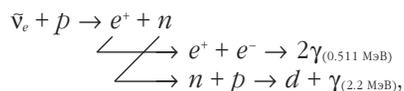
Поскольку нейтрино крайне слабо взаимодействуют с материей, т.е. обладают высокой проникающей способностью, Земля для геонейтрино практически прозрачна, что дает возможность использовать их в качестве прямого зонда для изучения внутренних областей планеты. Измеряя потоки геонейтрино на поверхности в разных точках Земли, мы можем точно фиксировать расположение источников излучения и составить карту радиогенного тепловыделения нашей планеты.

Однако высокая проникающая способность нейтрино значительно осложняет регистрацию: детектор должен иметь огромный объем и быть хорошо защищенным от фоновых излучений. Критическим фактором оказывается близость места проведения измерений к атомным электростанциям, так как ядерные реакторы испускают в процессе цепной реакции деления огромные потоки антинейтрино, которые будут имитировать регистрацию установкой геонейтрино.

Существует и еще одна особенность распространения нейтрино: по мере удаления от источника геонейтрино, рожденное как электронное антинейтрино, может с определенной вероятностью трансформироваться в другие нейтринные состояния — мюонное и тау. Этот эффект, предсказанный Б.М.Понтекорво, называется нейтринными осцил-

ляциями; для наблюдателя он будет проявляться в уменьшении потока геонейтрино в точке регистрации. Осцилляции были изучены, и была определена вероятность того, что геонейтрино останется в состоянии электронного антинейтрино, которая для больших расстояний составляет $P_{ee} = 0.57$.

Детектирование геонейтрино осуществляется по реакции обратного β -распада $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$:



которая применялась еще в середине 50-х годов прошлого века в пионерских экспериментах Ф.Райнеса и К.Коуэна по обнаружению свободного антинейтрино. Порог этой реакции составляет 1.8 МэВ. Поэтому, используя данный метод, можно зарегистрировать только небольшую часть антинейтрино от цепочки распада урана и тория (рис.1), и, к сожалению, нельзя обнаружить антинейтрино от распада калия-40, энергия которых менее 1.3 МэВ.

Геонейтрино сегодня регистрируются двумя экспериментальными установками, KamLand и Borexino (рис.2).

О первом указании на сигнал от геонейтрино было заявлено в 2005 г. коллаборацией KamLand [2] на основании данных, полученных на установке, которая расположена на о. Хонсю в шахте «Камиока» в Японии. Она предназначена для поиска нейтрино от различных источников, в том числе и земных. Нейтринный детектор установки представляет собой сцинтилляционный спектрометр, содержащий 1000 т жидкого сцинтиллятора (ЖС). ЖС приготовлен на основе органического раство-

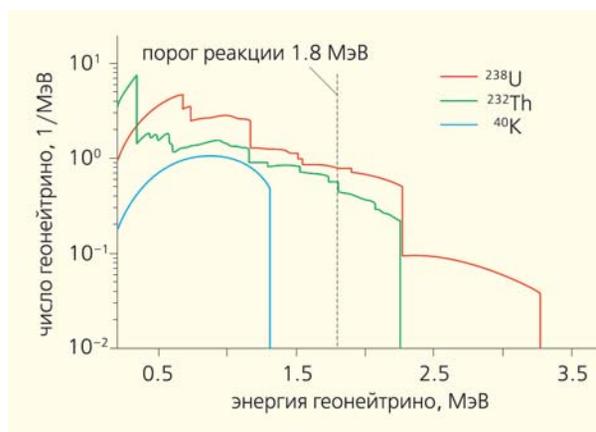


Рис.1. Энергетический спектр геонейтрино.

рителя — водородосодержащей среды, которая служит мишенью для геонейтрино. ЖС содержится в прозрачной сфере диаметром 13 м; для уменьшения внешнего фонового излучения она окружена 2.5-метровым слоем парафинового масла. События реакций взаимодействия регистрируются фотоэлектронными умножителями по двум сцинтилляционным вспышкам — сначала от позитрона, затем от захвата нейтрона водородом в ЖС. Две эти вспышки разнесены во времени — интервал между ними соответствует замедлению и диффузии нейтрона (несколько сотен микросекунд). С помощью процедуры реконструкции событий в мишени измеряется энергия геонейтрино и восстанавливаются координаты точки взаимодействия. В процессе анализа отбираются события в центральном объеме, содержащем 600 т ЖС, где

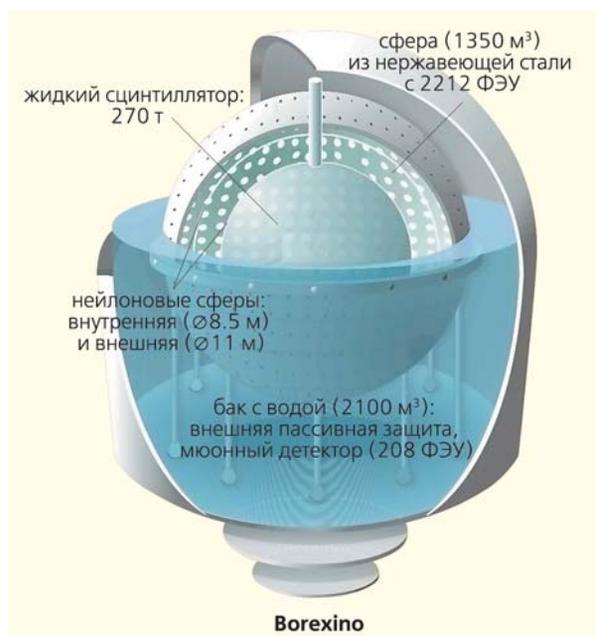
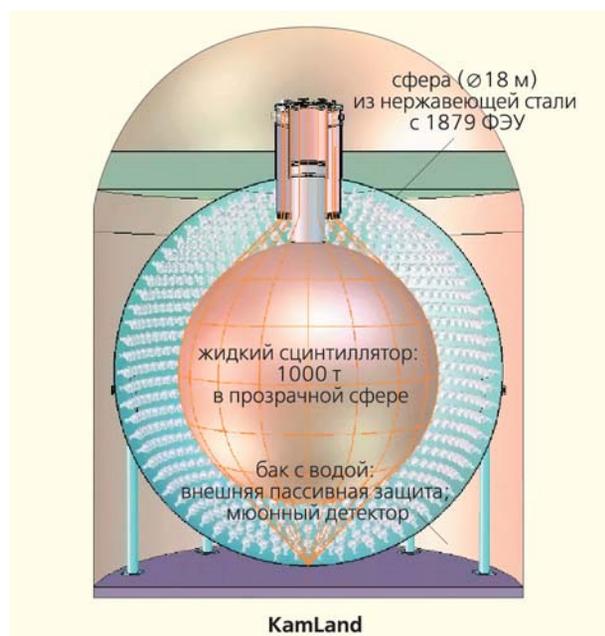


Рис.2. Крупномасштабные нейтринные детекторы, с помощью которых были зарегистрированы геонейтрино.

лучше соотношение эффекта и фона. Процессы, вызванные космическими мюонами, отсекаются с помощью сигналов внешнего вето-детектора.

Из-за большого числа АЭС вблизи детектора изучение геонейтрино в лаборатории «Камиока» затруднено, и в этом отношении вторая подземная лаборатория — в горном массиве Гран Сассо в центре Италии — оказывается более удачным местом. Здесь расположен другой экспериментальный комплекс — Borexino [3], созданный при участии российских ученых из Курчатовского института, Объединенного института ядерных исследований, Петербургского института ядерной физики им. Б.П.Константинова и Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В.Скобельцина МГУ. В самой Италии атомных станций нет, а европейские АЭС находятся на расстояниях ~1000 км. Хотя установка тоже построена для универсальных нейтринных экспериментов, задаче поиска именно геонейтрино на ней уделяется значительное внимание.

Внутренняя структура детектора состоит из нескольких слоев. Внешний заполнен 2400 т сверхчистой воды, защищающей детектор от природной радиоактивности горных пород и материалов внешних конструкций. Этот слой способен регистрировать редкие космические мюоны, что позволяет распознавать фоновые события. Следующий слой — стальная сфера, заполненная 1000 т сверхчистого углеводородного соединения, используемого для защиты центральной части детектора. На внутренней поверхности стальной сферы установлены 2200 фотоэлектронных умножителей, реагирующих на очень слабые вспышки света, которые происходят при взаимодействии нейтрино с веществом в детекторе. И, наконец, в центре находится прозрачный нейлоновый шар радиусом 4.25 м, содержащий 270 т ЖС. Уровень очистки жидкого сцинтиллятора, достигнутый в установке Borexino, превышает аналогичные показатели любого другого детектора. Как следствие, фон Borexino оказался рекордно низким. Анализ данных, как и в эксперименте KamLand,

проводится на основе энергетической и пространственной реконструкции событий с выделением внутренней области мишени, имеющей хорошее соотношение эффекта и фона.

Результаты

Экспериментальные данные установок KamLand [4] и Borexino [5], набранные до 2010 г. и уже проанализированные, представлены в таблице. Для сравнения измеренных установками потоков геонейтрино полезно привести значения в расчете на одинаковый объем мишени (например, 100 т) и на равный интервал времени регистрации (например, один год). Пересчитанные величины доказывают наличие в каждом эксперименте положительных эффектов от геонейтрино, которые в пределах пока еще больших погрешностей находятся в согласии. В то же время следует обратить внимание, что, согласно моделям, ожидаемый поток геонейтрино в детекторе KamLand, расположенном вблизи океанической коры, должен быть меньше потока в центральной Италии. Сопоставление измеренных потоков геонейтрино с ожидаемыми значениями показано на рис.3.

Как видно из рисунка, данные KamLand лучше согласуются с моделью, предполагающей 50%-й вклад радиогенного тепла, тогда как данные Borexino не отвергают и предсказания модели с максимальным (100%) вкладом. Усреднение данных двух экспериментов позволяет оценить количество полного радиогенного тепла в 20 ± 9 ТВт [4]. Этот результат имеет большую погрешность, однако это первая количественная величина, показывающая, что значительная доля тепла нашей планеты (возможно, половина) связана с распадом радиоактивных элементов в недрах Земли.

Теперь вернемся к гипотезе о существовании геореактора в центре Земли. Согласно предсказаниям, его мощность может лежать в пределах 3—10 ТВт. Как и обычные реакторы на АЭС, геореактор должен генерировать мощные потоки анти-

Таблица

Обработанные данные двух установок

Детектор	KamLand	Borexino
Время набора данных	03.02–11.09 2135 дней (4126 т·лет)	12.07–12.09 537 дней (252.6 т·лет)
Среднее расстояние от детектора до АЭС	200 км	1000 км
Полное число зарегистрированных событий-кандидатов, среди которых выделено:	841	21
событий от реакторов	484.7±26.5	10.7 ^{+4.3} / _{-3.4}
фоновых событий	244.7±18.4	0.42±0.06
Число зарегистрированных геонейтрино	111 ⁺⁴⁵ / ₋₄₃	9.9 ^{+4.1} / _{-3.4}
Скорость счета геонейтрино на 100 т мишени в год	2.7 ^{+1.1} / _{-1.0}	3.9 ^{+1.6} / _{-1.3}
Измеренные потоки геонейтрино, см ⁻² ·с ⁻¹	(4.3 ^{+1.2} / _{-1.1})·10 ⁶	(7.1 ^{+2.0} / _{-2.4})·10 ⁶

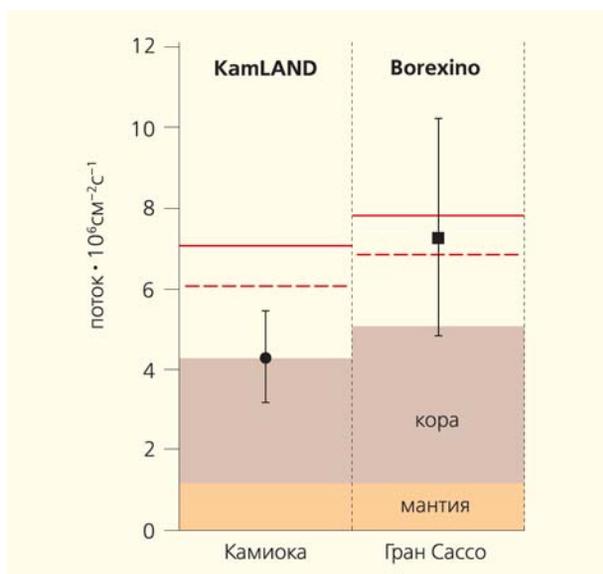


Рис.3. Измеренные потоки геонейтрино и их ожидаемые значения. Закрашенные области — данные модели с 50%-м вкладом радиогенного тепла, красная линия — данные модели максимального радиогенного тепла. Неопределенности моделей не включены.

нейтрино со сходным энергетическим спектром. Поэтому, если он существует, детекторы регистрировали бы избыток потока антинейтрино по отношению к ожидаемому потоку от реакторов АЭС. В пределах погрешностей измерений такого избытка детекторы KamLand и Borexino не обнаружили, а тщательный анализ данных позволил установить верхнюю границу мощности гипотетического геореактора. Лучшее ограничение было получено в эксперименте Borexino — 3 ТВт [5]. Это означает, что экспериментальные результаты не отвергают возможности существования геореактора, но с мощностью не более 3 ТВт. Дальнейший набор статистики позволит уточнить эти данные. Таким образом, вопрос о природном геореакторе внутри планеты пока остается открытым.

Перспективы

Первые успешные наблюдения геонейтрино знаменуют рождение нового направления науки — нейтринной геофизики. Развитие технологий ре-

гистрации ядерных излучений и достижение беспрецедентно высокой чувствительности детекторов к природным потокам антинейтрино стимулируют выполнение более детальных исследований, разработку и реализацию новых проектов в этой молодой области науки.

В будущем ожидается ввод в действие новых детекторов геонейтрино: в Канаде (SNO+), в Финляндии (LENA), в США — на Гавайских о-вах, а также в России, в Баксанской нейтринной обсерватории. Эти установки будут проводить измерения в различных точках планеты, что значительно улучшит наши знания о радиогенных источниках тепла. Особый интерес представляют места вдалеке от ядерных реакторов, а также расположенные как на континентальной, так и на океанической коре. Измерения на океанической коре, которая значительно тоньше континентальной, дадут возможность оценить содержание урана и тория внутри мантии, а сопоставление данных разных детекторов позволит лучше понять глобальное распределение источников радиогенного тепла внутри планеты.

Во всех новых проектах планируется значительное увеличение чувствительного объема детекторов. Например, в проекте LENA мишень сцинтилляционного детектора должна составлять ~30 тыс. т, что в десятки раз увеличит скорость набора статистики и позволит достичь 2–3%-й точности в течение трех лет измерений потоков геонейтрино. И не только. Уточнение энергетических спектров поможет установить соотношение урана и тория. Таким образом, экспериментальные данные станут основанием для проверки и отбора разных геофизических моделей.

Все настоящие и планируемые детекторы нечувствительны к антинейтрино от распада калия-40. Поэтому одной из важнейших задач остается разработка новых методов регистрации нейтринного излучения, чтобы можно было создать детекторы с более низким порогом регистрации, «улавливающие» и эти частицы.

В заключение отметим, что возможности работающих детекторов до конца еще не исчерпаны. Среди ближайших задач — дальнейший набор статистики и анализ данных в эксперименте Borexino, которые благодаря хорошему соотношению эффекта и фона детектора дают уверенность в существенном повышении точности уже полученных результатов. ■

Литература

1. Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F. Geoneutrinos and earth's interior // Phys. Rep. 2007. V.453. P.117—172.
2. Araki T., Enomoto S., Furuno K. et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLand // Nature. 2005. V.436. P.499—503.
3. Скорохватов М.Д. Солнечные нейтрино и эксперимент «Борексино» // Природа. 2009. №5. С.13—24.
4. Gando A., Gando Y., Ichimura K. et al. Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements // Nature Geoscience. 2011. V.4. P.647—651.
5. Bellini G., Benziger J., Bick D. et al. Observation of geoneutrinos // Phys. Lett. B. 2010. V.687. P.299—304.

Витамин D

и все, все, все

А.И.Козлов

В вообще-то речь пойдет только об одном: об особенностях обмена кальция в организме человека. Но без упоминаний о «всяческих вещах»: генах и солнце, рыбе и лишайниках, коровах и оленях, нам не обойтись.

Нормальное развитие костной системы требует достаточного поступления кальция и его усвоения в необходимых количествах. Это два разных процесса: поступление вещества обусловлено составом пищи, усвоение — особенностями метаболизма. Для усвоения кальция требуется вещество, традиционно обозначаемое как «витамин D». Называют его так неправильно. Витамины — вещества, которые организм представителей данного биологического вида не может синтезировать сам, хотя жить без них не способен, поскольку они служат катализаторами биохимических процессов. Хороший пример — аскорбиновая кислота: для неспособных к ее синтезу приматов (включая и нас, *Homo sapiens*) это витамин С, но для остальных млекопитающих она не витамин, поскольку организм любого волка, тюленя или мыши сам вырабатывает нужное количество необходимой нам «аскорбинки».

С витамином D сложнее. Его источник — пища (и в этом отношении он — вполне добропорядочный витамин), однако при определенных условиях наш организм может его синтезировать.



Андрей Игоревич Козлов, доктор биологических наук, кандидат медицинских наук. Руководитель ряда российских и международных исследовательских проектов, участник многочисленных экспедиций. Область научных интересов — медицинская антропология народов Севера, Волго-Уральского региона, Сибири.

Этот эндогенный продукт, строго говоря, витамином считать нельзя: он ближе к гормонам, и современные исследователи предпочитают вести речь о целом витамин-D-эндокринном комплексе. Но для краткости я дальше буду говорить об «экзо- и эндогенном витамине D», поскольку нам важна именно эта специфика.

Выделен витамин D в 1924 г. А.Гессом и М.Вейнштоком: они воздействовали на растительные масла ультрафиолетовыми волнами в диапазоне 280–315 нм. В середине 1930-х, благодаря исследованиям А.Виндауса, стала ясна «двойственная» природа витамина, в частности его способность образовываться в коже млекопитающих. С тех пор препараты витамина стали широко использовать для профилактики и лечения рахита — наиболее распространенного заболевания при D-гиповитаминозе (хотя рыбий жир как «антирахитическое средство» применяли и в XIX в.).

Последние 25–30 лет изучения витамина D принесли очередные важные открытия. Среди них обнаружение того факта, что метаболит витамина, 25-гидроксивитамин D₃ (25ОНD₃), — не только одна из промежуточных форм его обмена, но и едва ли не основной резервуар витамина D в организме. А поскольку концентрация 25ОНD₃ в крови меняется сравнительно медленно (период полувыведения составляет две-три недели — для физиологического показателя большой срок), появилась возможность изучать витаминный статус целых популяций, оперируя при этом точными количественными показателями.

Сегодня роль витамина D видится нам значительно большей, чем казалась еще десятилетие назад. Согласно современным оценкам, он обеспечивает до 3% вклада в реализацию генома человека. От витаминного статуса зависят строение костей, функциональное состояние мышеч-

ной системы и даже уровень интеллекта. Рахит — только одно (правда, наиболее известное) проявление D-гиповитаминоза. Сейчас мы не воспринимаем его как серьезное заболевание, но вплоть до начала XX в. рахитически суженный таз у женщин обычно приводил к осложнениям в родах. Распространение рахита и частая гибель рожениц рассматривают как одну из причин вымирания первой волны европейских переселенцев в Гренландию в начале XV в. Так что с точки зрения антрополога, обеспеченность витамином D — один из мощных факторов, влияющих на популяцию.

В современных условиях удалось значительно снизить частоту тяжелых гиповитаминозов и выраженных форм рахита. Но умеренно выраженный D-гиповитаминоз по-прежнему нередок в американских, европейских и российских популяциях. Так, среди взрослых французов он обнаружен у 14%, среди жителей американского Бостона — у 24—42%. Результаты наших обследований школьников Пермского края и Республики Коми показывают, что в некоторые сезоны года недостаток витамина (как правило, умеренной степени) распространен среди детей северных регионов Европейской России.

Для специалиста в области биологии человека наличие экзо- и эндогенного вариантов обеспечения организма витамином D — хороший пример эволюционной и экологической

пластичности регуляции минерального обмена: в зависимости от конкретных условий среды обитания ведущую роль принимает либо кожа, либо пища.

Выработку эндогенного витамина D инициируют УФ-В-волны (280—315 нм — те самые, которыми занимались еще А.Гесс и М.Вейншток): они вызывают кожную реакцию, и потому называются эритемной радиацией. Исторически, эволюционно мы все темнокожие (ведем родословную от темнокожих африканцев, кожа которых из-за высокого содержания меланина пропускает в глубокие слои всего около 7% УФ-В-волн). Но 1.8—1.4 млн лет назад некоторые виды гоминид начали проникать из Африки в регионы с меньшей инсоляцией, и у них, видимо, возникли проблемы с регуляцией минерального обмена. Во всяком случае для населявших Европу 130—28 тыс. лет назад наших «двоюродных братьев» неандертальцев эти проблемы стали настолько острыми, что в их популяциях распространился мутантный аллель *mcl1r*, частично выводящий из строя меланокортиновый рецептор. Под действием этого аллеля снижается выработка черно-коричневой разновидности меланина (эумеланина) и возникает дисбаланс в пользу рыжего феомеланина. Кожа становится менее смуглой, ее отражающая способность повышается, но зато глубоких слоев достигает почти треть (до 29%) УФ-В-волн: феомеланин связывает их гораз-

до слабее, чем его темный аналог. В результате выработка эндогенного витамина D значительно возрастает.

У людей современного физического типа, проникших в Европу позже неандертальцев, отбором были подхвачены подобные (хотя и не те же!) мутации. В результате распределение современных групп *H.sapiens* с разной интенсивностью кожной пигментации коррелирует с географической широтой их проживания. Исследования взрослых мужчин коренного населения Африки, Европы, Азии, Океании и Америки показали, что все темнопигментированные популяции располагаются в пределах 20° широты севернее и южнее экватора. Группы со средним содержанием меланина населяют территории в пределах 20—40-й параллелей, а популяции с наименьшим содержанием меланина в коже — в широтах севернее и южнее 40°.

Однако географическая широта лишь косвенно связана с уровнем ультрафиолетового облучения. Его интенсивность на одной и той же широте зависит от числа солнечных дней в году, высоты над уровнем моря, толщины озонового слоя атмосферы и многих других факторов. Поэтому сопоставлять уровень содержания меланина в коже правильнее непосредственно с инсоляцией. Исследования подтвердили: чем ниже уровень эритемной радиации, тем светлее кожа. Одно из немногих исключений из этой закономерности

Таблица

Доля детей до 18 лет с недостатком витамина D в обследованных выборках (содержание 25-OHD3 ниже 50 нмоль/л)

Населенный пункт / регион обследования; географическая широта	Недостаток витамина D, %	Источник*
Ижма (Республика Коми, РФ; 65°с.ш.)	96	Собственные данные
Корткерос (Республика Коми, РФ; 62°с.ш.)	72	Собственные данные
Турку (Финляндия; 61°с.ш.)	68	Lehtonen-Veromaa et al., 1999
Берген (Норвегия; 60°с.ш.)	43	Holvik et al., 2008
Орда (Пермский край, РФ; 57°с.ш.)	47	Собственные данные
Подмосковье (РФ; 56°с.ш.)	38	Смирнова и др., 2010
Эдмонтон (Канада; 52°с.ш.)	40	Roth et al., 2006

* Подробную библиографию см.: [12].

сти — относительно темнопигментированные коренные народы Арктики. У них синтез эндогенного витамина D должен быть снижен, но его недостаток компенсируется экзогенным («истинно витаминным») путем. Раньше считали, что его поставляют тюленина, моржатины и рыба. Те, кто постарше, помнят ужасный рыбий жир, которым нас пичкали в детстве. Как выяснилось в последние годы, в высоких широтах имеется еще один, поистине уникальный, источник витамина D — оленина. Дело в том, что в биохимическом отношении предшественником витамина служат растительные стеролы, которые продуцируют водоросли. Основу же питания оленя составляют лишайники — симбиотические организмы, состоящие из грибов и водорослей. Олень (как и рыба) аккумулирует эргокальциферол в своих тканях [1], а человек, как консумент более высокого порядка, получает с олениной значительное количество витамина.

Потребление рыбы и оленины при традиционном образе жизни северян было высоким. По нашим оценкам, у кольских саамов (одного из самых «бедных» оленеводческих народов Евразии!) в начале XX в. на человека приходилось в среднем 117 кг оленины и 70 кг рыбы в год [2], что соответственно в 1.6 и 3.5 раза больше, чем у ны-

нешнего жителя РФ (в 2008 г. на каждого из нас пришлось 74.8 кг мяса и 19.7 кг рыбы). Исследования показали, что даже у современных оленеводов содержание витамина D выше, чем у представителей антропологически близких групп, живущих южнее, но с оленеводством не связанных. Так, у оленеводов коми-ижемцев содержание в сыворотке крови 25ОНD₃ равно в среднем 68.7 нмоль/л, а у обследованных в тот же сезон коми-пермяков — всего 44.7 нмоль/л [3].

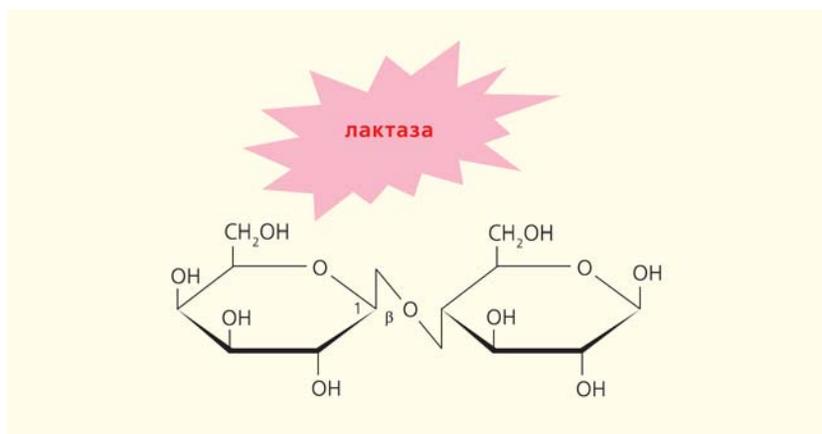
Частые упоминания о географической широте не случайны. Согласно распространенным представлениям, жители северных регионов подвержены большей опасности гиповитаминоза D по сравнению с обитателями юга и умеренных широт. Однако это мнение верно лишь в самом общем случае. О роли диеты в поддержании оптимального витаминного статуса мы уже говорили, о значении ультрафиолетового облучения — тоже. Но, как выяснилось опять-таки совсем недавно, даже «умеренные» широты в отношении уровня эритемной радиации и выработки эндогенного витамина D — слишком «северные». Проведенные в США исследования показали, что в коже жителей регионов, лежащих севернее 35° с.ш., витамин D с ноября по март практически не синтезируется [4]. Но 35-я па-

раллель, пересекающая в Новом Свете штаты Оклахома, Техас, Калифорния, — это широта африканского Марокко и ближневосточных Ливана и Ирана, так что вся территория Европы (и тем более Российской Федерации) в этом контексте должна рассматриваться как «север».

Но в континентальной Европе рыбы мало, северного оленя нет совсем, и солнца, как мы видим, тоже недостаточно. Возможное решение проблемы — получение дополнительных количеств кальция (вспомним, что речь-то идет, по сути, о минеральном составе костей) с какой-то пищей. Оптимальным продуктом в этом отношении является молоко, но проблема в том, что усваивать его могут только детеныши млекопитающих. У всех зверей по мере взросления снижается активность фермента лактазы, расщепляющей молочный сахар-лактозу (это явление называется гиполактазией), и подросший детеныш после материнского молока испытывает неприятные ощущения в животе. Это заставляет его в определенном возрасте от молока отказаться — и в результате мать может перейти к выкармливанию следующего потомка. Заметим, кстати, что содержание витамина D в молоке невелико: с ним грудной младенец может получить лишь малую часть необходимой суточной дозы (по разным оценкам — от 4 до 10%). Так что речь идет в первую очередь о молоке как источнике кальция.

Активность лактазы генетически детерминирована, и еще в 1970-х годах стало ясно, что в некоторых группах людей по каким-то причинам отбором поддерживается высокая доля носителей мутантного аллеля: его обладатели во взрослом состоянии стабильно сохраняют «детскую» способность расщеплять лактозу и в результате без неприятных последствий пьют молоко.

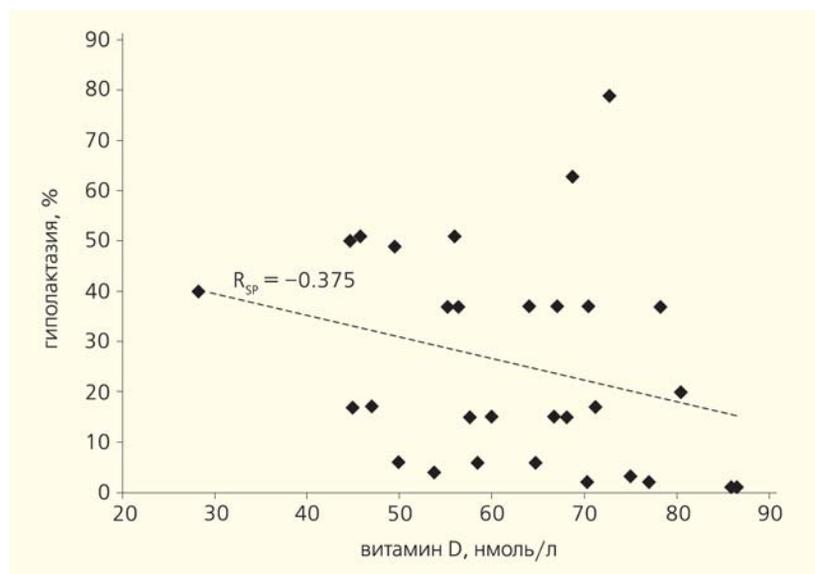
Несколько лет назад удалось определить сначала участок



Для расщепления крупной молекулы молочного сахара (дисахарида лактозы) необходим фермент лактаза.

хромосомы, на котором локализован ген лактазы у человека, затем установить локализацию самого гена (он получил название *LCT*) и в конце концов подтвердить, что его аллельное состояние действительно детерминирует способность взрослых к употреблению молока. На территории РФ мы обследовали около 20 популяций от Чукотки до Кольского п-ова и от Ледовитого океана до Центрального Поволжья, а привлечение данных по другим популяциям России и мира позволило составить карты распределения признака в Старом Свете, Евразии и на территории Урала [5–8].

Но на определенном этапе исследований возникло подозрение, что распространенная в то время культурно-генетическая гипотеза возникновения стабильной активности лактазы у человека имеет ряд слабых мест. В самом кратком виде эту гипотезу можно изложить следующим образом: «Одомашненные человеком коровы вывели породу людей, способную пить молоко». Идея красивая, но когда мы с Д.В.Лисицыным составили карту истории распространения домашних коров, оказалось, что она не совпадает с картой гена лактазы [9]. В Европе частота мутантного аллеля стабильной активности лактазы снижается с запада на восток, а граница разведения молочного скота с неолита до Средневековья перемещалась почти строго с юга на север. Максимальная доля носителей интересующего нас аллеля концентрируется в северо-западной Европе, у побережья Северного и Балтийского морей, хотя этот регион далек от Малой Азии — ближайшего к Европе региона одомашнивания молочного скота. Но, как показывают работы последнего десятилетия, северо-западная Европа характеризуется максимальным генетическим разнообразием крупного рогатого скота. Согласно постулатам эволюционной генетики, это означает, что скотоводство



Корреляция содержания витамина D и частоты гиполактазии в европейских популяциях.

и выведение разнообразных пород крупного рогатого скота именно здесь на протяжении веков были более интенсивными, чем где-либо.

Не связано ли это с особо высокими потребностями европейцев в молоке как источнике кальция, компенсирующем недостаток витамина D? В поисках ответа на этот вопрос мы с Г.Г.Вершубской исследовали связь между уровнем УФ-В-облучения и распространенностью гиполактазии в 54 популяциях Европы, Ближнего и Среднего Востока. Великолепным источником информации об уровне эритемной радиации послужили открытые для общего пользования данные искусственного спутника NASA «EarthProbe/TOMS». Правда, чтобы воспользоваться ими, пришлось разработать специальное программное обеспечение: спутник передает результаты измерений в виде непрерывной цепочки цифр, которую необходимо «разрезать» на фрагменты, несущие информацию об уровне УФ-В-радиации в конкретной точке планеты в определенное время. Работа себя оправдала: оказалось, что с повышением среднегодового уровня УФ-В-облучения в попу-

ляции нарастает доля носителей аллеля гиполактазии и соответственно снижается доля индивидов со стабильной активностью лактазы. Другими словами, чем ниже инсоляция в регионе, тем больший процент взрослого коренного населения сохраняет способность пить молоко, получая с ним дополнительный кальций и избегая таким образом формирования рахитически суженного таза, переломов, мышечной слабости и т.п.

Выявленная закономерность проявляется только во внутропических и внearктических областях и наиболее ярко выражена в популяциях, населяющих регионы между 23-й и 61-й параллелями. Но и среди них более южные народы выделяются в особый кластер (мы условно обозначили его как «средиземноморский»), в котором в среднем 67% взрослых не усваивают молоко. В популяциях другого, «среднеевропейского», кластера (обитающих в регионах с невысоким уровнем УФ-В радиации) носителей генотипа гиполактазии вдвое меньше — всего 28%.

Раздел между кластерами прошел не так далеко от 35-й параллели — той самой услов-

ной «границы», севернее которой, по мнению американских исследователей, в зимнее время достаточного количества эндогенного витамина D у человека не образуется. Это совпадение натолкнуло нас на мысль сравнить данные о содержании 25ОНD₃ в сыворотке крови с долей носителей гена гиполактазии в популяции. Такие материалы удалось подобрать для 30 групп населения Европы: выборка небольшая, поскольку пришлось тщательно учитывать сезон года и возраст обследованных — эти факторы влияют на концентрацию витамина в крови. Но и на этом материале проявилась обратная связь между содержанием 25ОНD₃ и частотой гиполактазии. Немного утрируя, можно сказать, что чем больше витамина D в крови, тем меньше нужда в молоке как источнике кальция.

Это проясняет и важность молочного животноводства в Се-

верной Европе, и отсутствие жизненной необходимости в нем в тропиках и Арктике. Сравнительно невысокий уровень УФ-облучения в северо-западной Европе требовал компенсации в виде богатых кальцием продуктов, а благоприятные условия для молочного скотоводства создавали существенное давление отбора в пользу фенотипов со стабильной активностью лактазы. В областях с очень низким уровнем эритемной радиации (Субарктике, Арктике) поступление витамина D обеспечивали входящие в традиционные диеты рыбий жир и оленина. А в тропиках и субтропиках — что ж, там и солнышка вполне хватало...

Идея о том, что минеральный обмен кости нормализуется в результате «замещения» витамина D поступающим с молоком кальцием, сама по себе не нова. Но только сейчас, после появления методик количественной

оценки содержания 25ОНD₃ в организме, доказательства связи между генотипом и фенотипическими проявлениями активности лактазы, объединения антропологических, генетических и экологических подходов к решению медицинских задач, мы получили возможность ее строгой проверки.

Безусловно, такую работу необходимо продолжать.

Британские исследователи Дж.Дэвис и Н.Шоу [10] утверждают: дефицит витамина D и рахит — проблемы решаемые, только вот стратегии для их разрешения пока не разработано. И это в государстве, подавляющая часть населения которого живет на территории, лежащей существенно южнее Москвы. Мы же — страна северная, и изучение D-витаминного статуса населения, сезонной динамики этого показателя, актуально уже в силу географической локализации российских популяций. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 10-04-96005-р-урал-а.

Литература

1. Björn L.O., Wang T. Vitamin D in an ecological context // Int. J. Circumpolar Health. 2000. V.59. №1. P.26—32.
2. Козлов А.И., Лисицын Д.В., Козлова М.А. и др. Кольские саамы в меняющемся мире. М., 2008.
3. Козлов А.И., Атеева Ю.А. Витамин D и особенности питания различных групп коми // Вестн. Моск. ун-та. Сер. XXIII: Антропология. 2011. №3 (в печати).
4. Webb A.R., Kline L., Holick M.F. Influence of season and latitude on the cutaneous synthesis of vitamin D₃: exposure to winter sunlight in Boston and Edmonton will not promote vitamin D₃ synthesis in human skin // J. Clin. Endocrinol. Metab. 1988. V.67. P.373—378.
5. Козлов А.И. Гиполактазия: распространенность, диагностика, врачебная тактика. М., 1996.
6. Козлов А.И., Балановская Е.В., Нурбаев С.Д., Балановский О.П. Геноегеография первичной гиполактазии в популяциях Старого Света // Генетика. 1998. Т.34. №4. С.551—561.
7. Соколова М.В., Бородин Т.А., Гасемианродсари Ф., Козлов А.И. и др. Полиморфизм ассоциированного с гиполактазией локуса C/T-13910 гена лактазы LCT у восточных славян и иранцев // Мед. Генетика. 2005. №11. С.523—527.
8. Боринская С.А., Ребриков Д.В., Нефедова В.В. и др. Молекулярная диагностика и распространенность первичной гиполактазии в популяциях России и сопредельных стран // Молекулярная биология. 2006. Т.40. №6. С.1031—1036.
9. Kozlov A., Lisitsyn D. History of dairy cattle-breeding and distribution of LAC*R and LAC*P alleles among European populations / Eds C.Renfrew, K.Boyle // Archaeogenetics: DNA and the population prehistory of Europe. McDonald Institute for archaeological Research. Cambridge, 2000. P.309—313.
10. Davies J.H., Shaw N.J. Preventable but no strategy: vitamin D deficiency in the UK // Arch. Dis. Child. 2010. July 23; (2010) adc.2010.191627v1.
11. Козлов А.И., Атеева Ю.А., Вершубская Г.Г., Рыжаенков В.Г. Содержание витамина D у детей школьного возраста Приуралья и северо-запада РФ // Педиатрия. 2012. №1 (в печати).



«Ископаемая» ДНК в современных геномах

И.А.Захаров-Гезехус

Сегодня каждый школьник должен знать, что генетическая информация, которая делает человека человеком, собаку — собакой и т.п., записана в молекулах ДНК. При делении клеток и при размножении организмов молекулы ДНК воспроизводятся, и генетическая информация в неизменном (или почти неизменном) состоянии передается в ряду поколений на протяжении миллионов лет. В погибшей же клетке ДНК не воспроизводится, но остается, и записанная в ней информация в течение того или иного времени сохраняется неразрушенной. Сколь долго — это зависит от условий, в которых находится погибшая клетка: при низкой температуре и умеренной влажности ДНК может сохраняться несколько десятков тысяч лет. Об этом, в частности, свидетельствует успешное прочтение генома (т.е. свойственного данному виду набора молекул ДНК) некоторых ископаемых животных, в том числе сибирского мамонта [1]. Однако достоверных примеров присутствия неразрушенной ДНК в ископаемых (возрастом более 100 тыс. лет) останках высших организмов нет, и восстановление динозавров юрского периода по их ДНК представляется сейчас неосуществимой фантазией.

Как было сказано, для неограниченно долгой сохранности генетической информации необходимо воспроизведение



Илья Артемьевич Захаров-Гезехус, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института общей генетики РАН им.Н.И.Вавилова. Научные интересы связаны с проблемами общей генетики и истории науки. Постоянный автор «Природы».

тех клеток, в ДНК которых она записана. Если бы фрагменты молекул ДНК ископаемых существ оказались в клетках организмов, доживших до нашего времени, то они и сейчас несли бы записанную в них информацию. Такие случаи известны, и я приведу три наиболее ярких примера. Начну с того организма, который изучаю уже более 35 лет, а именно с двуточечной божьей коровки, поскольку в ее геноме сохранилась особенно древняя ДНК.

Двуточечная божья коровка

Этот жук (*Adalia bipunctata*) — исключительно широко распространенный вид. Его ареал охватывает умеренные области и Старого, и Нового Света. Внимание энтомологов и генетиков с начала XX в. привлекала изменчивость морфологических

признаков (окраски надкрылий и переднеспинки) двуточечной божьей коровки, но ее ДНК стали изучать намного позднее. Лишь в 2002 г. работавший в Кембридже молодой немецкий биолог Х.Шуленбург и коллеги (среди которых был и автор настоящей статьи) изучили разнообразие (полиморфизм) митохондриальной ДНК (мтДНК) клетки [2]. В этих небольших молекулах содержится всего лишь 37 генов. Наиболее полные данные получили для двух европейских популяций — Москвы (Россия) и Билефельда (Германия). При изучении последовательности нуклеотидов в двух генах обнаружили 10 разных вариантов мтДНК, так называемых митотипов.

При более детальном изучении популяции Санкт-Петербурга нашли еще семь митотипов [3]. Наиболее часто встречающийся обозначили как Н1. Из остальных митотипов 14 от-



Коровки подвида *Adalia bipunctata fasciatopunctata* — это двуточечные божьи коровки, несмотря на то что у некоторых на надкрыльях много пятен.

Здесь и далее фото автора

личались от Н1 всего лишь одной—четырьмя заменами нуклеотидов. От всех 15 митотипов резко отличаются два — Н9 и особенно Н10.

В дальнейшем с учетом наблюдаемых различий определили, что время эволюционного расхождения митотипа Н10 и остальных составляет 1.13 млн лет, а по другим оценкам еще больше — 2.1—2.5 млн лет. Мы (автор статьи и Е.В.Шайкевич) также попытались оценить различия митотипов Н1 и Н10. При сравнении стандартной последовательности одного из генов мтДНК (571 нуклеотид), широко используемой в так называемом штрихкодировании* геномов, различие между митоти-

пами Н1 и Н10 составило 7.00%. Ю.Ф.Картавец свел данные по тысячам видов животных, включая и насекомых [4]: внутривидовые различия между популяциями составляют в среднем 0.89, между подвидами и близнецовыми видами — 3.78, между морфологически отличающимися видами одного рода — 11.06%. Таким образом, различия митотипов Н1 и Н10 приближаются к уровню различий «хороших» видов.

О древности присутствия в генофонде вида *A.bipunctata* митотипов группы Н1 и Н10 говорит и тот факт, что одинаковый полиморфизм по мтДНК обнаруживается как в европейских популяциях, так и в популяции из Бурятии, которая относится к особому подвиду — *A.bipunctata fasciatopunctata*. Таким образом, митотипы Н10 и остальные сосуществовали в предковой популяции *A.bipunctata* еще до того, как этот вид расселился по Евразии от Западной Европы до Забайкалья и до того, как диф-

ференцировался подвида *A.bipunctata fasciatopunctata*, отличающийся от европейской формы узором на надкрыльях. Все эти факты свидетельствуют о древности митохондриального полиморфизма *A.bipunctata*.

От какого вида из рода *Adalia* происходит митотип Н10? Наиболее близки к *A.bipunctata* три вида: *A.decempunctata*, *A.tetraspilota*, *A.frigida*. Ареал первого охватывает умеренные области Европы, где вместе с ним сосуществует и *A.bipunctata*. Спаривание между ними возможно, но яйца при этом не развиваются. *A.tetraspilota* — индийский вид, встречающийся и на южной части территории бывших республик советской Средней Азии. В частности, в Ташкенте (Узбекистан), по моим наблюдениям, обитают и *A.bipunctata*, и *A.tetraspilota*. Еще Я.Я.Лусис указывал, что эти виды репродуктивно изолированы [5]. Наконец, *A.frigida* живет на севере Евразии, от Скандинавии до Якутии. По моим наблюдениям, в Архангельске *A.bipunctata* и *A.frigida* обитают совместно. Насколько они генетически изолированы — не вполне ясно.

Мы определили нуклеотидные последовательности начальной части митохондриального гена COI (области, используемой при штрихкодировании) четырех видов рода *Adalia*, в том числе митотипов Н1 и Н10 *A.bipunctata*. Митотип Н10 показывает некоторое сходство с последовательностью *A.frigida*, но значительно отличается и от нее, и от последовательностей других видов. Вероятно, в настоящее время в природе не сохранился тот вид, от которого *A.bipunctata* заимствовала при гибридизации митотип Н10.

Для понимания того, какие факторы обеспечили сохранение в генофонде *A.bipunctata* привнесенного в результате межвидовой гибридизации митотипа Н10, важно следующее. Особи митотипа Н10 в большинстве заражены цитоплазматической симбиотической бактери-

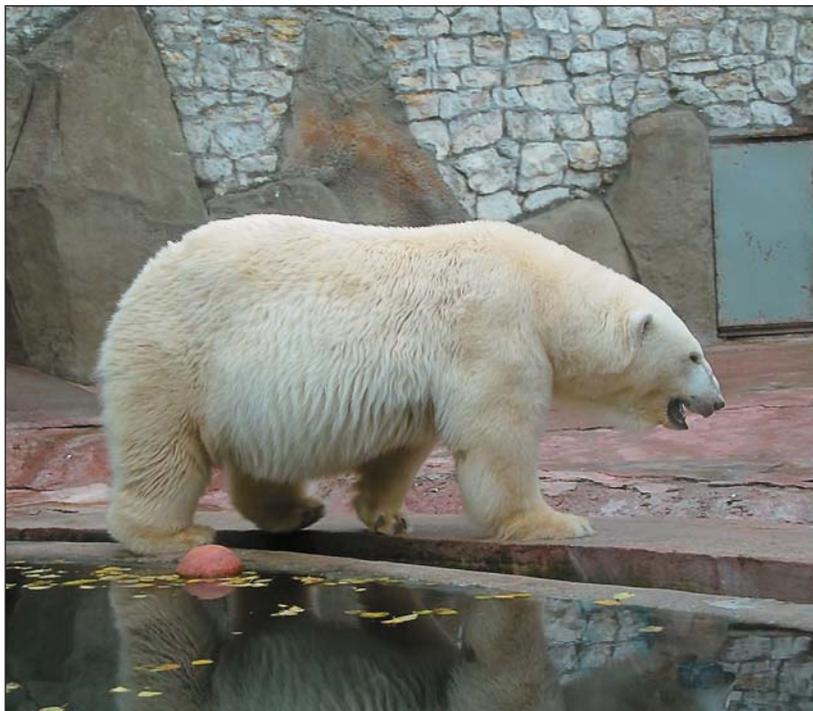
* Штрихкодирование в данном случае — это определение последовательности нуклеотидов в стандартном фрагменте мтДНК, что позволяет идентифицировать вид животного. Подробнее см.: Захаров ИА, Шайкевич ЕВ, Ившин НВ. ДНК-штрихкодирование в энтомологии // Природа. 2007. №9. С.3—9.

ей *Rickettsia AB*, которая убивает самцов на ранней стадии эмбрионального развития [6]. Зараженные самки оставляют только женское потомство, получая при этом определенное преимущество перед незараженными: вылупляющиеся личинки поедают неразвившиеся яйца с мужскими эмбрионами своих братьев и таким образом с самого начала имеют запас корма для прохождения первых стадий развития. Цитоплазматические бактерии, как и митохондрии, передаются потомству трансвариально («через яйцо»), т.е. по женской линии, обнаруживая своеобразный эффект сцепления с мтДНК. Биологическое преимущество самок, дающих бессамцовое потомство, может обеспечить как сохранение в популяции зараженных риккетсией линий, так и поддержание «сцепленных» с инфицированностью митотипов.

Можно предположить следующий сценарий происхождения современного генома *Abipunctata*. Некогда на одной территории совместно обитали два близких вида — *Abipunctata* и *Adalia Z*. Особи последней с мтДНК типа H10 оказались заражены риккетсией, что привело к резкому сокращению числа самцов этого вида. Дефицит самцов вынуждал самок *Adalia Z* скрещиваться с самцами *Abipunctata*. Гибридные самки повторно осеменялись самцами *Abipunctata*. В дальнейшем вид *Adalia Z* исчез, а его мтДНК вошла в геном *Abipunctata*. При расселении последнего вида по территории Евразии и его дифференциации на подвиды, митотип H10, «сцепленный» с риккетсией, сохранился до сих пор в большинстве популяций *Abipunctata*.

Белый медведь

Все живущие сейчас на Земле белые медведи происходят от одной бурой медведицы. Об этом удивительном открытии



Белый медведь в Московском зоопарке.

сообщил международный коллектив ученых [7].

Белый медведь (*Ursus maritimus*) обитает в арктической зоне Старого и Нового Света. Несмотря на существенное отличие от других медведей и по морфологии, и по образу жизни, белый медведь в природе иногда скрещивается с гризли (разновидностью бурого медведя) — там, где их ареалы соприкасаются. Палеонтологические находки говорят о существовании белого медведя более чем 110—130 тыс. лет назад.

Авторы недавнего исследования изучили 242 образца (от современных до имеющих возраст 120 тыс. лет) мтДНК белого и бурого (*Ursus arctos L.*) медведей, собранные по всему ареалу того и другого вида [7]. Оказалось, что вся современная популяция белого медведя имеет один и тот же вариант мтДНК, заимствованный от бурого медведя в результате межвидовой гибридизации и последующих возвратных скрещиваний с самцами белого медведя. Удалось установить и ту популяцию,

из которой происходила бурая «прародительница» современных белых медведей. Ею оказалась вымершая около 9 тыс. лет назад популяция *Ursus arctos* Ирландии. Скрещивание имело место примерно 22 тыс. лет назад, т.е. во время последнего ледникового периода. Резкое изменение климата привело, вероятно, к сокращению численности бурых медведей и переселению в более южные широты белых. Одна из самок бурого медведя спарилась с белым (возможно, не нашла себе супруга своего же вида). Гибридные самки то ли оказались очень плодовитыми, то ли очень привлекательными для самцов — во всяком случае они оставили многочисленное потомство, которое постепенно вытеснило «чистокровных» белых медведей.

Человек разумный и человек неандертальский

Неандертальцы исчезли примерно 30 тыс. лет назад. До этого они на протяжении очень



Неандерталец. Скульптурная реконструкция М.М.Герасимова (1948).

долгого времени населяли Европу и некоторые регионы Азии. Как и предки современного человека, предки неандертальцев имеют африканское происхождение. Неандертальцы покинули Африку 400—800 тыс. лет назад, а человек разумный переселился в Евразию 50—80 тыс. лет назад. Различия между мтДНК неандертальцев (она сохранилась в их костях) и современного человека (*Homo sapiens*) столь значительны, что сейчас неандертальцы признаются особым биологическим видом, *Homo neanderthalensis*. Поскольку и в Азии, и в Европе *H.sapiens* и неандертальцы достаточно долго суще-

ствовали одновременно, дискутировался вопрос: скрещивались ли эти два близких вида. Ответить на этот вопрос помогло изучение ДНК, ископаемой и современной.

С.Паабе, крупнейший специалист по анализу ископаемой ДНК, работающий в Германии, с сотрудниками выделили из костей неандертальцев не только митохондриальную, но и ядерную ДНК и в 2010 г. сообщили о прочтении их генома [10]. В качестве материала использовались кости найденных в Хорватии трех особей неандертальцев, возраст которых 38.3—44.4 тыс. лет. Для сравнения выделили ДНК из останков неандертальцев, найденных в других местах, в том числе из наиболее старого образца (60—70 тыс. лет) с Северного Кавказа (Россия). Удалось определить последовательность нуклеотидов в 60% от всей хромосомной ДНК из костных останков. При сопоставлении геномов пяти представителей современного человека (европейца, китайца, папуаса, двух африканцев) и неандертальца выяснилось, что 1—4% генома людей из Евразии имеют неандертальское происхождение. Агентство BBC отреагировало на это открытие сообщением с заголовком «Гены неандертальца выжили в нас».

В геномах африканцев «неандертальской» ДНК нет. Это поз-

волило предположить, что люди современного вида и неандертальцы скрещивались вскоре после выхода первых из Африки, вероятно, на территории Ближнего Востока. Расселение людей по Евразии, их разделение на европейскую, азиатскую и австралийскую расы произошло позднее.

Независимое подтверждение таких результатов получил канадский генетик Д.Лабуда с соавторами [11]. Они воспользовались опубликованными Паабе данными и сравнили их с последовательностями ДНК X-хромосом людей разной национальности. Среди проанализированных (более 6 тыс. образцов) X-хромосом исследователи нашли такие, в которых присутствовал значительный фрагмент «неандертальской» ДНК. Она могла попасть в состав хромосомы только в результате давней межвидовой гибридизации и затем остаться у метисов при кроссинговере (обмене участками хромосом), который имеет место перед образованием половых клеток.

Оказалось, что такие мозаичные хромосомы встречаются не у всех рас. Они найдены у представителей народов Европы и Азии, но не у африканцев, живущих южнее Сахары. Значит, древнее «кровосмешение» произошло, когда предки современного населения Евразии вышли со своей прародины, Африки, и встретились с неандертальцами. Происходило ли смешение в результате актов насилия или «по любви», разумеется, неизвестно. Также пока неизвестно, что приобрели наши предки с фрагментами генома неандертальцев. Может быть, гены, способствующие выживанию в холодном климате (к нему неандертальцы приспособивались несколько сотен тысяч лет), или светлый цвет кожи — анализ генов неандертальцев показал, что они были светлокожими и рыжеволосыми. В порядке фантазии можно думать о приобретении генов некоторых



Современная реконструкция облика неандертальца (слева); справа — рыжеволосый европеец.

творческих способностей или агрессивности. Пролить свет на эти проблемы помогут дальнейшие исследования.

В истории человека разумного смешение с неандертальцами, видимо, было не единственным случаем «мезальянса». Появились сообщения, что в генофонде некоторых азиатских народов присутствует ДНК исчезнувшего алтайского человека, так называемого денисовца (который, как и неандерталец, признается самостоятельным видом).

* * *

Рассмотренные примеры показывают, что целостная мтДНК вымерших организмов может длительное время сохраняться, если включится в геном эволюционно более удачливого таксона. Особенно впечатляет случай с божьей коровкой *Abipunctata*, у которой «ископаемый» митотип Н10 сохраняется, возможно, на протяжении 1–2 млн лет. Этот пример свидетельствует

о роли «сцепленной» с мтДНК бактерии-симбионта, которая тем или иным способом обеспечивает свое собственное присутствие в популяции хозяина и заодно помогает сохраниться чужеродному варианту мтДНК.

До двух третей видов насекомых заражено симбиотически бактериями, которые при межвидовой гибридизации могут обеспечивать сохранность привнесенной в геном чужой мтДНК. Именно среди насекомых следует искать новые случаи длительного сохранения перенесенной при межвидовой гибридизации мтДНК.

У млекопитающих подобные бактериальные симбионты неизвестны. Повсеместное, глобальное распространение «ирландского» варианта мтДНК в популяциях белых медведей требует других объяснений. Здесь можно допустить особое селективное преимущество полученного при межвидовой гибридизации митотипа.

В литературе мало других примеров сохранения «ископаемой» мтДНК, но еще об одном сообщил Д.В.Политов (Институт общей генетики РАН). По его данным, у сигов р.Анадырь *Coregonus anaulorum* и *C.pidschian* имеются митотипы, которые в чистом или преобладающем виде нигде больше не встречаются, но близки к мтДНК байкальских сигов и омуля. Донор этой мтДНК, видимо, вымер, а гибридизация с ним произошла еще в плейстоцене.

Для обнаружения подобных случаев, относящихся не к мтДНК, а к хромосомной ДНК, необходимы специальные исследования. Трудность их состоит в том, что надо сопоставить геномы современного вида и его ископаемых родичей, ДНК которых, как правило, недоступна для изучения. Пока такие поиски увенчались успехом только при анализе генома человека и его исчезнувших предшественников. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 08-04-01511-а.

Литература

1. Rogaev E.I., Moliaka Y.K., Malyarchuk B.A. et al. // PLoS Biol. 2006. V.4. №3. P.e73.
2. Schulenburg J.H., Hurst G.D., Tetzlaff D. et al. // Genetics. 2002. V.160. P.1075.
3. Захаров И.А., Шайкевич Е.В. // Экологическая генетика. 2011. Т.9. №1. С.27.
4. Картавцев Ю.Ф. Молекулярная эволюция и популяционная генетика. Владивосток, 2009.
5. Лусис Я.Я. // Уч. зап. Латв. гос. ун-та. 1973. Т.184. №1. С.5.
6. Werren J.H., Hurst G.D., Zhang W. et al. // J. Bacteriol. 1994. V.176. P.388.
7. Edwards C.J., Suchard M.A., Lemey P. et al. // Curr. Biol. 2011. V.21. P.1251.
8. Krings M., Stone A., Schmitz R.W. et al. // Cell. 1997. V.90. P.19.
9. Ovchinnikov I.V., Gotherstrom A., Romanova G.P. et al. // Nature. 2000. V.404. P.490.
10. Green R.E., Krause J., Briggs A.W. et al. // Science. 2010. V.328. P.710.
11. Yotova V., Lefebvre J.F., Moreau C. et al. // Mol. Biol. Evol. 2011. V.28. P.1957.

Новые формы углерода, открывшие эру нанохимии

В.И.Соколов

Углерод, известный людям с незапамятных времен в виде каменного угля, графита или алмаза, основа всех органических соединений — от метана и спирта до нуклеиновых кислот и белков — вдруг в конце XX в. пережил второе рождение. Обнаружилось, что существуют разные формы углеродных материалов и даже индивидуальные, построенные только из атомов этого элемента, но вполне устойчивые молекулы — фуллерены. Их открытие, как впоследствии оказалось, стало чем-то большим, чем просто новой главой в химии одного лишь углерода. Это был толчок к осознанию важности наночастиц для всего комплекса наук о природе — химии, физики, биологии, науки о материалах в широком смысле слова. Здесь речь пойдет только о химии наноуглерода.

История фуллеренов сложна и «многоэтажна», но их структура проста и легко воспринимается. И.В.Станкевич первым предложил геометрию молекулы в виде замкнутой трехмерной углеродной системы, а Д.А.Бочвар и Е.Г.Гальперн провели квантовохимический расчет [1]. Хотя метод расчета был довольно несовершенен, они с удивительной количественной точностью оценили уровни энергии этой чисто углеродной молекулы и в 1973 г. предсказали ее стабильность. Впоследствии ее подтвердили более точ-



Вячеслав Иванович Соколов, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией Института элементоорганических соединений (ИНЭОС) им.А.Н.Несмеянова РАН. Области научных интересов — хиральная стереохимия (энантио-селективный синтез и теория), металлоорганическая химия переходных металлов, химия наноуглерода (фуллерены, нанотрубки).

ными методами*. Причина такой точности расчета, вероятно, кроется в высочайшей симметрии фигуры. Любой человек, далекий от науки, и даже совсем неграмотный, узнает в этой замечательной шарообразной фигуре, поверхность которой покрыта 12 пятиугольниками и 20 шестиугольниками, футбольный мяч! А не столь обширная аудитория любителей регби знакома со вторым членом фуллеренового семейства — C_{70} (рис.1).

Вклад Бочвара—Гальперн—Станкевича в нашей стране был мало оценен. Наиболее полное признание заслуги этой группы совет-

* В 1970 г. устойчивость C_{60} предсказал японский физико-химик Е.Осава, но без расчетов. Обе эти работы не были замечены научной общественностью и стали известны только после открытия фуллеренов.

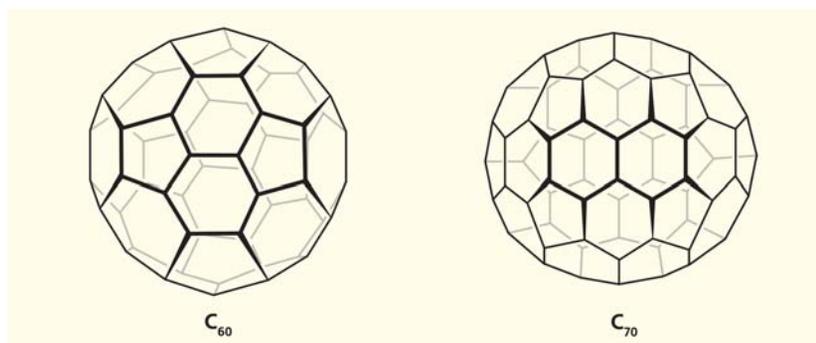


Рис.1. Первые два члена семейства фуллеренов.

ских ученых отражено в книге И.Харгиттаи*, в которой он поместил интервью с ними и на обложке — фотографии [2].

Такова предыстория кластеров углерода — фуллеренов.

Наноглерод: фуллерены, нанотрубки и другие формы

Фуллерены были открыты экспериментально только через 12 лет после описанных событий, в 1985 г. [3]. В 1996 г. Р.Кёрл, Г.Крото и Р.Смолли получили за это открытие Нобелевскую премию по химии. Название «фуллерены» дано в честь знаменитого американского инженера и архитектора Ричарда Бакминстера Фуллера, строителя устойчивых геодезических куполов с триангулированной поверхностью. Некоторое время сам C_{60} называли «бакминстерфуллереном».

Для практических целей, в том числе химического синтеза, решающее значение имел метод образования фуллеренов электродуговым испарением графитовых электродов. Он был разработан В.Кретчмером, Д.Хаффманом и сотрудниками и позволял получать эти соединения в граммовых количествах [4]. Именно с фуллеренов, за которыми последовали углеродные нанотрубки (УНТ) [5], началось развитие химии и физики наноглерода, а затем возникли нанонаука, нанотехнология. Парадоксально, что сами фуллерены, послужившие толчком к формированию «наноконцепции», представляют собой семейство **индивидуальных** молекул наноразмера. Их структура и реакционная способность может быть исследована обычными методами молекулярной химии. В отличие от фуллеренов, все остальные объекты нанонауки — это протяженные полимерные структуры, которые относятся к материалам и изучаются методами физики и химии. В последние годы возник настоящий «нанотехнологический бум»**.

* Иштван Харгиттаи родился в Венгрии, окончил химический факультет МГУ в 1964 г. по специальности «электронография» у профессора Л.В.Вилкова, прекрасно знает русский язык и науку нашей страны; поэтому легко и свободно мог общаться с нашими учеными. В 1990-х годах занимался издательской деятельностью в США, в частности выпускал журнал «The chemical intelligencer» с 1995 по 2000 г.

** Сложилась традиция, особенно в ненаучных кругах, созданная и развиваемая в первую очередь средствами массовой информации, называть все исследования в этой области «нанотехнологией». Между тем любой технологии предшествует наука. Пренебрежение к науке невежд, хотя бы и компетентных в журналистике, заставляет их — умышленно или по недомыслию — писать «нанотехнология» там, где следовало бы «нанонаука». С точки зрения ученого ставить на первое место технологию, не упоминая науку, — все равно что, по меткому народному выражению, «ставить телегу перед лошадей».

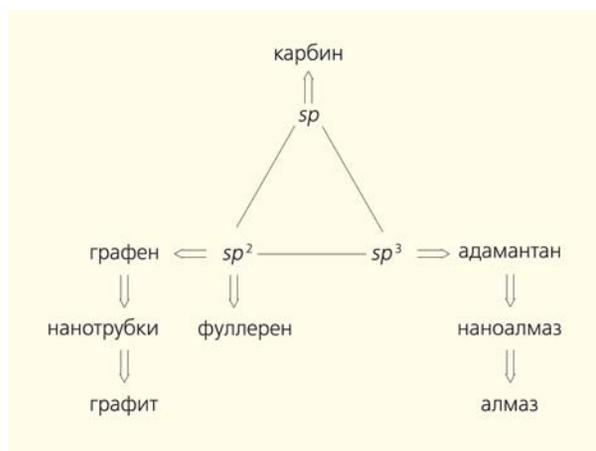


Рис.2. Диаграмма наноглеродных частиц. В схему для наглядности добавлена молекула адамантана как простейшая модель фрагмента алмазной решетки.

Фуллерены можно описать как напряженные электроноакцепторные полиалкены, в которых электроны существенно делокализованы по замкнутой поверхности пустотелого эллипсоида. Химики стали изучать реакционную способность нового класса соединений, не похожего ни на какой другой. В истории химии по большому счету были до этого две сходные ситуации: после открытия в 1830-х годах бензола и в 1953 г. — ферроцена, основателя нового класса — сэндвичевых металлорганических соединений.

Наноглерод отличается от остальных наночастиц примерно так же, как органическая химия от неорганической. В основе отличий лежат способности атомов углерода существовать в разных состояниях гибридизации и образовывать цепи и кластеры из **ковалентно** связанных атомов [6] (рис.2). Классификацию разных форм углерода естественно проводить по гибридизации атома. Типов гибридизации, как известно, три, и каждому соответствует определенная геометрия: sp -гибридизация — линейная, sp^2 — планарная, sp^3 — тетраэдрическая. Необходимо отметить, что во всей нанохимии только углерод способен генерировать единственную простую **молекулярную** форму, т.е. фуллерены, вполне устойчивые без аддендов (например, наиболее изученные C_{60} и C_{70}). Все остальные формы углерода представляют собой межмолекулярные или супрамолекулярные комплексы. Размеры тех и других могут значительно превышать пределы нанообъектов (условно 1–100 нм), особенно если иметь в виду комплексы биомолекул.

Самые известные формы наноглерода — фуллерены, нанотрубки и наноалмазы. Фуллерены — замкнутые индивидуальные молекулы с однослойной поверхностью, не имеющие краевых линий и концевых групп. К поверхности этих молекул можно «привязать» адденды или ввести

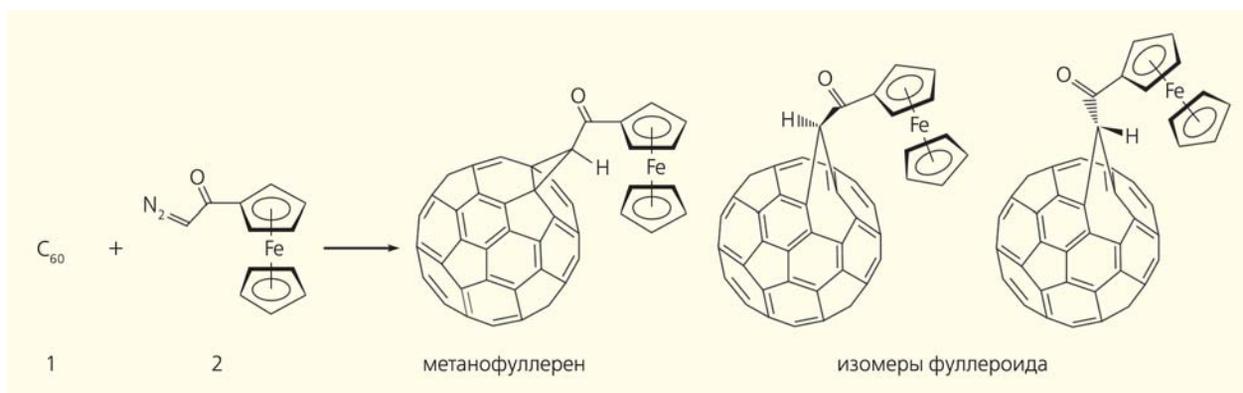


Рис.3. Реакция Вудля. При взаимодействии фуллерена-60 (1) с диазокетоном ряда ферроцена (2) образуется нормальный продукт — метанофуллерен — или два изомера фуллероида [7].

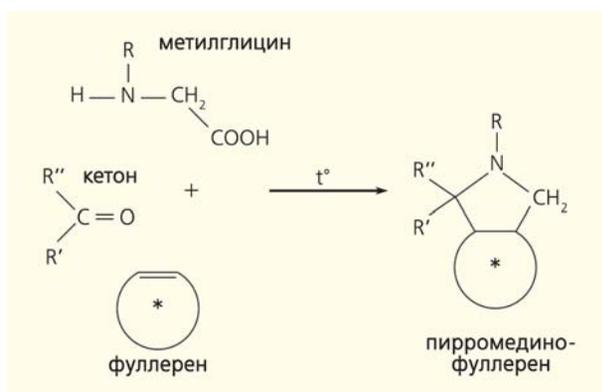


Рис.4. Общая схема реакции Прато.

какие-либо группы в полость эллипсоида. Нанотрубки — протяженные, в идеале одномерные цилиндры малого диаметра, одно- или многослойные (коаксиальные), края которых могут быть окаймлены неуглеродными функциональными группами. Наноалмазы представляют собой образования из углеродного ядра, построенного по принципу алмаза и окруженного неуглеродным слоем в виде оболочки.

Наноуглеродные частицы — это по существу аналоги обычных органических молекул на наноуровне. В них есть двойные связи (характерные для олефинов), повышающее их реакционную способность геометрическое напряжение, молекулам свойственны высокие электроноакцепторность и гидрофобность. Все эти черты присущи как индивидуальным молекулам фуллеренов, так и полимерным углеродным нанотрубкам.

Таким образом, в наноуглеродных частицах содержатся структурные элементы, свойственные более простым органическим молекулам. Именно поэтому в исследовании наноуглеродных структур роль химии выше, чем в изучении других наночастиц, поскольку основные закономерности реакционной способности уже разработаны в классической органической химии. Тем не менее за счет напряженных двойных связей фуллерены и нанотрубки способны вступать в новые, ранее неизвестные реакции. Это, безусловно, обогащает химию как органическую, так и металлорганическую.

Для синтеза наиболее важны реакции присоединения по двойным связям, в особенности циклоприсоединения. К этому типу относятся две именные реакции: Вудля [8] (рис.3) и Прато [9] (рис.4). Первая из них имеет карбеноидный характер и может давать как нормальный продукт [2+1]циклоприсоединения (т.е. с образованием трехчленного кольца) — метанофуллерен, так и аномальный (с разрывом одинарной связи C–C), называемый **фуллероидом**. Мы получали по этой реакции нормальный продукт — ферроценильное производное металлофуллерена — и два изомерных фуллероида, в которых одна связь C–C в фуллереновом ядре разорвана (см. рис.3). Реакция Прато — это [3+2]циклоприсоединение азотистого ильида, которая приводит к конденсации пятичленного гетероцикла с фуллереновым ядром. Обе эти реакции применимы и к углеродным нанотрубкам, хотя их некоторые характеристики отличаются от фуллереновых (таблица).

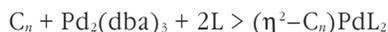
Таблица

Некоторые характеристики фуллеренов и нанотрубок

Фуллерены	Нанотрубки
Индивидуальные молекулы	Полимеры
Растворимы ограниченно	Нерастворимы
Внутренняя полость эллипсоидальная	Внутренняя полость цилиндрическая
Двойные связи напряженные	Двойные связи напряженные
Способны необратимо принимать атомы в полость молекулы	Способны обратимо принимать атомы и молекулы в полость трубки

Нанюглерод: синтез и катализ

С 1992 г. в лаборатории стереохимии металлоорганических соединений в нашем институте начались работы по химии фуллеренов, а впоследствии мы перешли к нанотрубкам. Основной идеей было понять роль **напряженных** двойных связей в определении реакционной способности фуллеренов за счет геометрической деформации — искажения валентных углов. Мы хотели также оценить сходство фуллеренов и нанотрубок в этом аспекте, чтобы использовать в синтезе производных. Сначала предстояло синтезировать новые производные фуллеренов, особенно металлоорганических и оптически активных. Благодаря напряженности двойных связей фуллерены довольно легко присоединяют различные реагенты, в частности переходные металлы, образуя с ними π -комплексы. Например, мы синтезировали комплекс C_{60} с палладием и трифенилфосфином (рис.5) и опубликовали об этом статью (вместе с рентгеновской структурой) еще в начальный период фуллереновых исследований [10]. Кстати, она оказалась одной из самых цитируемых наших работ. Важным вкладом стал прямой синтез комплексов исходя из соединения нульвалентного палладия с дибензилдиэацетоном Pd_2dba_3 , C_{60}/C_{70} и лиганда типа PR_3 [11]:



(η^2 — число атомов в лиганде, связанных с металлом).

Этот метод, в частности, был использован в нашей лаборатории для получения ряда оптически активных металлокомплексов фуллеренов с энантиомерными лигандами.

Производные нанюглерода (фуллеренов и нанотрубок) могут найти применение в разных областях химии, физики, науки о материалах, биологии и медицины. Часть практических приложений находится в разработке, а часть ожидает этого в будущем. Здесь будет рассказано только о катализе металлокомплексами. Его изучают сотрудники нашей лаборатории в содружестве с коллегами из других российских институтов.

Известно, что из числа переходных металлов наибольшую каталитическую активность проявляют палладий и родий — как в виде элементов, так и соединений. Поэтому естественно было испробовать комплексы нанюглерода с палладием в качестве катализатора стандартной тестовой реакции — гидрирования. Впервые каталитическую активность палладиевого комплекса фуллерена (η^2-C_{60}) $Pd(PPh_3)_2$ мы обнаружили в реакции селективного гидрирования тройной связи углерод-углерод до двойной связи *цис*-конфигурации в ацетиленовом спирте [12].

Можно было ожидать, что активность удастся повысить, если удалить фосфиновый лиганд, поскольку фосфины после разрушения комплекса могут ингибировать реакцию. К тому же хотелось получить катализатор без других лигандов, что значительно упростило бы систему и сделало его

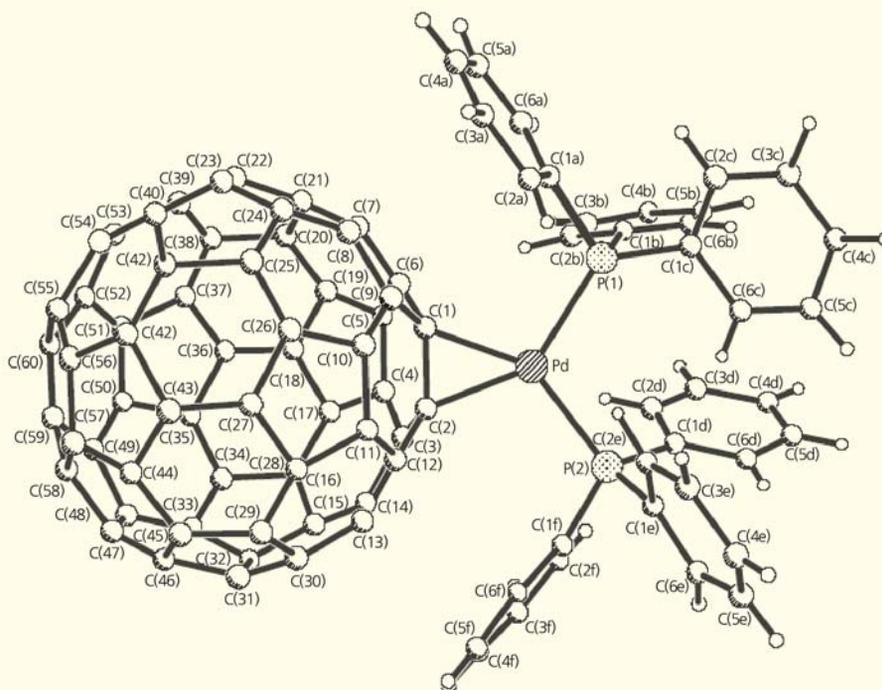


Рис.5. Структура бис(трифенилфосфин)палладийфуллерена (η^2-C_{60}).

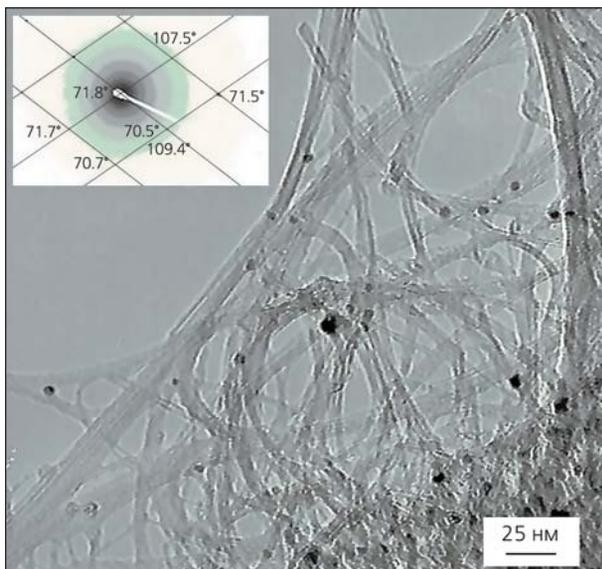


Рис.6. Электронномикроскопическая фотография катализатора Pd/УНТ. Видны черные кубики нанокластеров палладия на углеродных нанотрубках. По числам, приведенным на врезке, рассчитывают размеры частиц.

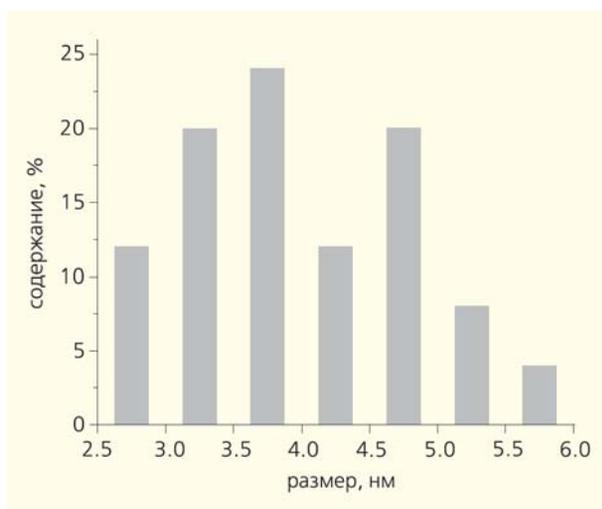


Рис.7. Распределение по размеру нанокластеров палладия на УНТ.

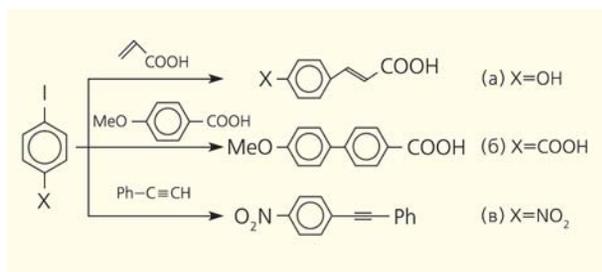


Рис.8. Примеры реакций Хека—Мизороки (а), Сузуки—Мияуры (б) и Соногаширы (в), катализируемые Pd/УНТ (0.1% палладия); выходы близки к 100%.

более универсальным. Основываясь на уже отмеченном сходстве напряженных двойных связей в фуллеренах и углеродных нанотрубках, мы обратились к последним. И действительно, оказалось, что нульвалентное соединение палладия $\text{Pd}_2(\text{dba})_3$ реагирует с УНТ в условиях упомянутого прямого синтеза комплексов фуллеренов, не требуя других лигандов [13]. Нанотрубка играет одновременно роли и лиганда, и носителя. Слабо связанный с металлом органический лиганд дибензилиденацетон (dba) остается в растворителе, цвет которого меняется от винно-красного до светло-желтого; при 40–50°C реакция заканчивается за 10–15 мин. Очевидно, первый атом палладия, присоединившийся по напряженной двойной связи УНТ, имеет свободные координационные возможности, которые заполняются другими атомами Pd(0). В результате образуется нанокластер металла и рост прекращается, когда он становится энергетически невыгодным. В электронном микроскопе прекрасно видны такие кластеры (рис.6), их размеры в среднем составляют около 4.0 ± 1.5 нм (рис.7).

Этот гетерогенный катализатор оказался высокоактивным не только в гидрировании ацетиленов и олефинов, но и в образовании связи углерод-углерод по реакциям Хека—Мизороки, Сузуки—Мияуры и Соногаширы (рис.8) [14]. Катализатор сохраняет активность по меньшей мере на протяжении 5–10 последовательных реакций, он может применяться в водных средах, т.е. соответствует требованиям «зеленой химии». Наконец, он исключительно прост в приготовлении и обращении и не требует дополнительных лигандов.

В более подробном исследовании выяснилось: по активности катализатор Pd/УНТ превосходит другие гетерогенные палладиевые катализаторы в гидрировании ацетиленов — фенилацетилена, толана (дифенилацетилена) и тептина-1 [15, 16].

Наш способ отличается от всех других работ по палладиевому катализу тем, что каталитический центр формируется направленно. Мы исходим из уже имеющихся синтонов Pd(0), т.е. из молекул, представляющих собой синтетический эквивалент атомарного палладия*, а не из палладиевой черни. Она не дает того же эффекта, поскольку беспоря-

* Синтон — реальная или идеализированная структурная единица молекулы, формальная частица (атом, ион, радикал), не существующая как конкретный реагент. Каждому синтону может соответствовать один или несколько реальных реагентов, и, наоборот, один реагент может быть синтетическим эквивалентом для нескольких синтонов. Синтонный подход часто используется при планировании органического синтеза: целевую молекулу мысленно разбивают на синтоны и подбирают соответствующие им реагенты.

Характеристика комплекса $\text{Pd}_2(\text{dba})_3$ как синтона Pd(0) дана еще в нашей давней работе: *Троицкая Л.Л., Грандберг А.И., Соколов В.И., Реутов О.А.* Новые пути к хелатным металлоциклам // Докл. АН СССР. 1976. Т.228. С.367–370.

дочно образуется при восстановлении двухвалентного палладия в растворе и хаотично осаждается на любой поверхности. Разработанный нами подход может быть применен для изготовления более сложных композиций, например биметаллических катализаторов, присоединением Pd(0) к уже осажденному на носителе, скажем, УНТ, другому металлу. Известно, что в ряде случаев за счет сочетания разных металлов повышается каталитическая активность, проявляется синергизм.

* * *

Новые углеродные материалы, появившиеся за последние 20 лет, находят применение в различных областях науки (в химии, физике, науке о материалах, биологии и медицине) и техники. Везде химия вносит свой вклад, потому что ее методы используются для модификации наноуглерода, будь то фуллерены, нанотрубки или только входящий в практику графен.

В этой статье рассмотрен лишь один химический аспект — модификация наноуглерода каталитически активным металлом, палладием. Предложенный нами катализатор Pd/УНТ не имеет никаких лигандов, кроме самой трубки, следовательно, ничего не надо удалять после проведения реакции. Он эффективно катализирует при низком содержании металла несколько реакций образования связей С–С и С–Н (гидрирование), которые весьма востребованы в органическом синтезе как простых, так и сложных молекул. К тому же реакции могут быть проведены в воде, что выгодно экономически и экологически. Дальнейшее продвижение на этом пути возможно, по меньшей мере, в двух направлениях: в получении биметаллических катализаторов с иной специфичностью и в модификации энантиомерными молекулами для синтеза энантиоселективных катализаторов, которые приведут к оптически активным продуктам реакций, что важно для биологии и медицины. ■

Работа выполнена при поддержке Программы ОХ-1 Отделения химии и наук о материалах РАН.

Литература

1. Бочвар Д.А., Гальперн Е.Г. О гипотетических системах: карбододекаэдре, s-икосаэдре и карбо-s-икосаэдре // Докл. АН СССР. 1973. Т.209. С.610–612.
2. Харгиттай И. // Откровенная наука: беседы со знаменитыми химиками. М., 2003. (Пер. с англ.: Hargittai I., Candid Science: Conversations with Famous Chemists. L., 2000.)
3. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E. C₆₀: Buckminsterfullerene // Nature. 1985. V.318. P.162–165.
4. Krätschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C₆₀: a new form of carbon // Nature. 1990. V.347. P.354–356.
5. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. V.354. P.56–58.
6. Соколов В.И. Хиральная стереохимия наночастиц // Коорд. хим. 2009. Т.35. №8. С.1–13.
7. R.Pelliciani, B.Natalini, T.V.Potolokova, et al. Thermal and catalytic reactions of diazoacetylmetallocenes with [60]fullerene // Synth. Commun. 2003. V.33. P.903–914.
8. Suzuki T., Li Q., Khemani K.C. et al. Systematic inflation of buckminsterfullerene C₆₀: synthesis of diphenyl fulleroids C₆₁ to C₆₆ // Science. 1991. V.254. P.1186–1188.
9. Maggini M., Scorrano J., Prato M. Addition of azomethine ylides to C₆₀: synthesis, characterization, and functionalization of fullerene pyrrolidines // J. Am. Chem. Soc. 1993. V.118. P.9758–9762.
10. Bashilov V.V., Petrovskii P.V., Sokolov V.I. et al. Synthesis, crystal and molecular structure of the palladium(0) — fullerene derivative C₆₀Pd(PPh₃)₂ // Organometallics. 1993. V.12. P.991–994.
11. Башилов В.В., Петровский П.В., Соколов В.И. Первое оптически активное металлоорганическое фуллереновое производное // Изв. АН. Сер. хим. 1993. С.428–429.
12. Сульман Э.М., Матвеева В.Г., Башилов В.В., Соколов В.И. Палладий-фуллереновый комплекс в селективном гидрировании дегидролиналоола // Кинетика и катализ. 1996. Т.38. С.274–276.
13. Соколов В.И., Бумагин Н.А., Раков Э.Г. и др. Новый метод получения палладиевого катализатора, нанесенного на углеродные нанотрубки, и его активность в некоторых органических реакциях // Российские нанотехнологии. 2008. Т.3. №9–10. С.58–62.
14. Starodubtseva E.V., Sokolov V.I., Bashilov V.V. et al. Fullerene complexes with palladium and rhodium as catalysts for acetylenic bond hydrogenation // Mendeleev Commun. 2008. V.18. P.209–210.
15. Starodubtseva E.V., Vinogradov M.G., Turova O.V. et al. Palladium(0) supported on carbon nanotubes as an efficient catalyst of the C≡C bond hydrogenation // Catal. Commun. 2009. V.10. P.1441–1442.
16. Sokolov V.I., Rakov E.G., Bumagin N.A., Vinogradov M.G. New method to prepare nanopalladium clusters immobilized on carbon nanotubes: a very efficient catalyst for forming carbon-carbon bonds and hydrogenation // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2010. V.18. P.558–563.

Не холодно ли углозубу на вечной мерзлоте?

Берман Д.И., Алфимов А.В.



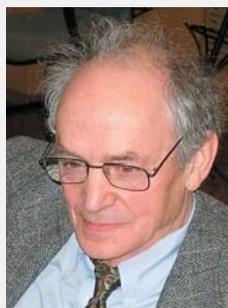
Из всех известных науке амфибий и рептилий (постарому — гадов, гольх и чешуйчатых) лишь три вида — сибирский углозуб (*Salamandrella keyserlingii*), сибирская лягушка (*Rana amurensis*) и живородящая ящерица (*Zootoca vivipara*) — освоили гигантское пространство, занятое сплошной вечной мерзлотой. Из этой тройцы «экстремалов» углозуб — рекордсмен*: только он, игнорируя все мыслимые для «гадов» запреты, выходит в южные тундры, не говоря уж о повсеместном распространении в лесной зоне и даже в Якутии (рис.1–3) [1]. Да что тундры! Сибирский углозуб многочислен в лесной части бассейнов Яны, Индигирки и Колымы, т.е. в самых холодных зимой в Голарктике регионах. Более того, он вполне обычен на полюсе холода Северного полушария. Но даже здесь на большей части территории минимальные температуры в почве под снегом выше (около -20°C), чем порог переносимых углозубом температур (около -35°C). А уж в тундровой зоне зимой много теплее, чем на полюсе холода: и температуры воздуха выше, и снега больше. Таким образом, сибирский углозуб, единственный среди всех амфибий и рептилий, проникающих где-либо на север, не ограничен условиями зимовки. Напротив, он благоденствует. К сожалению, углозуб еще столь мало изучен, что по ошибке угодил в Красную книгу Якутии.

Где размножается

Зимой амфибии и рептилии спят в подходящих местах, весной выползают погреться — на солнце тепло везде, даже в Арктике. Точнее — погреться, что-

* Подробнее см.: Берман Д.И. Идеальный приспособленец, или адаптивная стратегия сибирского углозуба // Природа. 2002. №10. С.59–68.

© Берман Д.И., Алфимов А.В., 2012



Даниил Иосифович Берман, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией биоценологии Института биологических проблем Севера ДВО РАН (Магадан). Область научных интересов — адаптивная стратегия северных животных, принципы организации сообществ наземных организмов, биогеография Берингии.



Аркадий Васильевич Алфимов, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник той же лаборатории. Занимается изучением современного и палеоклимата, а также микроклимата почвенного яруса экосистем северо-востока Азии.

бы обеспечить нужную температуру тела для развития эмбрионов. А вот сибирский углозуб после зимовки в замороженной почве буквально ныряет в ледя-

ную воду любых оттаявших к этому времени водоемов. Эти многочисленные термокарстовые бочажки (рис.4), которые в тундре принято называть лу-

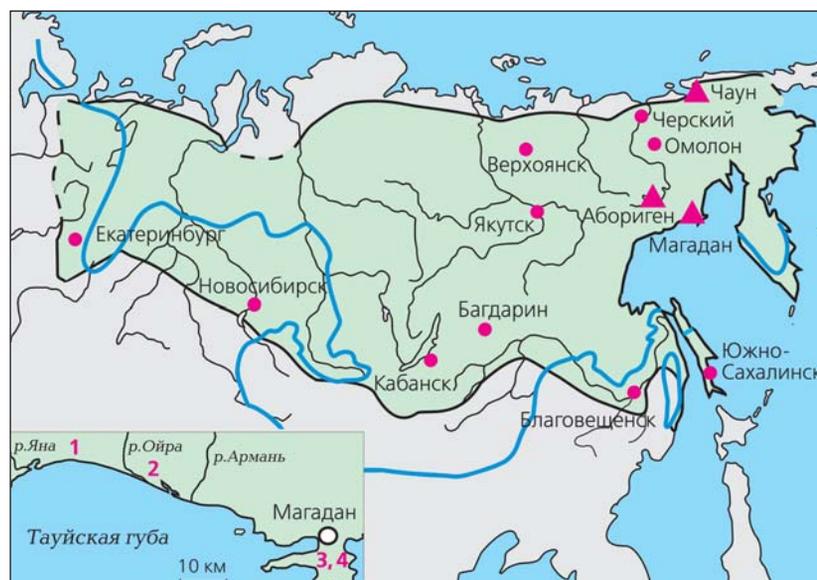


Рис.1. Распространение сибирского углозуба. Большая часть его ареала расположена в зоне вечной мерзлоты. Штриховой линией показаны недостаточно изученные участки границы, кружками — пункты наблюдения фенологии, упоминаемые в статье, треугольниками — места измерения температурного режима водоемов на северо-востоке Азии, синей линией — южная граница распространения многолетней мерзлоты. Внизу на врезке отмечены места изучения температурного режима водоемов (1–4) в окрестностях Магадана.

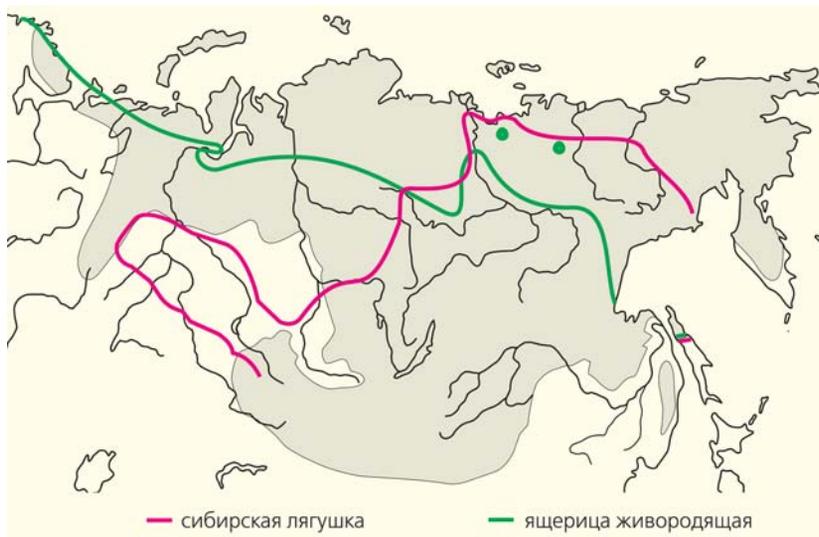


Рис.2. Северные границы ареалов сибирской лягушки и ящерицы живородящей, освоивших область вечной мерзлоты (заливка) в Палеарктике. Непростой абрис ареалов свидетельствует о существовании разного рода ограничений. Для ящерицы они связаны, по-видимому, с температурой зимовки, для лягушки — с наличием непромерзающих и не «заморных» (т.е. с непониженным содержанием кислорода) водоемов.

жами, лежат в ледяных берегах на ледяном же дне. Из огня да в полымя! Нет-нет, в таких озерах углозуб размножается не только на северо-востоке ареала. Нерестится он и в непромерзающих озерах, но в то время, когда часть акватории еще занята тающим льдом.

Как холодна вода, наполняющая поверх льда мелкие промерзшие за зиму тундровые водоемы, на глаз оценить трудно. О реальных же температурах луж в пределах области распространения мерзлоты сведения крайне скудны. Лишь некоторые зоологи, не приводя цифр, от-

мечают, что водоемы с углозубей икрой хорошо прогреваются. Из поля зрения исследователей других специальностей такие водоемы выпали, так как ни рыбы, ни других полезностей здесь нет, а участия в формировании водного баланса и климата территорий они не принимают.

Как же удается углозубу размножаться в столь необычных для амфибий условиях? Чтобы понять это, мы провели наблюдения в небольших водоемах разного типа (промерзающие — непромерзающие, проточные — бессточные и т.д.) и с разными сроками разрушения льда [2, 3]. География работ должна была позволить экстраполировать полученные данные как можно шире. Модельные озера (см. рис.1) выбрали в морском климате на побережье близ Магадана (60° с.ш.), в континентальном субарктическом климате — в верховьях Колымы (62° с.ш.) и в арктическом — на тундровом побережье Чаунской губы (Западная Чукотка, 69° с.ш.). В каждом из этих водоемов ежегодно благополучно завершают метаморфоз мальки из 50—150 кладок.

Пишущие об углозубе авторы зачастую «укрывают» его на зиму древесными остатками, что да-



Рис.3. Рай для углозубов — непромерзающее термокарстовое озеро в окрестностях г.Олекминска, образовавшееся в результате прокладки нефтепровода. Конец июля 2010 г.

Здесь и далее фото Д.И.Бермана



Рис.4. Морская терраса в 63 км западнее Магадана. Белая полоса — лед еще не вскрывшегося непромерзающего термокарстового озера. На среднем плане череда промерзающих термокарстовых бочажков, маркирующих старый след, вероятно, гусеничного вездехода. 12 мая 2007 г.

леко от действительности. Причина проста: под Магаданом, на приморских террасах с тундроподобными болотами (см. рис.4), и на Чукотке, в зональных тундрах, нет леса и даже отдельных деревьев. Обходятся без подобных укрытий взрослые углозубы и в лесной зоне (например, в верховьях Колымы). В подавляющем большинстве (по нашим оценкам, около 97—99%) они укладываются «спать» на глубине всего лишь 5—10 см непосредственно у водосемов во мху, в подстилке, в кочках.

Не сказывается на благополучии зимовки этой крайне холодоустойчивой амфибии и мощность снега, что, правда, влияет на время начала протаивания самих мест зимовки. Но независимо от каких-либо характеристик снежного покрова первыми начинают заполняться водой ложа промерзающих озерков в низинах с тундрово-болотной растительностью. Дело в талых водах, которые не только скапливаются поверх льда, но и нетолстым слоем заливают окрестности, где зимуют углозубы. Подтопление ускоряет протаивание напочвенных покровов, а с ними — и пробуждение амфибий.



Рис.5. Два самца у недавно отложенной кладки. Они не охраняют ее, они токуют, часами терпеливо ждут вероятного появления очередной самки, еще не отложившей икру.

В промерзающих и непромерзающих

В одном из таких озерков («озеро 63 км») в конце первой декады мая, когда среднесуточная температура воздуха уже несколько дней держится чуть выше 0°C, самцы углозубов собираются на «тока». Глубина лужи (т.е. воды, покрывающей тающий лед) в это время не превышает 15—20 см. На простран-

стве в несколько квадратных метров собирается по 15—20 животных, которые цепляются за травинки и веточки, постоянно и неутомимо размахивают, как опахалом, хвостом и время от времени судорожно вздрагивают (рис.5). Отвлечь самцов от этого действия может лишь волна от сапог бредущего по мелководью человека, но стоит ему остановиться, и через несколько минут ток возобновляется

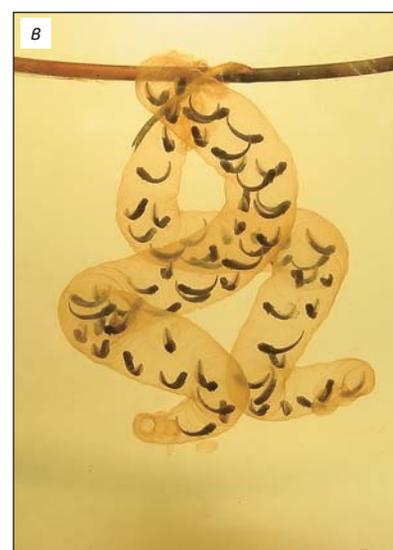


Рис.6. Кладки углозуба: *а* — только-только выметанная икра, она еще не расправилась и не набухла, *б* — уже набухла, но еще ярко опалесцирует (в озерах с очень чистой водой опалесценция может сохраняться несколько дней), *в* — до выклева остались немногие дни.



Рис.7. Один из бочажков, где был ток углозубов. Пенопластовые поплавки поставлены «на якорь» в местах расположения кладок (сколько поплавков — столько кладок). Глубина около 15—20 см. 12 мая 2007 г.

прямо под ногами... Время от времени из «глубины» всплывает самка, тоже цепляется за травинку, на секунды прижимается к ней клоакой, приклеивая основание мешка с икрой (рис.6), а затем выметывает ее при деятельном участии чуть ли не всех самцов тока, перебирающих икру лапами и оплодотворяющих ее. (Некоторые авторы считают, что оплодотворение

у углозуба внутреннее, и происходит оно не в воде, а на суше [4].) Поймать момент всплытия сложно, его ничто не предвещает. Зато само оплодотворение не увидеть нельзя... За несколько дней на каждом току появляются компактные группы кладок, по 30—50 штук в каждой (рис.7). На пространстве в 15 м² насчитывалось порой больше 100 кладок.

Вот такие бурные события, а потеплело всего-то до 0°C в воздухе (в среднем за сутки). Что же делается с температурами в луже не с «кисельными», а с ледяными берегами и таким же дном? Оказывается, среднесуточные температуры воды, наполнившей лужу, много выше (5—7°C), а максимальные достигали аж 17°C.

Высокие температуры были для нас столь неожиданны, что пришлось усомниться в работоспособности электронного термометра, которым измеряли температуру воды. Благо что калибровать подобные инструменты в полевых условиях наших регионов труда не составляет. Есть тающий, уже пористый лед, значит, есть и гарантированный ноль градусов; вскипятить кружку воды тоже несложно; высота над уровнем моря лишь пара метров — не надо беспокоиться о поправках... Термометр оказался в порядке. Так откуда же такие температуры в ледяной луже? Рассмотрим механизм этого несколько позже, а пока обратимся к непромерзающим водоемам, где складывается принципиально иная ситуация (рис.8, 9).

На «Янских озерах» глубиной более 2 м, которые расположе-



Рис.8. И это непромерзающее «озеро» в 100 км западнее Магадана — «Янское большое» — тоже рай для углозуба. Ветер еще гоняет лед по озеру, а вдоль берега на мелководных участках уже висят свежие кладки. Левобережная надпойменная терраса р. Яны близ устья. 25 мая 2006 г.



Рис.9. «Озеро Янское малое». Виден ловчий заборчик из полиэтилена, внутри и снаружи которого врыты пластиковые стаканы. Пойманные снаружи заборчика животные шли к воде на нерест, изнутри — с нереста. В течение двух недель собрано более 550 животных. Конец мая 2011 г.

ны на приподнятом участке той же морской террасы, что и «озеро 63 км», сплошной лед стоит обычно до 20-х чисел мая (заметим, ровный как каток и совершенно «сухой» — воды на льду никогда нет, потому что он плавающий). Начинаются тока и появляются кладки лишь после разрушения значительной части льда в конце мая — начале июня, т.е. на три-четыре недели позже, чем в упомянутых промерзающих озерах (см. рис.8). Но и в это время температура воды все еще ниже, чем в «озере 63 км»: среднесуточные — 2–4°C, максимальные — 4–6°C (таблица). «Янские озера» лежат среди относительно сухих и малоснежных лишайниково-кустарничковых тундр, сильно промерзающих зимой, но не подтапливаемых весной. У берегов к моменту разрушения льда мощность талого мха или оторфованного горизонта почвы, где зимуют углозубы, обычно невелика, 2–6 см, и лишь ранней весной 2005 г. достигла 8–10 см. Возвраты холодов, в особенности в сочетании со снегопадами, замедляют оттаивание напочвенного покрова и верхнего слоя почвы, а его ускорению способствуют дожди.

Сроки разрушения льда и, следовательно, начала нереста в промерзающих, но проточных водоемах («Вечных озерах»), расположенных на высоте 200 м над ур. м., предсказать трудно. Все зависит не столько от более низких температур воздуха, связанных с высотой, сколько от количества выпавшего снега. В сухую весну 2005 г. первые кладки появились в середине мая при температуре воды 7–12°C, в многоснежную весну 2004 г. — на две недели позже, при этом вода нагрелась всего до 4–7°C из-за обильного стока талых вод.

Итак, под Магаданом сроки начала откладки икры в однотипных водоемах могут отличаться на 10–15 дней, в разных — на четыре недели, а с учетом высоты над уровнем

Таблица

Среднесуточные температуры (Т, °С) воздуха и воды в начале размножения сибирского углозуба

Озеро	2004 г.			2005 г.		
	Дата	Т _{воздуха}	Т _{воды}	Дата	Т _{воздуха}	Т _{воды}
«63 км»	6.V	0.5–1.0	7–8	06.V	4.0–6.0	5–7
«Янское»	27.V	0.5–1.0	1.5–2.5	25.V	5.0–6.0	3–4
«Вечное верхнее»	1.VI	4.5–5.0	3–5	15.V	1.5–2.5	7–8
«Вечное нижнее»	1.VI	4.5–5.0	1–2	15.V	1.5–2.5	3–4

моря — почти на полтора месяца. Много ли это по сравнению с другими местностями?

Карта без географии

Почти месячный интервал характерен для немногих исследованных регионов — например, в пределах равнин Свердловской и Новосибирской областей, Хоккайдо и др. И он почти полностью перекрывает вариации сроков размножения углозуба на всем его ареале... Какие причины определяют растянутость начала нереста в названных регионах? Этот феномен в литературе не обсуждается. Авторы единодушны лишь в том, что откладка икры углозубами начинается сразу после схода снега и появления открытой воды, и исключений немного.

Пытаясь выяснить географические закономерности начала нереста сибирского углозуба, мы нанесли на схему его ареала очерпнутые из литературы данные [5]. Их оказалось много, к тому же была охвачена большая территория, что давало надежду получить четкую картину распределения интересующего нас параметра. Увы, «карта» получилась без «географии» — без географических закономерностей (рис.10). В таком случае, что же лежит в основе разделения регионов на две группы?

Ключом к пониманию послужила магаданская популяция. Она попадает в обе группы, что совершенно естественно: напомним, разница между временем начала размножения в промерзающих (и рано заливаемых та-

лыми водами) и непромерзающих водоемах составляет около месяца. Отсюда следует очевидная причина происхождения двух групп пунктов, нанесенных на схему (см. рис.10). Они возникли потому, что для обследования водоемы выбирались без учета их типа в разных точках ареала, а значит, их набор в этом отношении абсолютно случаен. В частности, данные по первой группе, вероятно, отражают ситуацию в промерзающих озерах, находящихся в подтопляемой весной местности. Даты начала размножения в пунктах второй группы, вероятно, получены при наблюдениях в поздно вскрывающихся непромерзающих озерах. Если бы во всех географических пунктах обследовались водоемы обоих типов (непреречно с их окружением!), то с большой долей уверенности мы получили бы фенологическую картину размножения углозубов, аналогичную той, что выявлена в окрестностях Магадана.

Несложные рассуждения приводят к тому, что на схеме (а значит, и в литературе) не отражены сроки размножения углозубов в промерзающих озерах на территориях с высокой континентальностью климата. Вероятно, они не исследовались, так как в подобных условиях заливаемые тальми водами площади малы. Снега немного (например, в Забайкалье его высота не превышает 20 см), и большая его часть испаряется еще до перехода температуры воздуха через 0°C. В малоснежных и быстро освобождающихся от снежного покрова регионах грунты в местах зимовки углозубов глубоко про-

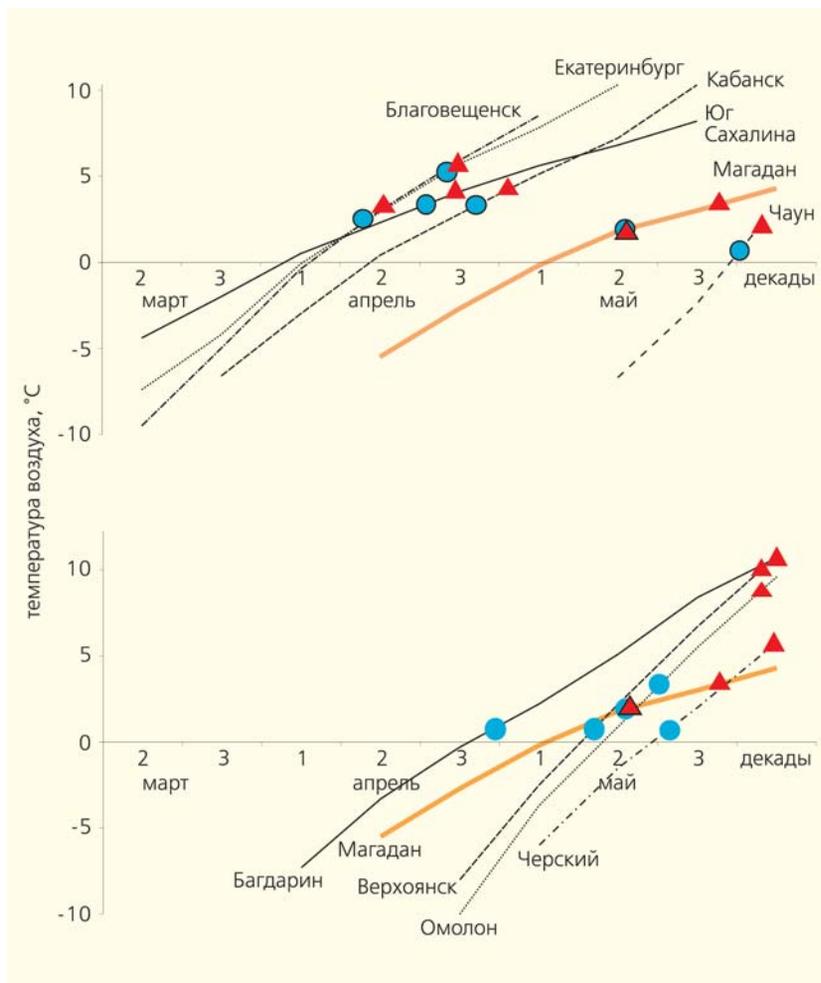


Рис.10. Ход средних декадных температур воздуха (линии), даты схода снега (синие кружки) и начало размножения углозуба (красные треугольники) в разных частях ареала. Для Магадана указаны даты начала размножения углозубов в водоемах 1 и 2 (см. рис.1). Для наглядности здесь использована лишь часть имеющихся данных. Отчетливо видны две группы пунктов, не объединенных географическим положением. В более представительной из них температура воздуха в начале размножения, как правило, ниже 5°C, а интервал между сходом снега и началом размножения — несколько дней (вверху). Во второй, менее многочисленной, группе, температура выше 6–8°C, период много длиннее — до 3–5 недель (внизу).

мораживаются, животные поздно «просыпаются» и приступают к размножению. Этот аспект не изучен совершенно.

В ледяной... теплой купели

В наших экспериментальных озерах глубиной менее 1 м в мае-июле, когда солнце стоит высоко, средняя суточная температура воды может в два-три раза превышать температуру не

только воздуха, но и воды глубоких водоемов, расположенных по соседству. Главная причина феномена в том, что солнце прогревает всю «толщу» воды таких озерков, тогда как в глубоких озерах нагретый солнцем поверхностный слой воды отдает тепло не только в воздух, но и в глубину водоема. Кроме того, практически весь теплый сезон (за исключением нескольких первых дней) вода в таком водоеме не охлаждается мерз-

лыми грунтами дна, так как оттаявший всего на несколько сантиметров ил служит прекрасным теплоизолятором. Различие температур его верхнего сантиметра и придонного слоя воды не превышает 1.0–1.9°C. Весной в 5 см оттаявшего ила градиент среднесуточных температур составляет 1.5°C/см, а во второй половине лета, когда в солнечные дни глубина протаивания уже более 60 см, — в два-три раза меньше. В среднем за теплый сезон благодаря теплоизоляционным свойствам донных отложений мелких водоемов в ложе «уходит» лишь 5–15% поступившей в воду энергии, независимо от того, промерзает дно или нет [6]. Таким образом, давно известные теплофизические явления полностью объясняют, казалось бы, необыкновенно высокий прогрев малых водоемов.

Экскурсия по термокарстовым озерам оставляет незабываемое впечатление (см. рис.4). Дно твердое, местами невообразимо скользкое из-за корява оплывающих верхушек ледяных жил. На суше они скрыты от глаз ковром растительности и торфа, в воде — полуметровым (в конце мая) слоем жидкого ила. Чистой воды над ними набирается лишь 30–40 см. Идти без палки невозможно — ноги то и дело соскальзывают в глубокие невидимые промоины. Сквозь резину болотных сапог, утепленные брюки и суконные портянки пробивает холод ледяной воды. А в 5–15 см от ее поверхности, там, где висят кладки, можно приятно согреть подмерзающие на ветру руки.

Благодаря теплоизолирующему эффекту донного ила средние за сезон температурные характеристики промерзающих озер на вечной мерзлоте и таких же водоемов вне ее зоны — практически неотличимы. Добавим, и весьма благоприятны для развития икры углозуба — что в лесостепной зоне, что в Заполярье.

Однако на температуру воды подобных озер мерзлота все-таки влияет, хотя и косвенно. Она служит водоупором, по которому идет внутрипочвенный сток ледяной воды, охлаждающей озеро тем сильнее, чем больше атмосферных осадков. В небольших озерах со значительным водосбором, таких как «Венечные озера» (см. табл.), после двух дней обильных дождей температура воды понижалась в 3–4 раза (с 9–11°C до 2–3.5°C), но за два солнечных дня она вновь достигала прежнего уровня.

Ни мороз, ни жара...

Небольшая глубина луж, между тем, чревата для кладок углозуба двумя крайними (по температурам) опасностями: перегреться в ясные жаркие дни и замерзнуть при возврате весенних холодов.

Максимальные температуры. Как ни странно это звучит в рассказе о жизни на вечной мерзлоте, но перегрев в мелких водоемах — реальная опасность, которая может угрожать кладкам. Даже на севере ареала углозуба сезонные максимумы температур воздуха достигают обычно 22–25°C. Максимальная же температура воды в мелких озерах в середине лета под Магаданом, в бассейне верхней Колымы и на западной Чукотке может быть на 4–6°C выше (около 30°C), а эти температуры уже летальны для кладок. Близкие к критическим значения температуры воды отмечены лишь в самом мелком и теплом из обследованных водоемов. За четыре года наблюдений формировались они дважды — в июле и августе одного и того же года. А это значительно позже не только периода существования кладок, но и массового выплода личинок. Так как они плавают, то могут, уходя от перегрева, выбирать участки с подходящими температурами.

Сходство сезонных изменений температур воды в мелких

водоемах в разных частях ареала углозуба дает основание полагать, что и в других регионах опасность перегрева кладок невелика.

Минимальные температуры. Весной на северо-востоке Азии вторжения холодных воздушных масс из Арктики — дело обычное. Кладки же углозуба выдерживают охлаждение до нуля, но даже при малых отрицательных значениях медленно промерзают и погибают [7]. В связи с этим корректный вопрос должен быть сформулирован так: могут ли наполненные талой водой мелкие водоемы замерзнуть вновь? Нам удалось наблюдать несколько ситуаций такого рода. Первая сложилась холодной весной 2004 г. под Магаданом, когда в начале мая температура воздуха падала до -6°C. Такая температура соответствует среднему из абсолютных минимумов для этого месяца, т.е. подобные температуры в мае — явление ординарное. В это же время температура воды, наполнившей промерзшее ложе «озера 63 км» около недели назад, не опускалась ниже 0.8–1.0°C. Так что кладки сохранились в неприкосновенности.

Второй случай резкого понижения температур воздуха мы наблюдали 9 мая 2008 г. близ Комсомольска-на-Амуре, когда выпал обильный снег. В небольших, давно оттаявших водоемах с кладками образовалась снежная каша, мощность около 10 см. Однако она не смерзлась в лед, а, следовательно, температура в каше не опускалась ниже 0°C.

На северной границе ареала углозуба, в Чаунской низменности, угроза замерзания кладок еще меньше, так как устойчивый переход температуры воздуха через 0°C и начало откладки икры происходят в условиях полярного дня почти на месяц позже, чем на побережье Охотского моря (рис.11). Средние суточные температуры воздуха в начале сезона размножения здесь обычно не опускаются ниже 0...-0.5°C, а средний из абсолютных минимумов составляет -4...-5°C, т.е. на 1–2°C выше, чем под Магаданом в мае. Иными словами, и на северной границе ареала формирование льда такой толщины, чтобы в него вмерзли кладки, практически невероятно. Образование же льда на поверхности нересто-

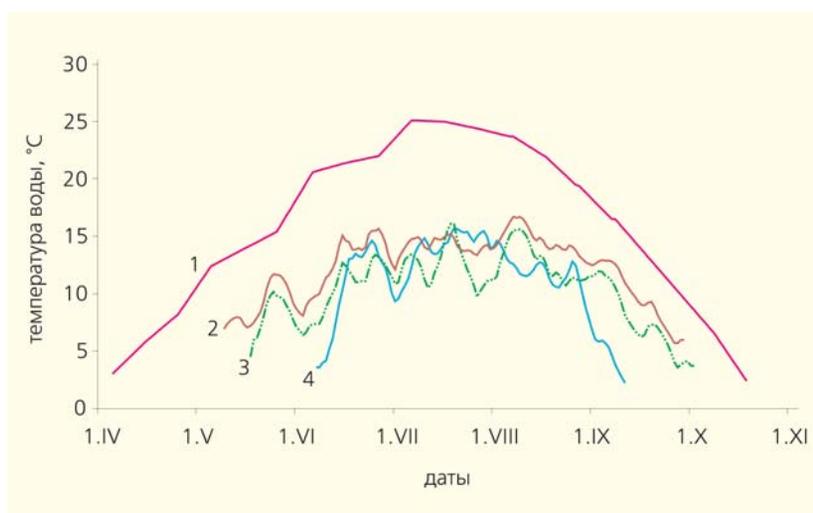


Рис.11. Сезонный ход температуры воды в мелководных водоемах в районах проведения работ: в окрестностях Благовещенска (1) и недалеко от стационара Чаун (4), а также в «озере 63 км» (2) и в «озере Венечное верхнее» (3). В зоне тундры прогревание мелководных водоемов занимает 1–2 недели, т.е. в 7–8 раз меньше времени, чем на юге ареала углозуба.



Рис.12. Вмерзшая икра лягушек в луже после ночного мороза. Икра углозубов уцелела, так как расположена глубоко — ниже льда. Окрестности Хабаровска, 4 мая 2007 г.



Рис.13. Метаморфоз закончен, и сеготеток выполз из воды на сушу. Он невелик и легко умещается в обручальное кольцо.

вых водоемов не представляет опасности для эмбрионов, поскольку кладки располагаются глубже — примерно на глубине 10 см (рис.12).

Таким образом, уже в начале сезона размножения даже в самых мелких водоемах, как на юге, так и на севере ареала углозуба, запаса тепла хватает, чтобы кладки не вмерзли в лед при весеннем возврате холодов, даже если они сопровождаются выпадением снега.

Мы бы не хотели, чтоб у читателя сложилось эдакое благостное впечатление о размножении углозубов на мерзлоте — отнюдь не во всех водоемах икру ждет харру end. Конечно, существует масса вариантов водоемов, в которых икра погибает. Таковы водоемы с подтоком воды со снежников и наледей, без ила, затененные, с меняющимся уровнем, да мало ли еще какие.

Онтогенез на мерзлоте

Ареал углозуба полизонален, простирается с севера на юг в Восточной Сибири более чем на 2500 км, а уж с запада на восток — как будто бы беспредельно. И с севера на юг, и с востока на запад регионы с веч-

ной мерзлотой сменяются регионами с сезонно-мерзлыми грунтами. Сказывается ли она на скорости индивидуального развития (онтогенеза) углозуба, и если да, то как? Поскольку на температурные условия в мелких водоемах мерзлота не влияет, постольку на заданный вопрос ответ в значительной мере уже получен. Однако для контроля задача может быть решена другими, независимыми способами. В частности, можно сравнить суммы температур воды, необходимые для прохождения углозубом водного этапа развития, в регионах с «вечно» мерзлыми и с сезонно-мерзлыми грунтами.

Развитие икры в пределах ареала продолжается от 25 до 35 суток. Начинается оно, хотя и в разное время по календарю, но в почти одинаковых условиях (весна — везде весна). Как уже отмечено, они зависят не от географического положения водоема и присутствия мерзлоты, а от его глубины, величины водосборного бассейна, количества атмосферных осадков и т.д. Перечисленные факторы (и ряд неназванных), по-видимому, компенсируют друг друга, в результате чего суммы средних суточных температур воды

за эмбриональный период варьируют в разных частях ареала в пределах 150°C (от 200 до 350°C). Для всего водного этапа развития углозуба — от откладки икры до выхода сеготеток (рис.13) на сушу — диапазон возрастает до 750°C (от 850 до 1600°C). Из этих чисел следует, что зависимость скорости развития личинок от температурных условий как будто бы невелика (рис.14), чего быть не может в принципе. Рост углозубов, как и всех пойкилотермных существ, жестко контролируется этой зависимостью, которую маскируют несколько факторов.

Один из них — существование даже в самых мелких водоемах хорошо выраженного поля температур. Иными словами, в конкретном водоеме от места к месту условия различаются. Горизонтальные градиенты максимальны в ясную погоду в конце мая или июне, когда солнце уже высоко, лед не до конца растаял, а водная растительность вегетирует. Самые низкие отмечались, разумеется, вблизи кромки льда: в 20—30 см они не поднимались выше 2—3°C. Самые высокие (до 17—18°C) — у берега или в окнах среди растительности. После таяния льда различия дневных температур

в пределах водоема сокращаются в два-три раза, до 5–7.0°C. Подчеркнем, что верхние слои воды у берега или среди водной растительности, лучше прогреваемые в солнечную погоду, сильнее охлаждаются ночью и при похолоданиях. Поэтому температуры в разных частях водоема, измеренные стационарными термометрами, при осреднении даже за несколько суток неразличимы. Личинки же активно перемещаются в водоеме. В солнечную погоду мы регулярно наблюдали их лежащими на песчаном участке дна «озера Вечного нижнего», на глубине 5–10 см; в пасмурные дни они прятались среди водорослей. Личинки днем держатся у берега на мелководье, а в темное время и при похолоданиях уходят к середине «озера», чтобы получить добавку сумм положительных температур в 13–16% (а то и в 40–50%, если вода прогреется выше 15°C). В самых мелких водоемах им надо переместиться всего-то на 1–2 м и не чаще, чем дважды в сутки.

Таким образом, температура водоема, измеренная стационарными термометрами (и затем рассчитанная теплообеспеченность), — это одна величина, а тепло, «собираемое» личинками при перемещении, — другая, много большая.

Еще один маскирующий фактор — длительная инсоляция в «полярный день». Она, в принципе, может непосредственно влиять на развитие личинок при одной и той же температуре воды, определяя период освещенности в водоеме, достаточный для добывания корма.

Оценить длительность светлого времени в водоеме можно по двум характеристикам: по астрономической — периоду, в течение которого солнце находится над горизонтом, и по климатической — продолжительности солнечного сияния. Вторая величина меньше первой, так как исключает сумерки и пасмурную погоду. Если период пребывания солнца над го-

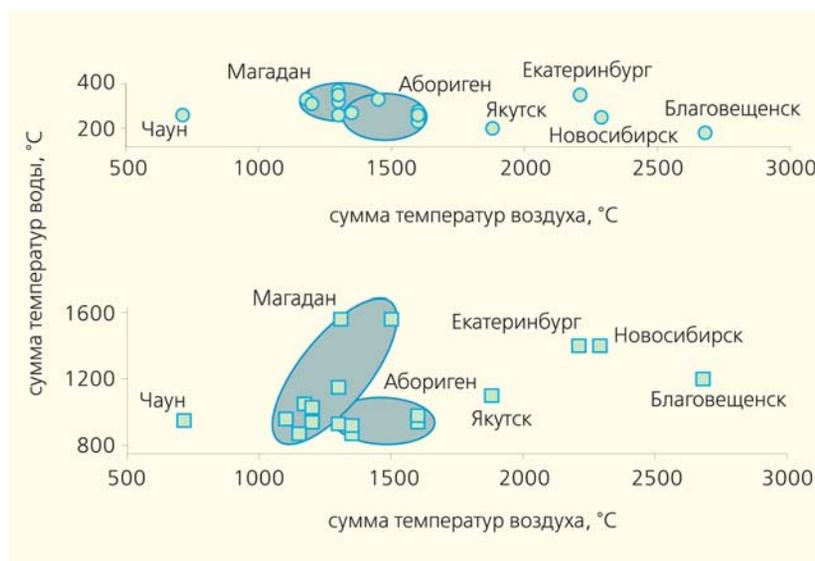


Рис. 14. Варьирование сумм температур воды мелких водоемов в пределах ареала за эмбриональный период (вверху) и за весь цикл развития углозуба (внизу). Показанные на рисунке пункты охватывают весь диапазон теплообеспеченности в ареале — от его южной границы (Благовещенск) до северной (Чаун). Зависимости между суммами температур воды, необходимыми для развития углозуба, и климатическим количеством тепла в том или ином регионе не выявлено. Диапазон колебаний характеристик в многолетнем ряду наблюдений в одном пункте (овалы) сравнимы с их изменениями в пределах всего ареала.

ризонтом за время развития личинок закономерно уменьшается с севера на юг ареала в полтора раза, то продолжительность солнечного сияния не связана с широтой. Ее средние многолетние значения в соответствии с изменениями облачности за период развития личинок варьируют от 320 до 590 ч (по данным метеостанций), уменьшаясь в приморских (в том числе и северных) районах и увеличиваясь в континентальных.

К сожалению, в литературе нет сведений о величине необходимого для личинок уровня освещенности. Если они способны кормиться в сумерках и в пасмурную погоду, то увеличение в полтора раза продолжительности светлого времени суток с юга на север ареала может быть важным условием продления суточной активности личинок, сказывающейся на увеличении скорости их роста.

Таким образом, не только анализ температурного и свето-

вого режимов мелких водоемов, но и сравнение температур, необходимых для развития углозуба в разных частях ареала, не выявили очевидных свидетельств влияния мерзлоты на онтогенез.

Северная граница

Круглосуточная освещенность в Заполярье для кормящихся животных, может быть благом, а может — слабым утешением, так как открытая вода (например, в Чаунской тундре) появляется только в первой декаде июня (см. рис. 11). Для сравнения: в долине Амура, в Еврейской АО, разрушение льда и начало размножения приходится на II декаду апреля, т.е. почти на полтора месяца раньше. Теплый период в тундре сжат до 2,5 месяцев — до конца августа. Правда, вторая декада апреля на Амуре и первая декада июня на Чукотке по температурам воздуха близки (3.0 и 3.3°C), но инсоляция, определяющая

температуры воды, различается на четверть: 17 и 21 МДж/м²·сут соответственно. Отсюда быстрый прогрев водоемов на севере... Умозрительно подвести баланс тепла (с точки зрения... углозуба и его личинок) трудно, надо исследовать природу, и в этом задача на будущее.

Сейчас же естественно предположить, что северную границу ареала определяет, в конце концов, уменьшение климатического зонального тепла ниже какого-то предела. Измерения температур воды на западе Чукотки, под Магаданом и в верховьях Колымы позволили оценить суммы температур, минимально необходимые для прохождения развития углозуба от откладки икры до выхода сеголеток на сушу. В верховьях Колымы, в самом холодном из водоемов, мы наблюдали личинок, не успевших завершить метаморфоз, а значит — покинуть водоем: они оказались подолдом. Суммы температур составили 850—900°C. На юге Ямала [8] и в окрестностях станции Чаун [9] метаморфоз завершается непосредственно перед замерзанием водоема. К ледоставу используется для развития 90—95% его теплового ресурса. Это ли не убедительная иллюстрация крайней ограниченности времени на развитие личинок! Под Магаданом доля «использованной» теплообеспеченности на момент массового выхода сеголеток из обсле-

дованных водоемов не превышает 70%.

Расчеты подтверждают результаты измерений. На востоке Таймыра углозубы доходят до 71—72° с.ш., где по данным метеостанций Хатанга и Волочанка суммы температур воды мелких промерзающих водоемов должны превышать 1000°C [2]. Севернее, в районе метеостанции Усть-Тарей (73.5° с.ш.), при суммах в 800—850°C углозубы уже не встречаются (рис.15). Вероятно, в самой высокоширотной части ареала распространение сибирского углозуба на север лимитируется теплообеспеченностью водоемов.

Очевидно, чем короче теплый сезон, тем раньше углозубы должны начинать размножение. Иначе не успеть пройти метаморфоз, который даже в самых «теплых» водоемах приполярных районов заканчивается, как выяснилось, «впритык» к осеннему похолоданию и наступлению отрицательных температур воздуха. Личинки углозуба не зимуют, поэтому адаптивное значение приуроченности нереста углозубов к ранней весне на севере ареала (и в горах) несомненно. Однако «привычка» размножаться весной у этой амфибии сложилась не на севере, а на юге — возможно, для опережения массового развития хищников (ручейников, хирономид и т.д.). На севере это могло быть подхвачено отбором как простейший путь «вписаться» в узкие

временные (диктуемые температурами) рамки короткого северного вегетационного периода. Возможно, углозуб колонизовал приполярье и южные тундры благодаря «полярному дню», обеспечивающему быстрый прогрев луж и, вероятно, создающий возможность личинкам кормиться чуть ли не круглые сутки.

Все это имеет непосредственное отношение к известному положению об ускорении развития амфибий на Севере [8]. К сожалению, оно до сих пор не подкреплено экспериментальными данными по ускорению онтогенеза углозуба за счет благоприятного теплового режима мелких водоемов и длительной освещенности во время полярного дня. Не показана и генетическая специфичность приполярных популяций. Наши данные также не проливают свет на проблему, однако, как мы надеемся, могут способствовать корректной постановке задачи.

Отметим, что граница ареала в большеземельской тундре, в низовьях Оби и на Чукотке проходит в более низких широтах. Расчеты сумм средних многолетних температур воды мелких водоемов по данным «пограничных» метеостанций дают величины не менее 950—1000°C. Очевидно, либо в названных регионах действуют другие факторы, ограничивающие ареал вида, либо его распространение изучено недостаточно.



Рис.15. Суммы температур воды за теплый сезон в мелких водоемах близ северной границы ареала углозуба. Недостаточная изученность его распространения и редкая сеть метеостанций на севере позволяют лишь предполагать, что граница ареала проходит примерно по изотерме 900°C. Суммы температур выше 900°C обозначены кружками, ниже — треугольниками.

Благо или фальстарт?

Углозуб широко известен своей уникальной способностью зимовать при низких температурах. Мы ожидали, что он обладает специальными адаптациями и к ледяной в воде термокарстовых луж. Однако ответ на вопрос, заданный в начале статьи, оказался до обидного прост: возможность размножения углозуба в мерзлотной зоне Евразии определяется не его адаптивными свойствами, а благоприятным термическим режимом водоемов. Мелкие лужи и в этой зоне на удивление теплые. Но и температура, при которой развитие эмбрионов углозуба в лаборатории идет наиболее быстро, весьма высока, около 24°C; развитие успешно и при более низких температурах, порядка 10—15°C [10], что в целом характеризует сибирского углозуба как теплолюбивое животное. Все сходится!

Между тем, взрослые животные совершают удивительные, но вполне обычные для них «температурные пируэты»: будучи спугнутыми, углозубы ныряют от кладок вниз, в толщу

ила с температурами, близкими к 1°C. Спустя время, порой не малое, как ни в чем не бывало, поднимаются к поверхности. Примерно так же ведут себя углозубы и в аквариуме, на дне которого мы закрепляли пластины льда, создавая искусственно большие градиенты. Этот феномен еще ждет своего исследователя.

Мелкие водоемы в мерзлотной зоне и за ее пределами по температурам весьма комфортны для размножения углозубов, но опасны по другим причинам. Прежде всего, из-за пересыхания (пусть даже частичного) луж летом. Обсыхающие кладки быстро гибнут, и в сухое жаркое лето в мелких водоемах до метаморфоза доживают личинки из единичных кладок (рис.16). Правда, в мерзлотной зоне эта опасность меньше, чем вне ее. В отличие от луж, остающихся после дождей или паводков, термокарстовые лужи, постоянно подпитываемые тающим льдом мерзлоты, пересыхают только в очень уж сухие и жаркие годы. А они в тундровой зоне случаются не часто.



Рис.16. Обсыхающие кладки углозубов. Если жаркая погода простоит еще несколько дней, они погибнут.

Как бы то ни было, углозуб весьма успешно размножается в лужах, и тому есть несомненное свидетельство. Вся азиатская часть южных тундр, не говоря уж о лесной зоне, заселена углозубом. И никаких специальных адаптаций к размножению на вечной мерзлоте у его нет. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 10-04-00425-а.

Литература

1. Боркин Л.Я., Белимов Г.Т., Седалищев В.Т. Экология и фаунистика амфибий и рептилий СССР и сопредельных стран. Л., 1984. С. 89—101.
2. Алфимов А.В., Берман Д.И. Размножение сибирского углозуба (*Salamandrella keyserlingii*, Amphibia, Caudata, Hynobiidae) в водоемах на вечной мерзлоте северо-востока Азии // Зоол. журн. 2010. Т.89. №3. С.302—318.
3. Алфимов А.В., Берман Д.И. Летний термический режим мелких промерзающих водоемов на северо-востоке Азии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2010. №2. С.21—29.
4. Савельев С.В., Куранова В.Н., Бесова Н.В. Размножение сибирского углозуба (*Salamandrella keyserlingii*) // Зоол. журн. 1993. Т.72. №8. С.59—69.
5. Сибирский углозуб: экология, поведение, охрана / Ред. Э.И.Воробьева М., 1995.
6. Павлов А.В., Тишин М.И. Тепловой баланс крупного озера и прилегающей территории в Центральной Якутии // Строение и тепловой режим мерзлых пород. Новосибирск, 1981. С. 53—63.
7. Берман Д.И., Лейрих А.Н., Мецержакова Е.Н. О способности эмбрионов сибирского углозуба (*Salamandrella keyserlingii*, Amphibia, Caudata, Hynobiidae) переносить отрицательные температуры // Зоол. журн. 2006. Т.85. №10. С.1230—1235.
8. Шварц С.С., Иценко В.Г. Пути приспособления наземных позвоночных животных к условиям существования в Субарктике. Т.3: Земноводные. Свердловск, 1971.
9. Докучаев Н.Е., Андреев А.В., Атрашкевич Г.И. Материалы по распространению и биологии сибирского углозуба *Hynobius keyserlingii*, на крайнем северо-востоке Азии // Экология и фаунистика амфибий и рептилий СССР и сопредельных стран. Л., 1984. С.109—114.
10. Сибирский углозуб: Зоогеография, систематика, морфология / Ред. Э.И.Воробьева. М., 1994.

Родезит или гюнтерблассит?

Р.К.Расцветаева

Трудно себе представить, что в центре Европы осталось что-то еще не изученное. Тем не менее и в наше время там происходят открытия новых минералов. И не где-то в труднодоступных местах, как, например, в высокогорном районе Альп, а в окрестностях палеовулкана Эйфель. Этот хорошо обжитой живописный горный массив в западной части Германии с самой высокой вершиной всего в 747 м — рай для туристов и отдыхающих. Щелочной эффузивный комплекс Эйфель хорошо изучен геологами. Он характеризуется специфическими условиями кристаллизации минералов: высокими, но быстро спадающими температурами, низким давлением, градиентами концентраций, высокой активностью кислорода и фтора и низкой — воды. Исследование поздних парагенезисов (пневматолитовых и гидротермальных) в породах демонстрирует огромное минеральное разнообразие. В них уже были открыты новые минералы. Даже в давно изученных породообразующих минералах (амфиболах, пироксенах, слюдах, мелилитах, содалитах), кристаллизовавшихся в этих неравновесных условиях и при низкой активности воды, можно ожидать проявление структурных особенностей, таких как разупорядочение катионов или, наоборот, их упорядочение, необычный изоморфизм, понижение симметрии и др. Но



Рамиза Кераровна Расцветаева, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН. Область научных интересов — структурная минералогия. Наш постоянный автор.

до сих пор еще нет полного и детального исследования данных минералов.

Совсем недавно совместно с немецкими коллегами нами были открыты новые минералы: оксифлогопит [1], шюллерит [2], лилейит [3] и перрьерит-La [4], найденные в вулканических породах разных регионов Эйфеля — на горе Ротенберг, в провинции Лилей и в окрестностях знаменитого Лаахерского озера. Первый минерал принадлежит к семейству слюд, два других — к гетерофиллосиликатам группы лампрофиллита, а последний родом из группы чевкинита. Интересными оказались и высокоупорядоченный триклинный амфибол из Ротенберга [5] и разупорядоченная разновидность нефелина из Грауля [6].

Конечно же, мы не могли отказаться от поступившего заманчивого предложения Н.В.Чуканова принять участие в исследовании еще одного предположительно нового минерала из базальтового карьера горы Ротер Копф (земля Рейнланд-Пфальц). Задача казалась простой: выполнить рентгеноструктурный анализ на монокристалле минерала, который, как ожидалось, родственен калиево-кальциевому силикату родезиту со структурой, известной без малого 20 лет. Химические отличия от родезита сводились главным образом к содержанию существенных количеств железа. Это нехитрое на первый взгляд задание было поручено тогда еще студенту-дипломнику Сереже Аксенову, который под моим руководством проходил практику в Институте кристаллографии РАН.

Но бесцветные уплощенные кристаллы родезитоподобного минерала, мутноватые и трещиноватые, не внушали оптимизма в отношении качества дифракционного эксперимента. Да и плохая разрешенность полос ИК-спектра говорила о сильной разупорядо-

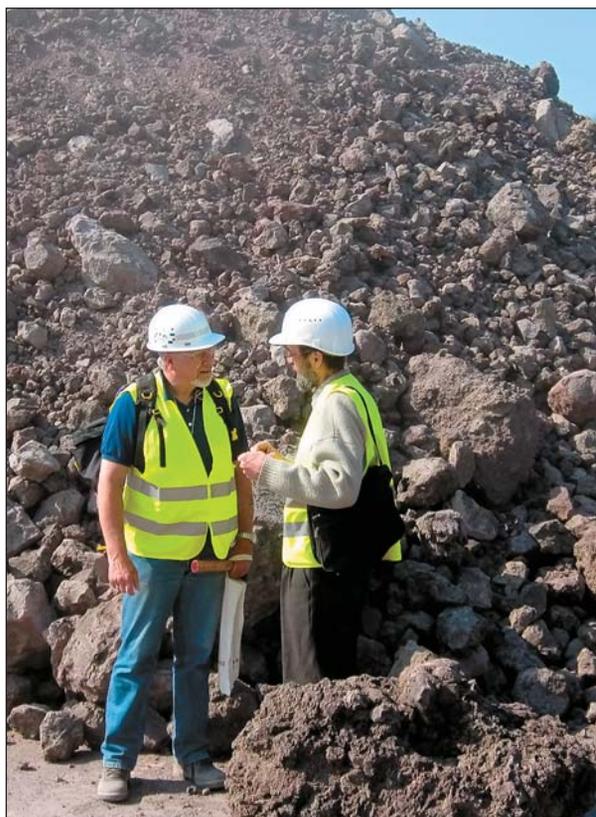


Эффузивные породы в районе палеовулкана Айфель.

Фото В.Шюллера

ченности катионов в его структуре. В довершение всех бед не исключались различные эпитактические или синтактические срастания с нефелином и минералами группы лампрофиллита. Когда мы приступили к расшифровке структуры, оправдались самые худшие опасения. В хаосе пиков электронной плотности разглядеть какой-либо структурный мотив было трудно. Но мы поняли одно — ожидаемого родезитового слоя из тетраэдров кремния в минерале нет. А значит, он имеет другую структуру. Но какую?

Каково же было наше удивление и восхищение, когда в результате упорных трудов взору предстала фантастическая картина толстого пакета кремнекислородных тетраэдров. Пакеты объединялись изолированными семивершинниками железа, между которыми разместились крупные 10-вершинники, заполненные атомами К. Вокруг них в каналах пакета располагались все семь молекул воды. Конечно, в составе минерала были и примеси: к калию добавились Са и Ва, к железу — Са, Mg и Na, а к кремнию — Al. В результате формула минерала выглядела несколько громоздко: $[K_{1.2}Ca_{0.5}Ba_{0.3}][Fe_{0.5}Ca_{0.2}Mg_{0.15}Na_{0.15}][Si_{10.35}Al_{2.65}O_{25}(OH)_4] \cdot 7H_2O$, но в том и заключается одна из задач рентгеноструктурного анализа — каждому элементу найти его собственное место и написать кристаллохимическую формулу [7].



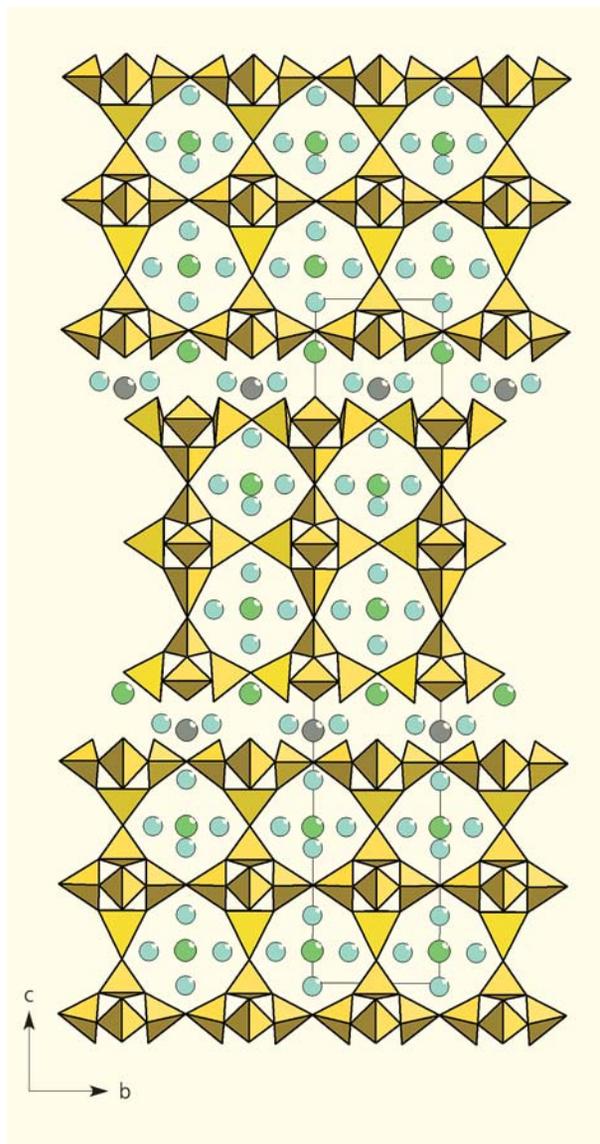
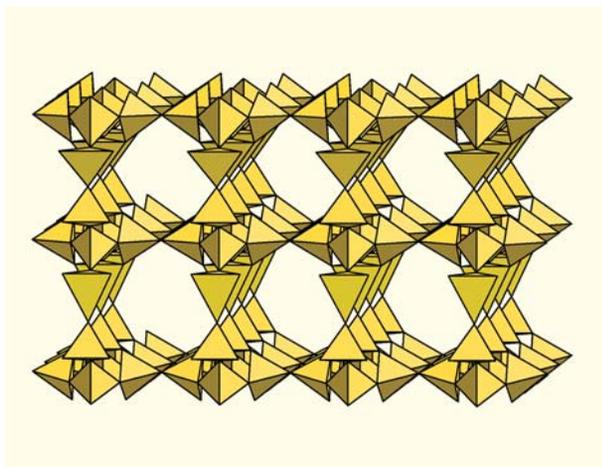
Г.Бласс (слева) и Н.В.Чуканов.

Фото В.Шюллера



Бесцветные кристаллы гюнтерблассита размером до 0.5 мм в ассоциации с коричневыми кристаллами лейейта.

Фото Ф.Бетца



Трехслойный пакет из тетраэдров SiO_4 в структуре гюнтерблассита (слева) и структура гюнтерблассита. Серыми шарами показаны атомы железа, зелеными — атомы калия, голубыми — молекулы воды.

Однако самая интригующая часть структуры — пакет из тетраэдров кремния. При детальном рассмотрении оказалось, что он состоит из трех кремнекислородных слоев, объединенных вершинами Si-тетраэдров. Слои содержат четырех- и восьмичленные кольца кремнекислородных тетраэдров. Крайние слои с формулой $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ отличаются от среднего $[\text{Si}_8\text{O}_{11}]$, в котором присутствует дополнительный тетраэдр $[\text{SiO}_4]$. Слои не плоские, а сильно гофрированные, и потому составленный из них пакет выглядит очень объемно и содержит цеолитные каналы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Крайние слои были известны и ранее. Они встречались либо самостоятельно — в структуре маунтинита [8] и родственных ему минералов

(шлыквита и криптофиллита), либо в спаренном виде с формулой $[\text{Si}_8\text{O}_{19}]$ в структуре родезита [9] и в таких минералах, как макдональдит, дельхайелит, монтереджианит-У, сейдит-Се и фивегит. Таким образом стало понятно, что новый минерал — родственник маунтинита $\text{KNa}_2\text{Ca}_2[\text{Si}_8\text{O}_{19}(\text{OH})] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и родезита $\text{KCa}_2[\text{Si}_8\text{O}_{18}(\text{OH})] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Он — законный член их семейства, а точнее — крайний член «полисоматической серии родезита». Несмотря на различия химического состава и симметрии минералов, образующих серию, параметры a и b их ячеек близки (или кратны), что и понятно: они обусловлены одинаковой топологией слоев. Третий же параметр меняется в зависимости от толщины одинарного, удвоенного или утроенного тетраэдрического слоя, а также состава межпакетного проме-

жутка — от минимального (13.75 Å) в маунтините до максимального (37.26 Å) в новом минерале.

Новый минерал с ромбической симметрией (пространственная группа $Pnm2_1$) продемонстрировал как новый структурный тип, так и впервые встреченный трехслойный тетраэдрический пакет состава $[Si_{13}O_{29}]^{6-}$. Можно прогнозировать, что при дальнейшем наращивании слоев сформируется трехмерный каркас, подобный цеолитному.

Но минералогии отказывались в это верить. Они проверяли и перепроверяли свои данные, что было не просто из-за ограниченности количества вещества. Прошло полгода, пока наконец не созрело решение отправить минерал на рассмотрение Комиссии по новым минералам, номенклатуре и классификации минералов Международной минералогической ассоциации (КНМНКМ ММА). И вот победа! Новый минерал с названием **гюнтерблассит** утвержден Комиссией 2 июня 2011 г. под номером IMA №2011-032.

Вместо заключения

Минерал назван в честь Гюнтера Бласса — известного немецкого минералога-любителя, специалиста в области рентгеноспектрального и рентгенодифракционного методов диагностики, выполнившего большое количество анализов минералов, преимущественно из региона Айфеля. Первоначально предполагалось дать минералу более короткое имя *блассит*, но оно было созвучно названию минерала блоссит, и немецкие коллеги настояли на присоединении имени к фамилии. Получилось длинновато, но немцам не привыкать к длинным словам. К тому же это их выбор — это их вулкан, их минерал и их соотечественник.

Ну а что же Гюнтер Бласс? Наверное, минерал ему понравился, ведь без согласия живущего ученого его имя присвоить минералу невозможно — таковы правила КНМНКМ ММА. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-00092 а) и НШ-3848.2010.5.

Литература

1. Чуканов Н.В., Муханова А.А., Расцветаева Р.К. и др. Оксифлогопит $K(Mg,Ti,Fe)_3[(Si,Al)_4O_{10}](O,F)_2$ — новый минерал группы слюд // ЗРМО. 2010. Ч.139. Вып.3. С.31—40.
2. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М., Чуканов Н.В. Кристаллическая структура шюллерита — нового минерала семейства гетерофиллосиликатов // Докл. АН. 2011. Т.437. №4. С.499—503.
3. Чуканов Н.В., Бласс Г., Пеков И.В. и др. Перрьерит-(La) $(La,Ce,Ca)_4Fe^{2+}(Ti,Fe)_4(Si_2O_7)_2O_8$ — новый минеральный вид из вулканического района Айфель, Германия // ЗРМО. 2011. Т.140. №6. С.34—44.
4. Chukanov N.V., Pekov I.V., Rastsvetaeva R.K. et al. Lileyite, $Ba_2(Na,Fe,Ca)_3MgTi_2(Si_2O_7)_2O_2F_2$, a new lamprophyllite-group mineral from the Eifel volcanic area, Germany // Eur. J. Miner. 2012 (in press).
5. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М., Чуканов Н.В. Разупорядочение Al и Si в нефелине из Грауля (Германия) // Докл. АН. 2010. Т.435. №6. С.760—763.
6. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М. Кристаллическая структура минерала $(Na,Ca,K)_2(Ca,Na)_4(Mg,Fe)_5(Mg,Fe,Ti)_5[Si_{12}Al_4O_{41}](F,O)_4$ — триклинного представителя группы амфиболов // Кристаллография. 2012. Т.57. №2. С.254—259.
7. Чуканов Н.В., Расцветаева Р.К., Аксенов С.М. и др. Гюнтерблассит $(K,Ca)_{3-x}Fe[(Si,Al)_{13}O_{25}(OH,O)_4] \cdot 7H_2O$ — новый минерал, первый филлосиликат с тройным тетраэдрическим слоем // ЗРМО. 2012. Т.141. №1. С.71—72.
8. Zubkova N.V., Pekov I.V., Pushcharovsky D.Yu., Chukanov N.V. The crystal structure and refined formula of mountainite, $KNa_2Ca_2[Si_8O_{19}(OH)] \cdot 6H_2O$ // Zeit. Krist. 2009. V. 224. P.389—396.
9. Hesse K.-F., Liebau F., Merlino S. Crystal structure of rhodesite, $HK_{1-x}Na_{x+2}Ca_{2-y}\{1B,3,2_z\}[Si_8O_{19}] \cdot (6-z)H_2O$, from three localities and its relation to other silicates with dreier double layers // Zeit. Krist. 1992. V.199. P.25—48.

Заметки и наблюдения Наледи поднебесья

А.П.Горбунов,

доктор географических наук

Институт мерзлотоведения имени академика П.И.Мельникова СО РАН

Якутск

И.А.Горбунова,

кандидат географических наук

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Наледь — русское народное название специфичных ледяных покровов, которые образуются зимой и обычно исчезают в теплое время года. Они наиболее характерны для районов с суровыми, малоснежными и продолжительными зимами. Наледи имеют свои названия и в других языках. Так, якуты именуют их *тарын* или *таан*, монголы — *тошин* или *халиа*. В английском языке бытует термин *айсинг* (icing).

Первоначально наледью называлось обширное слоистое ледяное поле на льду реки или на поверхности промерзающей земли. Кроме того, считалось, что наледи образуются только в условиях многолетней мерзлоты. Но по мере накопления фактов представление о них существенно изменилось. По современным представлениям, наледь — это слоистый ледяной массив или корка льда на поверхности земли, льда или инженерных сооружений, образовавшиеся при замерзании периодически изливающихся природных или техногенных вод. Выяснилось, что наледи могут формироваться и за пределами распространения многолетней мерзлоты. Крупные наледи нередко перелетовывают — т.е. в течение лета полностью не разрушаются (рис.1).

Наледеведение как наука зародилось в России примерно 170 лет назад, но успешно стало развиваться в последние 80 лет. Крупнейшим специалистом мирового уровня в этой сфере стал

главный научный сотрудник Института мерзлотоведения Сибирского отделения Российской академии наук В.Р.Алексеев. Подробные сведения о наледях можно найти в его уникальной монографии «Наледеведение: словарь-справочник», которая была издана в 2007 г. в Новосибирске [1].

Издавна считалось, что самые крупные наледи образуются в Восточной Сибири, особенно на севере Якутии, в бассейнах рек Индигирки, Колымы и Яны. Всего в Якутии формируется свыше 3.5 тыс. наледей общей площадью более 5540 км². В долине притока р.Индигирки расположена знаменитая Момская наледь (Улахан-Тарын), которая считается самой большой в мире. Ее длина 40 км, максимальная ширина 3.5 км, а толщина льда — от 3 до 8 м*. Площадь Момской наледи в иные годы превышает 100 км².

По мере развития наледеведения в нашей стране география наледей расширилась. Они были обнаружены на Аляске и Канадском Севере, в Западной Сибири, на Дальнем Востоке, в Казахстане и многих других районах.

В последние годы особое внимание уделяется горным наледям. Космические снимки позволяют констатировать их наличие в Андах, Скалистых горах Северной Америки, в Саянах, на Алтае, Кавказе и в Гинду-

* Максимальная мощность наледи (15 м) зафиксирована за пределами Якутии — на хребте Кодар, в бассейне р.Средний Сакукан (северное Забайкалье).

куше. Появились публикации о наледях Тянь-Шаня и Памира, высокогорий Монголии и Китая. Но особенно впечатляющие по размерам и широте распространения наледи обнаружены в горах Куньлуня и Тибета [2]. О них и пойдет речь.

Рассматриваемый район расположен в границах 28—38°с.ш., 79—100°в.д. Формированию наледей здесь способствуют суровые климатические условия высокогорий — многолетняя мерзлота и долгие холодные зимы. Среднегодовые температуры воздуха на севере региона на высотах 4500 и 5000 м составляют около -6.4 и -9.4°С соответственно. На юге на тех же высотах они выше — около 0 и -2.5°С. Мерзлота распространена на высотах от 3900—4800 м [3]. Местами здесь можно встретить ее следы — многолетние гидролакколиты (пинго) — бугры морозного пучения высотой до 20 м с ледяными ядрами [4], мерзлотные полигоны с поперечниками в 20—30 м, каменные глетчеры, солифлюкционные террасы и другие криогенные формы. Из космоса различимы округлые термокарстовые просядки, появляющиеся в местах частичного протаивания льдистых грунтов.

Так случилось, что из всего многообразия криогенных образований, распространенных в высокогорьях средних и низких широт, наледи оказались наименее изученными. Сведения о них чрезвычайно скудны, а большей частью просто отсутствуют.



Рис.1. Наледь в Восточных Саянах.

Фото А.Рютина

Необходимо отметить, что космические снимки, по которым проводится дешифрирование наледей, обычно датируются летними месяцами — июнем и июлем, а к этому времени наледи сокращаются по размерам либо исчезают совсем. Поэтому об их максимальных размерах (которые они имели к концу весны) позволяют судить так называемые наледные поляны. Это участки, на которых сохранились следы былой наледи. Обычно они примыкают снизу к остаточным наледным массивам, которые перелетовывают и зимой включаются в новую наледь. В высокогорьях условия для сохранения наледей в летнее время намного благоприятнее, чем, например, на севере Якутии. Летом в Тибете и Куньлуне на высотах более 4500—5000 м каждую ночь, как правило, отмечаются заморозки. Поэтому таяние происходит только днем. Перелетовывающие наледи здесь — обычное явление.

Наледи в горах Куньлуня и Тибета формируются за счет талых ледниковых, речных и подземных вод. Первые назовем приледниковыми, вторые — наледями речных долин, последние — родниковыми (или ключевыми). Но чаще всего наледи имеют смешанное питание — водами различного происхождения.

Родниковые наледи. Самые крупные наледи, питаемые подземными и, в меньшей степени, речными водами, расположены в бассейнах озер Аяккумель и Гозха Цо.

Озеро Аяккумель (37°33'с.ш., 89°30'в.д.) находится в Куньлуне на абс. высоте около 2900 м. Обширная наледь здесь приурочена к руслу р.Петедикдарьи. В июне она простиралась в длину на 56 км, а к ее нижнему краю примыкала наледная поляна длиной еще 30 км. Следовательно, ее максимальная длина может достигать 86 км. Вся система расположена в пределах абс. высот 3950—4500 м. Площадь наледи

в июне составляла 35 км² (без учета наледной поляны). Эта огромная наледь, несомненно, перелетовывает.

Озеро Гозха Цо (35°00'с.ш., 81°30'в.д.) расположено в Тибете на абс. высоте 4900 м. Перелетовывающая наледь, питаемая подземными и речными водами, расположена к югу от озера на высотах 5050—5250 м (рис.2). В июне ее длина составляла 42 км, максимальная ширина — 2 км, площадь — около 25 км².

Приледниковые наледи. Крупная приледниковая наледь выделяется в истоках р.Карамуран у подножья горного массива Улугмузтаг (7723 м) — высочайшего в системе хребтов Куньлуня. Координаты ее средней части — 36°33'с.ш., 87°12'в.д. Летом обычно сохраняются восемь разобщенных массивов наледи, расположенные в пределах абс. высот 4800—5200 м. Длина основной части 28 км, средняя ширина 0,5 км, максимальная — 1 км. Наледь имеет два приточных



Рис.2. Наледь смешанного питания в Тибете [2].



Рис.3. Озерная наледь в Тибете [2].

притока длиной 5 и 4,5 км. Судя по наледной поляне, зимой наледь достигает в длину 38 км, а максимальная площадь всей системы составляет около 20 км².

Другая приледниковая наледь (36°27'с.ш., 87°40'в.д.) находится у восточного подножья массива Улугмузтаг на высотах 4875–5250 м и летом распадается на 18 разобщенных массивов. Длина основной части наледи 37 км, максимальная ширина 1 км. К северу от нее на высотах 5150–5300 м расположен еще один — единый — наледный массив длиной 29 км и площадью около 5 км².

По северному подножью Улугмузтага на абс. высотах 5300–5100 м разбросаны относительно небольшие приледниковые наледи (около 15) длиной от 100 м до 5 км.

Наледи речных долин. Особого внимания заслуживают наледи долины р.Чумар — левого притока р.Янцзы (35°20'с.ш., 93°00'в.д.). Здесь на абс. высотах 4600–4370 м протягивается целая цепочка перелетовывающих наледей длиной 150 км. Максимальная ширина одного из наледных звеньев цепочки — 1,2 км.

Литература

1. Алексеев В.Р. Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск, 2007.
2. <http://www.google.com/earth>
3. Горбунов А.Л. Криолитозона Центрально-Азиатского региона. Якутск, 1986.
4. A Guide to the Permafrost and Environment of the Qinghai — Xizang Plateau. Lanzhou, 1993.
5. Пигузова В.М., Шепелев В.В. Методика изучения наледей. Якутск, 1975.

Озерные наледи. Необычную группу в Тибете составляют озерные наледи. Они перекрывают лед на озерах в одних случаях частично, в других — полностью, образуя второй пласт льда. Примером может служить наледь на безымянном озере, расположенном на высоте 4900 м (34°10'с.ш., 82°47'в.д.), которое мы условно назвали Наледным (рис.3). Площадь озера составляет 25 км². В него выпадают четыре русла длиной до 2 км. По ним и поступала вода, сформировавшая наледь. Их питание, скорее всего, происходило за счет подземных вод, которые продолжали изливаться после ледостава на озере.

Наледи смешанного питания. Самая южная система долинных наледей смешанного питания находится в районе оз.Пумаюм Цо (28°30'с.ш., 90°20'в.д.) в интервале высот 5050–5600 м. Озеро расположено на расстоянии 130 км к югу от Лхасы и 135 км к северу от столицы Бутана г.Тхимпху, на абсолютной высоте 5018 м. Длина основного ствола наледи составляет 20 км, ее средняя ширина 20 м, а максимальная достигает 50 м.

Ежегодно в регионе формируются не менее 200 крупных наледей, значительная часть которых может быть отнесена к числу гигантских, так как их площадь превышает 1 км² [5]. Учсть мелкие наледи, длина которых менее 1 км, не представляется возможным, поскольку к лету они исчезают и на космических снимках отсутствуют. Кроме того, остается невыясненной толщина наледных массивов Тибета и Куньлуня. Но по ряду предположений она существенно меньше, чем в Восточной Сибири, и составляет всего около 2–3 м.

Наледи встречаются в Каракоруме, на его границе с Тибетом (в районе с минимальным снежным покровом), иногда они образуются и в Сино-Тибетских горах. А вот для высочайших гор мира — Гималаев — наледи практически не характерны. На южном макросклоне они отсутствуют из-за высокой снежности, а встретить их можно лишь на северном, где снега существенно меньше. Однако наледи Гималаев далеко не такие крупные, как в Тибете и Куньлуне. ■

Кулинда — первое в России местонахождение позднеюрских динозавров

В.Р.Алифанов,
кандидат биологических наук
Палеонтологический институт им.А.А.Борисяка РАН
Москва

Местонахождения динозавров, обитавших 160–150 млн лет назад, т.е. в конце юрского периода, значительно уступают по количеству ранне- и позднемиловым. В Евразии позднеюрские ящеры обнаружены лишь в небольшом числе стран, среди которых Россия до настоящего времени не значилась. Налицо удивительный и несправедливый для такой огромной страны, как наша, пробел. В том, что когда-то он будет заполнен, мало кто из специалистов сомневался. И вот долгожданное палеонтологическое открытие состоялось!

Оно произошло летом 2010 г. на территории Чернышевского р-на Забайкальского края, в живописной пади Кулинда, где выходят на поверхность туфогенно-осадочные отложения укурейской свиты. Обнаруженный в них геологом из Читы С.М.Синицей первый образец — отпечаток кости позвоночного на плитке породы размером с половину почтовой открытки — был оперативно переправлен в Палеонтологический институт РАН. Выяснилось, что находка представляет собой отпечаток плечевой кости динозавра. В сентябре того же года специальный отряд направился в Кулинду для сбора материала. И хотя полноценной работе помешала холодная погода, в руках ученых оказалась уже небольшая палеонтологическая



Местонахождение Кулинда (отмечено звездочкой) на карте Забайкальского края.

коллекция из нового местонахождения.

Остатки динозавров представляют собой изолированные элементы скелета, среди которых преобладают позвонки и кости конечностей. Последние обычно сдавлены или, что реже, объемны, но с большими разрушениями и со следами замещения лимонитом, который придает органическим остаткам цвет ржавчины. В сборах есть образцы, на которых полностью разрушенные кости отпечатаны на поверхности породы. Все материалы из Кулинды относятся к двум или немногим более видам мелких хищных (Theropoda) и растительноядных (Ornithi-

schia) динозавров. Вместе с динозаврами захоранивались растения (свидетельства тому — отпечатки слоевищ печеночных мхов, стеблей хвощей, хвоя и семена голосеменных). Беспозвоночные животные представлены следами жизнедеятельности илоедов, панцирями щитней и домиками ручейников.

Находки 2010 г. настраивали на более обстоятельные полевые работы. В начале лета 2011 г. совместная экспедиция Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН и Палеонтологического института РАН и выехала на местонахождение.

Тщательное исследование костеносного слоя позволило зна-



Северо-восточный склон пади Кулинда. Здесь в разрезах двух канав, проложенных геологами еще в советское время, обнаружены остатки динозавров.

Здесь и далее фото автора



Хвостовой позвонок (экз. ПИН, №5434/65) хищного динозавра из местонахождения Кулинда.

чительно пополнить сборы. Наиболее примечательным стало открытие отпечатков кожного покрова динозавров. Особый интерес вызывают хорошо различимые на плитках породы чешуи и щетинообразные придатки, иногда в сочетании с элементами скелета. Все материалы подобного рода представляют исключительную научную ценность.

Единственная находка позднеюрского динозавра с остатками покровов известна из Германии, из тех же отложений, что и знаменитая первоптица археоптерикс (*Archaeopteryx*). Это скелет небольшого теропода юратора (*Juravenator*). На поверхности породы, в которой заключены костные остатки этого ящера, в области хвоста сохранились отпечатки кожи в виде

мелких бугорков. Интересно, что у более поздних форм теропод, судя по раннемеловым находкам в провинции Ляонин на северо-востоке Китая, кожные структуры имели вид нитевидных придатков или пуховидных, контурных и даже маховых перьев.

Примечательно, что в Ляонине нитевидные кожные придатки теперь известны не только у теропод, но и у птицетазовых динозавров. Это стало неожиданностью, поскольку считается, что у последних поверхность кожи была бугорчатой, как у позднемеловых утконосых ящеров из семейства гадрозавров. Данная особенность достоверно установлена по многочисленным находкам в Северной Америке и Монголии. Последние примеры показывают, что в отношении покровов динозавров остается много неясного. Значит, открытия в Кулинде сулят новые и неожиданные повороты в наших представлениях о мезозойских ящерах.

Во время экспедиции 2011 г. члены полевого отряда занимались не только добычей образцов. Они прочитали публичную лекцию в Чернышевском краеведческом музее, на которой присутствовали его сотрудники, представители городских школ, прессы и местной администрации, провели переговоры об охране местонахождения. Планировалась, но не состоялась по объективным причинам встреча с губернатором Забайкальского края Р.Ф.Гениатулиным. Его интерес к итогам полевого сезона 2011 г. не случаен, поскольку, узнав об открытии уникального местонахождения, губернатор предложил экстренную помощь в организации будущей экспедиции. В ее обеспечении также приняли участие ОАО «Читагеолсъемка» (руководитель С.А.Козлов) и Фонд управления целевым капиталом для поддержки деятельности научно-исследовательских работ в области биологии и медицины «Фундаментальный». ■

РЕДКИЙ ДАР — ВО ВСЕМ ВИДЕТЬ ХОРОШЕЕ

Ю
е
ц
е
н
з
и
ш
и

К 100-летию со дня рождения А.А.Ляпунова

Этому удивительному человеку, энциклопедисту, умевшему держать в поле зрения не только широкий спектр научных проблем, но и огромное количество людей, бесстрашному борцу за научную истину, исключительному педагогу и уникальному организатору, посвящены две книги, вышедшие в прошлом году в двух разных издательствах. Первую подготовила Е.А.Ляпунова — ее отличает обилие фотографий из архивов Ляпуновых и близких семей. Вторую — Н.А.Ляпунова; этот сборник представляет собой словесный портрет юбиляра, составленный по многочисленным воспоминаниям коллег и друзей, а также по высказываниям самого А.А.Ляпунова. Обе книги отдадут дань уважения и памяти большому ученому.

Недосягаемо высок

В.М.Тихомиров,

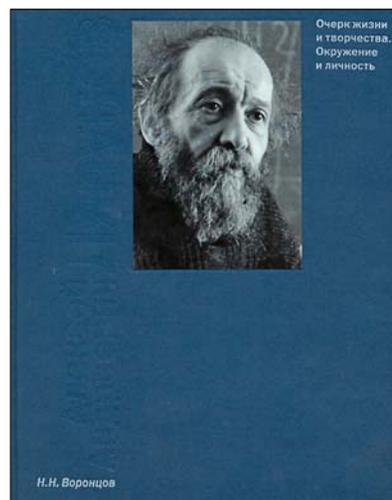
доктор физико-математических наук

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

Автор этой замечательной книги, Николай Николаевич Воронцов (1934—2000), — известный биолог-эволюционист, активный общественный деятель (народный депутат, председатель Госкомитета, министр природопользования и охраны окружающей среды в Правительстве СССР, депутат Государственной Думы РФ). Соавтор (совместно с Н.В.Тимофеевым-Ресовским и А.В.Яблоковым) учебника по теории эволюции.

Воронцов считал своим непрременным долгом написать книгу о выдающемся математике и просветителе А.А.Ляпунове, с судьбой которого столь тесно переплелась его жизнь: дочь Алексея Андреевича Елена была его женой. Полная доступность архива Ляпуновых, семейные предания, доверительные рас-

сказы многочисленных родственников и друзей А.А. (так называет своего тестя автор книги), а также рассказы о нем его коллег и учеников — все это давало Николаю Николаевичу по сравнению с большинством биографов несравненные преимущества. Однако Воронцова смущало одно обстоятельство: от математики, научной профессии Алексея Андреевича, он был далек, и это не позволяло ему в полной мере отразить творчество тестя. Воронцов начал писать свой биографический очерк еще в 70-х годах, часть его опубликовал в журнале*, но так и не решился подготовить рукопись к изданию. Это сделала Елена Алексеевна Ляпунова, поэтому полный текст, написанный Воронцовым, с ее комментариями, появился лишь

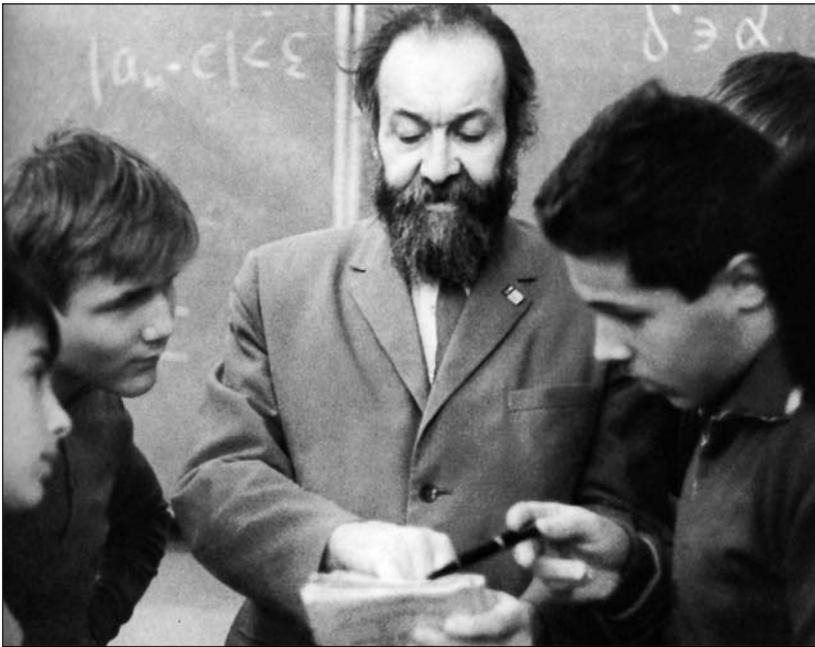


Н.Н.Воронцов. АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ ЛЯПУНОВ. Отв. ред. и сост. Е.А.Ляпунова.

М.: Новый хронограф, 2011. 240 с.

© Тихомиров В.М., 2012

* Воронцов НН. Окружение и личность // Природа. 1987. №5. С.81—98.



После лекции с учениками физматшколы. Новосибирск.

почти четверть века спустя после того, как была начата работа над этим трудом.

Книга эта замечательна со многих точек зрения. Алексей Андреевич принадлежал к тому поколению, к которому с полным основанием можно отнести слова Ф.И.Тютчева: «Блажен, кто посетил сей мир в его минуты роковые: его призвали всеблагие, как собеседника на пир». На представителей этого поколения выпала доля стать свидетелями Первой мировой войны, двух русских революций, Гражданской войны, коллективизации, террора 30-х годов, Великой Отечественной войны, борьбы с космополитизмом, выхода постановления о журналах «Звезда» и «Ленинград», сессии ВАСХНИЛ, запретов на кибернетику и многого чего еще ужасного и трагического. Алексей Андреевич принадлежал к очень немногочисленной когорте людей, сумевших сохранить свое человеческое достоинство при любых обстоятельствах. Он оставался Человеком во все времена, в которые ему довелось жить: он покинул Московский университет, не желая подпи-

сать письмо, в котором одобрялось разрушение церквей, и при этом бесстрашно отстаивал истинную науку перед мракобесием, а в тяжелейшую военную годину встал с оружием в руках на защиту Родины.

Ляпунов начинал свой путь в математику у П.П.Лазарева, был последним из учеников Н.Н.Лузина, который создал выдающуюся математическую школу Московского университета, сравнимую с современными ей геттингенской школой Клейна и Гильберта в Германии и парижской математической школой во Франции. Творчество Ляпунова вдохновляли такие ученые, как А.Н.Колмогоров и Н.Винер, Г.Мендель и А.Вейсман, Дж.фон Нейман и К.Шеннон. Самому Алексею Андреевичу принадлежат важные результаты в области дескриптивной теории функций. Его теорема о векторных мерах имеет многочисленные приложения в статистике и теории управления.

В книге рассказано о творческом и просветительском пути Ляпунова. Для своих дочерей и их сверстников Алексей Андреевич организовал уникальное

Детское научное общество, собиравшееся у него дома. Там делали свои первые научные доклады, к примеру, школьники Дима Арнольд и Сережа Новиков, ставшие впоследствии выдающимися учеными. Оба они сохранили глубокую благодарность своему учителю, в кружке которого получили первые уроки научного общения. В ранние годы студенчества своих дочерей Алексей Андреевич организовал кружок по изучению генетики, среди участников которого был и студент Коля Воронцов. Узнав об этих занятиях, партийное начальство биофака МГУ возбудило «дело сестер Ляпуновых» и поставило вопрос об их исключении из комсомола за домашнее изучение генетики, осужденной партией. Дело рассыпалось благодаря состоявшемуся тогда же XX съезду партии. Алексей Андреевич, как-то придя домой, с удовольствием рассказывал, что его спросили: не имеет ли он отношения к «сестрам Ляпуновым»?

На протяжении всей своей творческой жизни Ляпунов был подвижником математического образования и научного просвещения: преподавал в Московском и Новосибирском университетах, в Педагогическом институте, в Артиллерийской академии, участвовал в создании новосибирского школьного интерната. Всему этому в книге уделено много внимания.

Завершающие главы книги посвящены двум последним десятилетиям жизни Ляпунова, созданию им начал теории программирования, его борьбе за кибернетику и генетику и его работам по математической биологии.

Книга дает очень богатый материал для размышлений всем, кто интересуется формированием отечественной науки и культуры в XX в., в котором огромную роль играла русская дворянская интеллигенция. Сам по себе старинный род Ляпуновых дал множество крупных фигур в науке и искусстве. Скажем, у отца

Алексея Андреевича было три брата: крупнейший математик в истории отечественной науки А.М.Ляпунов, известный композитор С.М.Ляпунов и филолог, академик Б.М.Ляпунов. В родстве с Ляпуновыми были семейства физика П.С.Капицы, математика, механика и кораблестроителя А.Н.Крылова, физиолога И.М.Сеченова; основоположник русской педиатрии Н.Ф.Филатов,

офтальмолог В.П.Филатов и др. Читатель много узнает о деятелях русской культуры, находящихся в родстве с родом Ляпуновых из родословной Ляпуновых (с.22—23).

Приведу заключительные слова этого издания: «Нравственный облик Алексея Андреевича был недостижимо высок. Этот духовный облик сочетался в последние годы с внешностью

Пророка. Все это было живым, активным, деятельным, гражданственным. Хочется надеяться, что ученики и последователи А.А.Ляпунова сохраняют в себе и смогут передать дальше не только научную, но и нравственную преемственность принципов служения науке и обществу, которым следовал вслед за своими учителями и сам Алексей Андреевич».

Учитель в профессии и в жизни

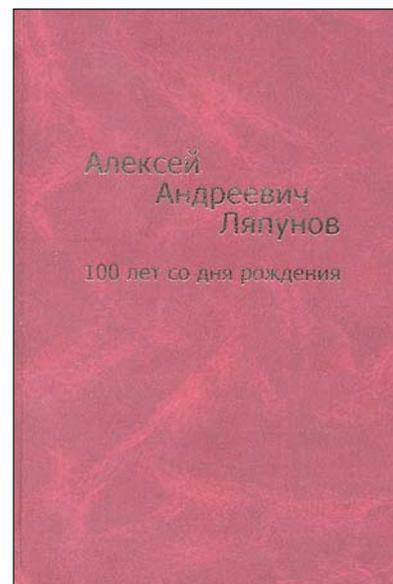
С.С.Демидов,

доктор физико-математических наук

В сентябре 1969 г. знаменитый шахматист М.М.Ботвинник был приглашен А.А.Ляпуновым в новосибирский Академгородок выступить на его семинаре с докладом о моделировании шахматной игры. После доклада в доме радужного хозяина «начались за чашкой чая научные дискуссии» (с.295). Ботвинника поразила удивительная пронзительность («подлинная пронзительность») Ляпунова, который сразу выделил в докладе самое важное — введенное Ботвинником понятие «зона игры». «Алексей Андреевич, — вспоминал впоследствии Ботвинник, — с таким вниманием и деликатностью меня выслушал, что душа его стала мне ясна. Ляпунов — передовой ученый нашего времени — был одновременно и добрым, и милым человеком, типичным русским интеллигентом (и по внешности). <...> Главным его призванием была наука, интересы науки были для него превыше всего; когда Ляпунову казалось, что он находил подходящего коллегу, Алексей

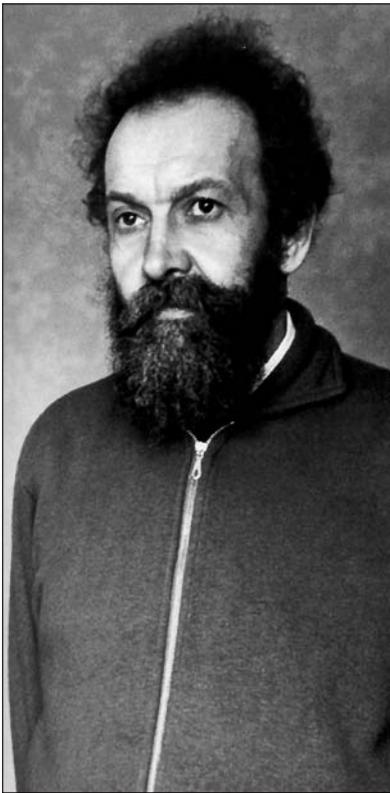
Андреевич сиял и был готов на любое доброе дело» (с.294—296). Хорошо чувствующий партнера («проницательный») Ботвинник очень точно охарактеризовал Ляпунова, отметив его важнейшие черты — преданность науке, врожденную интеллигентность и умение увидеть главное в сложной научной проблеме («проницательность» в существо проблемы!). Таким нам рисуют его и воспоминания других авторов сборника — его учеников, коллег, друзей и родственников.

Первое впечатление от этой превосходно изданной книги — разнообразие ее содержания. Открывает сборник очерк научной, педагогической и общественной деятельности А.А.Ляпунова, написанный его учениками и коллегами Ю.И.Журавлевым, Н.П.Бусленко, Е.В.Гливленко, О.В.Сосюрой, Б.А.Трахтенбромом и дочерью Н.А.Ляпуновой. В следующем разделе читатель погружается в мир творческой деятельности Алексея Андреевича, прежде всего в живое общение с его учителями — Н.Н.Лузиным, П.П.Лазаревым, П.С.Новиковым и Л.В.Келдыш, Г.А.Гамбург



АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ ЛЯПУНОВ. 100 лет со дня рождения. Ред.-сост.: Н.А.Ляпунова, А.М.Федотов, Я.И.Фет. Отв. ред. Ю.И.Шокин.

Новосибирск: ГЕО, 2011. 587 с.



А.А.Ляпунов. 50-е годы Москва.

цевым, коллегами и учениками — И.И.Шмальгаузен, А.П.Ершовым, И.А.Мельчуком, С.В.Яблонским, О.Б.Лупановым, Ю.И.Журавлевым, М.Л.Цетлиным и др. Здесь и тексты, уже опубликованные или извлеченные из архива.

В отдельной главе собраны высказывания самого юбиляра: о науке — его взгляды на математику и ее преподавание (на роль теоретико-множественных концепций в развитии математики), на ее архитектуру у Н.Бурбаки; на связь математики с другими науками и, шире, с культурой, в том числе с искусством; на реформу преподавания математики как в средней, так и в высшей школе. Еще один раздел представляет слово друзьям, коллегам и родственникам. Здесь читатель услышит математиков и кибернетиков (Ю.И.Журавлева, А.М.Федотова, Б.А.Трахтенброта, Я.И.Фета, Р.И.Подловиченко и др.), биологов (Р.Л.Берг, Л.В.Крушинского, Б.В.Локшина

и др.), блестящую пианистку В.А.Лотар-Шевченко, знаменитого шахматиста М.М.Ботвинника, наконец, родственников Алексея Андреевича — также известных ученых (его дочь Н.А.Ляпунову, племянников С.П.Капицу, А.Н.Ляпунова, Е.Г.Козлову, А.Г.Хованского).

В большую математику Ляпунов вошел через дескриптивную теорию множеств — область, отмеченную выдающимися результатами школы Лузина и ставшую в 20-х — начале 30-х годов визитной карточкой в мировом научном сообществе. Ляпунов, как прямой ученик Лузина и Новикова, один из последних представителей знаменитой Лузитании, продолжил и в известном смысле завершил исследования своих предшественников. Из результатов, полученных Ляпуновым в метрической теории множеств, наиболее известна теорема о выпуклости множества значений аддитивной вектор-функции множеств (1940). Она нашла многочисленные практические приложения (в частности, в теории оптимального управления и в математической экономике).

Этой теореме и ее значению в развитии науки посвящен специальный раздел книги (статьи Н.А.Ляпуновой, А.Н.Ляпунова, С.С.Кутателадзе). Надо сказать, что метрическая и дескриптивная теория множеств и функций стала благодатной почвой, на которой выросли многие направления исследований (в теории аналитических функций, в топологии, теории чисел, теории вероятностей и др.), впоследствии составившие славу московской математической школы. Ляпунову они послужили отправной точкой для его изысканий в области кибернетики, программирования и приложенной математики методов к различным вопросам естествознания и техники. Эти сюжеты затрагиваются во многих статьях, включенных в книгу (в работах самого А.А.Ляпунова, составивших отдельный раздел, а так-

же в статьях Б.А.Трахтенброта, М.Г.Гаазе-Рапопорта, Ю.И.Журавлева, С.П.Капицы, Л.В.Крушинского, Р.И.Подловиченко, В.И.Федорова и др.).

В заключительном разделе — «Приложениях» — публикуются документы: автобиографии (1939, 1942, 1949, 1950, 1953, 1960); список докладов, прочитанных на заседаниях Большого семинара Ляпунова на механико-математическом факультете МГУ в 1954—1964 гг., который сыграл выдающуюся роль в развитии идей кибернетики в нашей стране; материалы по делу домашнего кружка, собиравшегося с осени 1954-го по декабрь 1956 г. у Ляпунова по вопросам генетики, находившейся в ту пору в СССР под запретом (включена и объяснительная записка самого хозяина дома) и др. Эти материалы позволяют современному читателю лучше понять реалии мрачной эпохи сталинизма и периода «оттепели» — времени, на которое пришлась большая часть творческой жизни Алексея Андреевича, а также оценить его роль в развитии отечественной науки.

Если с «выбором» времени жизни Ляпунову не повезло (как говорил поэт, «времена не выбирают, в них живут и умирают»), то этого никак нельзя сказать о «выборе» родителей, принадлежавших к одному из славнейших и древнейших родов России, восходящему к князю Константину Галицкому — брату Александра Невского. В XIX—XX вв. этот род в переплетении с родами Сеченовых, Филатовых, Крыловых и Капиц дал нашему отечеству замечательных деятелей науки, искусства и медицины. С детства Алексей был окружен людьми выдающимися: отец — математик, сотрудник и друг академика П.П.Лазарева, под руководством которого Алексей Андреевич начинал занятия наукой, отчим — академик С.С.Наметкин, друг семьи — известный художник и искусствовед И.Э.Грабарь. Всех этих людей кроме преданности науке и широких культур-

ных интересов объединяли свойственные русской интеллигенции моральные принципы, воплощавшиеся в высокой нравственности и демократизме. На этих принципах был воспитан и Алексей Андреевич. Их он пронес через всю жизнь, став для нас одним из проявлений этого удивительного феномена русской общественной жизни XIX—XX вв. Жить таким людям в столь непростые времена было особенно сложно.

Не задалась учеба в Московском университете — поступив в 1928 г. на физико-математический факультет, уже через год он был вынужден его оставить — отказался подписать письмо с требованием сноса церкви. При этом, в отличие от своего будущего учителя Лузина, он не был церковным человеком, просто подпись на таком документе противоречила его убеждениям. Так он поступал всегда, несмотря на то что подобная жизненная позиция вступала в острый конфликт с действительностью и могла иметь для него грустные последствия — за трагическими примерами из советской жизни 30-х годов далеко ходить было не надо. На его глазах разворачивались драматические события травли его учителя Лузина — в 1937 г. в Математическом институте им. В.А.Стеклова лузинский отдел теории функций действительного переменного ликвидировали, а Ляпунова уволили.

Также принципиально и последовательно он вел себя, отстаивая кибернетику, и, несмотря на неблагоприятные обстоятельства, продолжал разработку ее проблем, за что заслужил почетный титул «отца советской кибернетики». Встал на защиту генетики, массивную атаку на которую вела идеологическая машина советского государства. Судьба Ляпунова хранила — он вполне мог стать жертвой сталинских репрессий, мог, как два его брата, погибнуть на фронтах Великой Отечествен-

ной войны, на которую пошел добровольцем и которую прошел от Крыма до Восточной Пруссии.

Его ученик Г.Ш.Фридман пишет: «Алексей Андреевич явил нам тип настоящего русского интеллигента, в самом лучшем смысле этого слова. Это был человек абсолютно независимого духа» (с.452). И далее: «Немного найдется в нашей стране людей, сделавших столь много для славы и процветания Отечества, как Алексей Андреевич Ляпунов» (с.459).

Он жил и действовал в эпоху, когда в обществе жила вера в высокое предназначение науки, на основе которой будет выстроен будущий мир, когда талантливая молодежь со страстью отдавалась занятиям наукой. Для нее Алексей Андреевич был замечательным учителем — как в профессии, так и в жизни. О его уроках говорят многие из включенных в книгу материалов (например, статьи его учеников Т.И.Булгаковой, Ю.И.Журавлева, Р.И.Подловиченко, В.И.Федорова, Г.Ш.Фридмана). Проблемы образования (и школьного, и высшего) всегда живо волновали Ляпунова — об этом говорят его собственные работы о реформе математических программ (с.204—210), об онтодидактике в математике (с.211—218), о пропагандируемом им курсе «Землеведение» (с.219—252) — комплексной науки «о земном шаре как космическом теле и области существования человека». «В землеведение, — как писал он сам (цит. по с.34), — входят основы астрономии, физической географии, исторической и динамической геологии, истории развития жизни на Земле, учение о биосфере и об охране окружающей природы, элементы океанологии и климатологии». В этом курсе должно воспитываться понимание роли математических методов — как определяющих в изучении природы: «Только математики могут разработать ра-

циональные методы обращения с природой» (с.221).

Этот курс он разрабатывал совместно с Т.А.Беляевой для знаменитой физматшколы-интерната при Новосибирском университете, одним из создателей, заместителем ученого совета и преподавателем которой он был. Он не жалел сил и времени на решение проблем школьного математического образования: выступал на страницах журнала «Математика в школе», издавал совместно с Я.С.Дубновым и А.И.Маркушевичем серию сборников «Математическое просвещение», принимал активное участие в организации сибирских математических олимпиад и летних физматшкол в Академгородке. Он всегда отстаивал важность фундаментальной подготовки учащихся, отвечающей требованиям эпохи научно-технического прогресса. Эти его установки особенно актуальны сегодня, когда не прекращается дискуссия о реформе школьного образования.

Алексей Андреевич был (по крайней так нам кажется сегодня) счастливым человеком — ведь, несмотря на свою сравнительно недолгую жизнь, пришедшую на весьма непростые времена, ему удалось реализовать столь многое. Вся его деятельность была нравственно осмыслена и устремлена в будущее. И, как мы полагаем, именно будущее даст адекватную оценку масштабу его творческой личности.

Настоящая книга — верный шаг в этом направлении, и за это мы должны быть благодарны ее создателям — ответственному редактору Ю.И.Шокину и составителям Н.А.Ляпуновой, А.М.Федотову и Я.И.Фету. Особо хочется поблагодарить создателей книги за прекрасное оформление, замечательно подобранные и с высоким качеством воспроизведенные фотографии, а также обширный справочный материал. ■

А.А.Ляпунов и полтора века интеллектуальной династии

Размышление о книге Н.Н.Воронцова

М.Д.Голубовский,
доктор биологических наук
Санкт-Петербург

В намерения очерка Н.Н.Воронцова входил рассказ о становлении таланта Алексея Андреевича Ляпунова (далее А.А.) с самого детства, о его научных учителях и наставниках, интеллектуальных традициях династии и той среде, в которой они жили и творили и в XIX в., и в бурных потрясениях XX в. Но это не просто интересное повествование из первых рук. Необычность книги состоит в богатейшей иконографии — около 350 оригинальных фото из фамильного архива Ляпуновых, музея П.Л.Капицы и других причастных к этому кругу семей. Здесь не только парадная галерея славных предков А.А. и именитых ученых, с которыми он соприкасался в жизни. Иконография охватывает весь его жизненный ландшафт — детские годы и студенческие компании, прогулки и семейные сборы в дворянских усадьбах, интерьеры в квартире Ляпуновых — Наметкиных.

Дед и отец А.А., Николай Викторович и Андрей Николаевич, получили солидную математическую подготовку, стали видными инженерами-строителями железных дорог, когда эта отрасль бурно развивалась под патронажем С.Ю.Витте. В серии групповых снимков мы видим деда Ляпунова среди его коллег. Их физиогномия, как выражались в старину, и весь облик поражают — высоколобые, полные

спокойствия и умного достоинства лица. Они могли бы составить честь ученому совету любого нынешнего университета и любой академии. Отец Ляпунова окончил гимназию (с серебряной медалью), затем — физмат Московского университета, а после три года пополнял образование в Гейдельберге. Человек широкой культуры, он собрал коллекцию живописи (одну из пяти лучших в Москве), попавшей затем в Третьяковку. Он же был первым учителем первенца Алеши по астрономии, матема-

тике, физике, минералогии. В их доме регулярно гостили искусствоведы, художники.

П.П.Лазарев, основатель новых научных направлений в России — биофизики и геофизики, пригласил А.А. посещать свой институт сразу после окончания школы, а затем принял его на работу, когда Ляпунова на 2-м курсе исключили из Московского университета. В книге приведены воспоминания А.А. о своеобразном стиле работы Лазарева с молодыми сотрудниками: он подбирал людей с четко выражен-



Интерьер гостиной в просторной московской квартире Ляпуновых с картинами уникальной коллекции. При взгляде на эту фотографию вспоминается, что и «стены воспитывают».



Молодой А.А. (верхний ряд, шестой слева) среди участников семинара П.П.Лазарева (нижний ряд, пятый слева). Визит в институт Лазарева известного французского физика Жана Батиста Перрена, лауреата Нобелевской премии (1926), почетного иностранного члена РАН (1929), приехавшего в советскую Россию со своим сыном Фрэнсисом, тоже ставшим видным физиком, главой агентства по атомной энергии Франции.

ным интересом к науке и «старался побудить человека к научному творчеству». Обращаться к литературе Лазарев рекомендовал не в начале работы, а лишь тогда, когда исследователь знает, что ему нужно. Во время регулярных бесед с сотрудниками Лазарев отвлекался и начинал развивать свои идеи или рассказывал эпизоды из истории науки, которых знал бесчисленное множество. Раз в неделю в 7 вечера проходили институтские коллоквиумы (там бывали и математики, и физики, и биологи), после которых устраивались чаепития. Это были «восхитительные вечера», с рассказами об интересных экспедициях, поездках за границу, о занятных эпизодах или просто с обменом шутками и остроумиями. «Это сближало людей и способствовало установлению дружной и радостной атмосферы

в Институте». Последние слова очень важны и для стиля самого А.А. Вокруг него всегда была «дружная и радостная атмосфера». Однако с наступлением в 1929 г. «великого перелома» в стране развернулась идеологическая травля интеллигенции, начались обвинения во вредительстве, репрессии.

П.П.Лазарев вплоть до 1931 г. руководил созданным им в 1919 г. Институтом физики и биофизики. В 1929 г. протестовал против навязанного избрания в Академию наук коммунистов-философов. В марте 1931 г. после серии доносов его арестовали, последовали унижительные допросы, в особенности по поводу его обширной переписки с иностранными коллегами. Жена Лазарева трижды ездила к Н.А.Семашко, наркому здравоохранения РСФСР, который по-

кровительствовал ее мужу. Но и нарком был бессилён. В отчаянии жена покончила с собой 13 июня 1931 г. Ляпунов организует обращения ведущих ученых к партвласти (с.97), в результате тюрьму и лагерь заменили ссылкой. Через два года Лазарев вернулся в Москву и смог продолжить научную работу, но в очень скромном объеме. От первоначального размаха и радостной свободной атмосферы поиска остались лишь слабые следы.

А.А. переходит в область чистой математики. В 1932 г. становится учеником Н.Н.Лузина, математика мирового уровня и попадает в окружение его знаменитой школы (портреты ее представителей даны в книге).

По инициативе Лузина А.А. начинает исследования по дескриптивной теории множеств и сближается со старшими уче-



На фронте 1943 г.

никами Лузина, известными математиками (Н.К.Бари, М.А.Лаврентьевым, А.Н.Колмогоровым, Д.Е.Меньшовым, Л.В.Келдыш, П.С.Новиковым). Непосредственным учителем и наставником А.А. в предвоенные и послевоенные годы стал П.С.Новиков. С ним и его женой-математиком Л.В.Келдыш «у А.А. на долгие годы установилась семейная дружба». В 1936 г. после абсурдной статьи в «Правде» с обвинениями во вредительстве возникло «дело Лузина». Заступничество ряда известных ученых, а самое главное — письмо П.Л.Капицы В.М.Молотову спасло жизнь Лузину, однако отдел его ликвидировали.

Впечатляют военные фото А.А. Он пошел на фронт уже будучи кандидатом физматнаук, читавшим лекции в вузе. А.А. вполне мог бы преподавать математику на офицерских курсах артиллеристов в тылу, но сознательно выбрал действующую армию и прошел годы войны командиром огневого взвода. В 1944 г. он пишет домой: «Сейчас положение таково, что пребывание на фронте и участие в военных действиях является священной и наиболее важной

обязанностью. Даже если я имею какие-либо юридические права на то, чтобы уехать в тыл, я не хочу ими воспользоваться. Я не имею на это морального права... Никакая сила меня не вернет домой до тех пор, пока не разобьем немцев». Охваченный естественным патриотическим порывом, А.А. вступил на войну в партию. Я думаю, в мирное время он, столь ценивший интеллектуальную свободу, никогда бы этого не сделал.

После войны А.А. преподает математику и теорию стрельбы в Артиллерийской академии. Затем переходит на кафедру вычислительной математики Московского университета и 1 декабря 1949 г. защищает докторскую диссертацию по теории множеств. Оппонентами выступала математическая элита: Л.В.Канторович, Л.В.Келдыш и А.Н.Колмогоров. В начале 50-х годов определяются ведущие оригинальные направления в творческой активности А.А. — математическая теория управления, развитие теории информации и приложение кибернетических подходов к разным ветвям знаний: здесь генетика и физиология, эндокринная регуляция и структура биогеоценозов, лингвистика и проблемы машинного перевода и, наконец, процессы управления в обществе. А.П.Ершов, ученик Алексея Андреевича, впоследствии академик в области информатики, живо воссоздал впечатление от первого в стране курса по теории программирования, который А.А. читал в 1952—1953 гг.: «Он был идеальным проводником новых идей. Магнетическое влияние яркой внешности и редкий дар красноречия, бескорыстный энтузиазм, веселый азарт, полная доступность для студентов без грана фамильярности — все это сразу сделало А.А. популярнейшим преподавателем». Его крупные знания, умноженные на блестящий интеллект и огромную общую и математическую культуру, творческий подъем захватывали слушателей.

В те годы кибернетика третиновалась (наряду с генетикой) как «буржуазная реакционная лженаука». Страстно отстаивая автономию в науке, А.А. организует в МГУ первый кибернетический семинар, на котором в 1956 г. выступали И.А.Полетаев, Н.П.Бусленко, Ю.А.Шрейдер, О.Б.Лупанов, Н.В.Тимофеев-Ресовский, Н.Е.Кобринский, С.В.Яблонский. Вместе с коллегами и учениками А.А. выпускает регулярные сборники «Проблемы кибернетики» (их редактором он был до конца жизни). Как замечает Воронцов, в 1960—1963 гг. эти сборники были чуть ли не единственным органом, где регулярно печатались теоретические статьи по генетике и эволюции.

В 1959 г. по инициативе Ляпунова при Президиуме АН был создан Совет по комплексной проблеме «Кибернетика», который возглавил А.И.Берг, адмирал и академик, специалист в области военной радиоэлектроники. Его военная решительность и твердость, солидный государственный вес давали надежную защиту от наскоков идеологических обскурантов. Подобную же поддержку в те годы физики оказали опальной генетике, создав в Институте атомной энергии в конце 1950-х годов биологический (а по существу генетический) отдел.

По приглашению академика М.А.Лаврентьева Алексей Андреевич в 1962 г. переехал в Новосибирский Академгородок, где в полной мере проявился его творческий потенциал. В Институте математики СОАН он создает отдел кибернетики, возглавляет кафедру математического анализа и теории вероятности в Новосибирском университете, организует серию междисциплинарных семинаров по теории управления и математическим аспектам биологии. Наконец, он активно участвует в создании физико-математической школы, будучи убежден, что ранний отбор и поддержка талантов, их благоприятное ок-



Группа первокурсников биофака МГУ 1954 года, многие из которых были участниками домашнего ляпуновского кружка: первый ряд слева направо — Ляля и Наташа Ляпуновы.

ружение — основа для развития науки и процветания общества в целом.

Наука как социальный институт включает три элемента — собственно научные исследования, получение новых знаний о мире; внесение этих знаний «в мир» в виде публикаций и приложений в понятной для других форме; организация науки как социального института. Мало кто склонен и способен в равной степени проявлять себя в этих трех ипостасях. А.А. счастливым образом удавалось. Его роль в развитии новых научных направлений и в поддержании научного тонуса с трудом поддается столь модным ныне формальным оценкам (таким как индекс ци-

тирования, число публикаций в престижных журналах и т.д.). Воронцов находит точные слова: «Главным в А.А. было то, что он, обладая блестящим ассоциативным мышлением в сочетании с логикой математика, даром педагога и широчайшей культурой, умел наводить мосты между науками, умел зажигать людей, умел инициировать целые направления».

«Вокруг А.А. как-то не было плохих людей», — заключает Воронцов. Об этом же пишет старожил Академгородка математик А.И.Фет: «Он был человек особенный, и среди известных мне в Академгородке ученых — единственный в своем роде. Прежде всего потому, что он был интеллигент. Среди моих

коллег-математиков — более или менее способных людей — это качество здесь было необычно. Для Алексея Андреевича наука никогда не была средством, а всегда была целью, подчиненной, может быть, общечеловеческим целям, но никогда не личному успеху и благополучию» [2]. Наверное, для таких личностей более подходит термин из области агиографии (жития святых) — праведник или небожитель.

Выдающиеся таланты

Воронцов много раз слышал, как А.А. многократно с восхищением говорил о В.И.Вернадском. Среди ученых старшего поколе-

ния Ляпунов был ближе всего к Вернадскому не только по энциклопедичности, но и по стремлению к натурфилософии или философскому осмыслению естественного знания. В движении человеческой мысли во времени Вернадский отметил удивительный феномен, названный им в 1926 г. в лекции по истории науки *пульсацией талантливости*: на протяжении одного—трех поколений в какой-либо стране или регионе появляются одновременно талантливые люди и поднимают на огромную высоту определенную область духовной жизни. «Мы не знаем пока, почему, как и отчего происходит рождение талантливых людей, их скопление в близких поколениях и отсутствие в других. <...> Мы должны их принять за свойство нашей расы, проявление ее природы. Это такой же природный процесс, подлежащий научному исследованию натуралиста, каким является воздействие научной мысли на окружающую живую и мертвую природу» [3].

Появление больших талантов навсегда, видимо, останется загадкой, как и все великие тайны природы. Но накапливаются интересные наблюдения историков, психологов и, конечно, генетиков. Первые две научные книги в этой области написаны кузеном Дарвина, выдающимся натуралистом и исследователем, основателем эвгенического движения Френсисом Гальтоном. В центре его анализа были распределение в английской популяции факторов талантливости и характер их наследования [4]. Вскоре в 1888 г. основатель знаменитой французской династии биологов Альфонс Декандоль выпустил труд «История науки и ученых за два века», фокусируясь, в противовес Гальтону, на условиях воспитания и социальных факторах [5]. С тех пор основные исследования о талантах и творческих способностях человека обсуждаются в рамках дилеммы наследственность—среда.

Выдающиеся таланты нередко появляются внезапно, в силу счастливой комбинации генов и возвышаются одиночками среди окружающего ландшафта, подобно Фудзияме. Но чаще в ряде семей происходит постепенное накопление генов, предрасполагающих к интеллектуально-художественному творчеству и труду. В аспекте поставленной Вернадским задачи — понять, «почему, как и отчего происходит рождение талантливых людей», в начале 1920-х годов Ю.А.Филипченко, основатель первой в России кафедры генетики, организовал социально-демографическое (или эвгеническое) исследование выдающихся ученых Петербурга [6]*. Провести работу помогло (в духе пословицы) несчастье. Для спасения ученых Петербурга от голода и холода (последствий Гражданской войны) по инициативе Горького была создана комиссия, которой пришлось ранжировать ученых (а также видных деятелей культуры и медицины) по степени их достижений и заслуг. Среди пяти условных категорий три квалифицировались так: «видные ученые с большим научным и научно-учебным стажем»; «выдающиеся ученые, инициаторы крупных научных направлений и школ в России»; «ученые мирового значения, а равно крупнейшие представители данной науки» (В.И.Вернадский, И.П.Павлов, В.А.Обручев, С.Ф.Платонов, А.И.Бенуа). Представителей последних двух категорий оказалось около 80, и всем им Филипченко разослал специально разработанную подробную анкету.

* В 2012 г. громадный том историка биологии В.В.Бабкова, который собрал едино и прокомментировал оригинальные статьи русского эвгенического движения и первые исследования в области медицинской генетики в 1920—1930-х годах, переведен на английский язык и выходит в США. Перевод выполнил автор «Природы» биолог Виктор Фет. (Dawn of Human Genetics. Cold Spring Harb. Lab. Press. Transl. by Victor Fet. N.Y.).

По многим особенностям (распределению по главным специальностям, происхождению, детности и т.д.) от всей когорты ученых выдающиеся сколько-нибудь заметно не отличались. Но среди них оказалось больше рожденных в центральных районах и в Поволжье. А при учете области происхождения (места рождения отца) выходцы из центра и Поволжья среди выдающихся ученых составили даже более половины.

Интересен оказался этнический состав: его определяли по выбору ответа из трех вариантов: «чисто русские», «смешанное происхождение» и «иностранцы». К первым условно отнесли ученых, у которых на протяжении трех предшествующих поколений «нет указаний на примесь иноплеменной крови» (в более отдаленных поколениях такая примесь допускалась). Тех же, у кого один из родителей или дедушка(бабушка) имели иностранные или иные корни, причисляли к лицам смешанного происхождения. При таком критерии доля чисто русских среди ученых в целом и среди выдающихся была сходной — 56—57%. Однако лиц межэтнического происхождения среди выдающихся ученых оказалось заметно больше, чем в общей популяции ученых (26 и 16.7% соответственно). Любопытно, что тогда во всей когорте ученых Петербурга иностранцы составляли 26%, а среди выдающихся — 18%. Среди лиц смешанного происхождения и иностранцев преобладали немецкий, шведский польский и еврейский элементы. У отцов выдающихся ученых выявился гораздо больший процент лиц высококвалифицированных профессий. Среди родственников научной элиты часто встречались как выдающиеся личности, так и душевнобольные, причем в обоих случаях в основном по материнской линии.

Далее Филипченко и его ученики провели детальный социологический и генетико-демо-

графический анализ всех членов Российской академии наук, избранных за 80 лет (1846—1924). Материалы этого исследования содержат интереснейшие наблюдения. К примеру, если в популяции отцов ленинградских студентов лиц смешанного происхождения оказалось только 3%, то среди академиков их было около 20%. На этом основании Филипченко сделал вывод об «известной связи между одаренностью и смешанным происхождением».

Родословная Ляпуновых

Среди описанных российских академических династий, в которых на протяжении ряда поколений было много выдающихся талантов, — семейства Струве, Грот, Бекетовых, Соловьевых и знакомые нам Ляпуновы. Подобные исследования были насильственно прерваны в начале 1930-х годов, а затем на них просто наложили запрет. Достаточно напомнить, что книга известного генетика В.П.Эфроимсона по генетике гениальности, написанная в 1978 г., вышла лишь в 1998 г. — через 20 лет после написания и через 10 лет после смерти автора книги [7].

Имена братьев академиков Александра Михайловича и Бориса Михайловича Ляпуновых названы Филипченко в ряду имен академиков смешанного происхождения. Их мама, Софья Александровна Шипилова, родилась от брака симбирского ценителя искусств помещика Шипилова с Екатериной Мессинг из дворянского рода Мессингов (родоначальник Иван (Иоганн)). Мессинг поступил на российскую службу лекарем в Морской госпиталь Санкт-Петербурга, в 1792 г. возведен в дворянство; в этом роду военные, сенаторы, правоведа, управляющие (подробнее на сайте rusdeutsch-panorama.ru). Ее муж Михаил Васильевич Ляпунов умер в возрасте 48 лет. Оставшись одна с тремя сыновьями

(старшему Александру — 11 лет, младшему Борису — шесть), Софья Александровна сделала все, чтобы дети получили достойное образование и развили свои таланты. Первые уроки музыки средний сын Сергей — будущий композитор — получил от мамы.

Два сына композитора С.М.Ляпунова погибли в Гражданской войне; третий, став священником, погиб в сталинских лагерях; две дочери умерли в блокадном Ленинграде. Сам Сергей Михайлович едва избежал гибели в годы постреволюционных репрессий. Будучи старостой при церкви консерватории, он в 1922 г. протестует против изъятия большевиками церковных ценностей и отказывается выдать ключи. На него в ВЧК заводят уголовное дело в рамках огромного «Дела петроградских церковников». После пяти месяцев допросов и ходатайств директора консерватории А.К.Глазунова Ляпунова осудили условно. Его здоровье подорвано; получив отпуск на лечение, он уезжает во Францию и через год умирает [8].

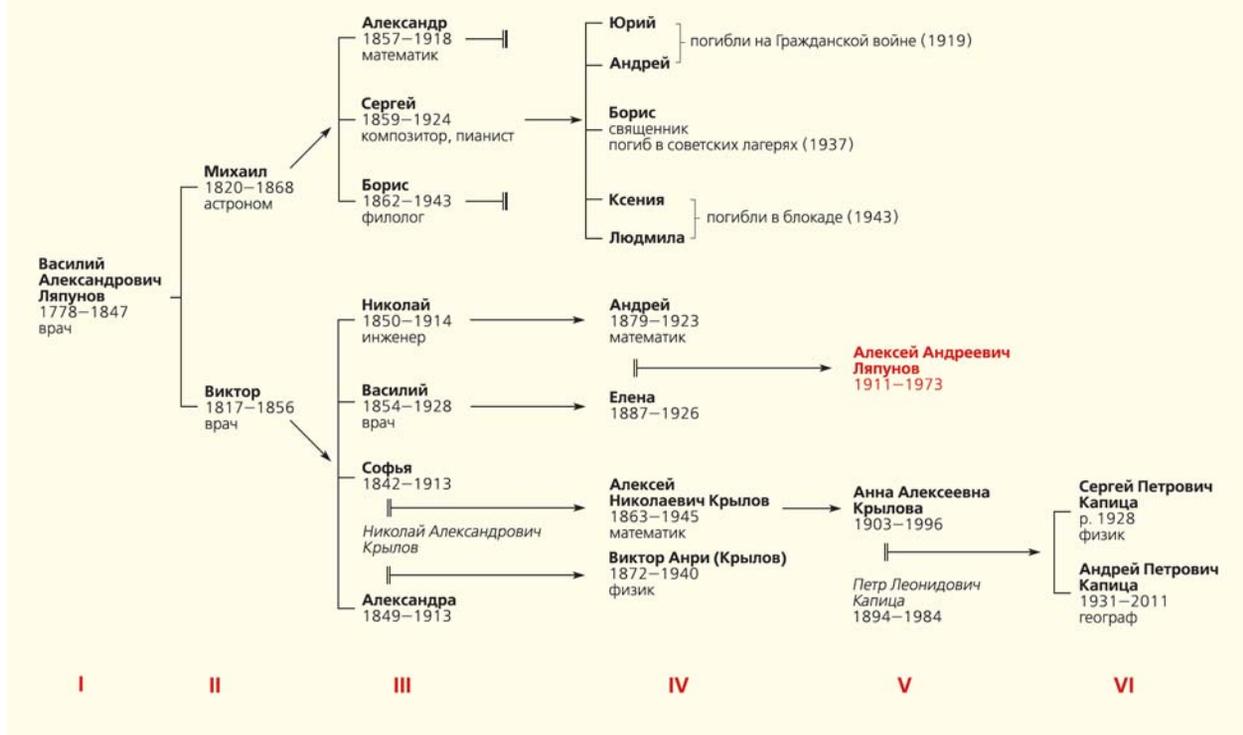
Другой кузенный брак в потомстве врача Виктора Васильевича Ляпунова привел к рождению А.А. Одна из ветвей рода Ляпуновых напоминает библейскую историю об Иакове, женатом на двух родных сестрах, Лии и Рахили. Две родные сестры деда А.А. — старшая, Софья Викторовна Ляпунова, и младшая, Александра Викторовна, родили сыновей от одного и того же человека — Николая Крылова (окончил первый кадетский корпус в Петербурге, участвовал в Крымской войне, стал помещиком, председателем земской управы г.Алатырь). Законный брак со старшей сестрой привел к рождению будущего знаменитого математика и кораблестроителя академика А.Н.Крылова. Сын от внебрачной связи с младшей сестрой Александрой, Виктор Анри, тоже был даровитым, он стал профессором физики во Франции. Эта семейная тайна раскрылась лишь спустя

130 лет в предисловии А.П.Капицы к воспоминаниям своего деда Крылова [9].

Андрей Петрович пишет: «В книге ничего не сказано о причинах отъезда семьи Крыловых в Марсель в 1872 г. Сейчас, спустя 130 лет, можно наконец рассказать о том, что долгое время считалось семейным секретом. Причина в том, что родная сестра матери Алексея Николаевича, Александра Викторовна Ляпунова, должна была родить. Отцом ребенка был Николай Александрович Крылов. Если бы ребенок родился в России, то его как незаконнорожденного ожидала весьма печальная судьба. Поэтому было принято решение всей семьей переехать в Марсель, так как во Франции такие дети пользовались всеми правами обычных граждан. Родившегося там ребенка назвали Виктором. Крестным отцом его был Алексей Николаевич, от которого он получил отчество, а фамилия ему была дана Анри. В 1891 г., поступив в Сорбонну, сначала получил образование математическое, а потом — в области естественных наук. После окончания университета увлекся философией и психологией. В 1897 г. защитил докторскую диссертацию в Гёттингенском университете на тему «Локализация вкусовых ощущений». Потом публикует ряд работ в области психологии. В 1902 г. в Сорбонне он защищает докторскую диссертацию в области физико-химической биологии. Его интересы невероятно обширны. Во время Первой мировой войны он в качестве французского атташе в России занимается организацией химической промышленности оборонного значения.

Виктор Алексеевич Анри был женат на Вере Васильевне Ляпуновой, дочери княгини Елизаветы Хованской и Василия Ляпунова. Этот брак дал блестящую ветвь Анри (Крыловых) во Франции. <...> У Виктора Алексеевича было два сына, Виктор

ФРАГМЕНТ РОДОСЛОВНОЙ ЛЯПУНОВЫХ



Составленный по материалам книги фрагмент родословного древа Ляпуновых, относящийся к ветви, ведущей к А.А. Римские цифры означают поколения. Линии брака указаны двойными линиями, от их середины идут линии потомства. Отмечу некоторые генетико-демографические особенности. Во-первых, это поразительные вспышки талантности в потомстве некоторых семей из ляпуновской династии. Во-вторых, нередкие кузенные или родственные браки, подобно знаменитым межсемейным связям родов Дарвина и Веджвуд. И, в-третьих, межэтническое или смешанное происхождение некоторых талантливых потомков. Василий Александрович Ляпунов (1778—1847), прапрадед А.А., был синдиком, или уполномоченным на ведение дел Казанского университета. Потомство двух его сыновей Михаила и Виктора оказалось высокодаровитым. У Михаила Ляпунова, профессора астрономии Казанского университета, все трое сыновей отличались выдающимися талантами: математик академик Александр Михайлович Ляпунов (1857—1918), композитор, пианист, педагог консерватории Сергей Михайлович Ляпунов (1859—1924) и филолог-славист академик Борис Михайлович Ляпунов (1862—1943). Генетик с сожалением отметит, что браки братьев Александра и Бориса, женившихся на родственницах, оказались бездетными. Судьба же потомков Сергея и его самого была трагической [8].

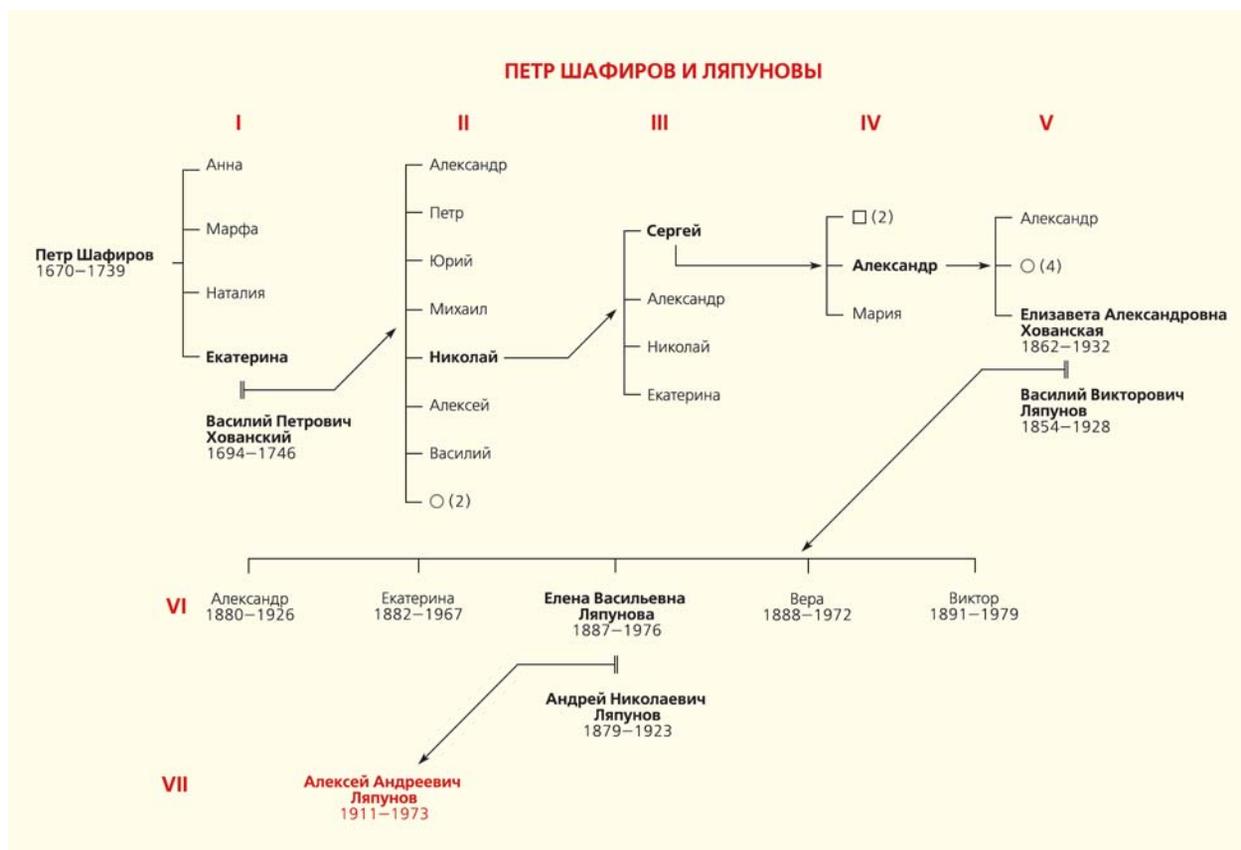
и Александр, и две дочери, Елена и Вера. С последней я случайно познакомился в 1964 г. на конференции в Токио, где она подошла ко мне и, глядя на мою карточку участника конференции, сказала: «Кажется, я ваша тетя». Так я познакомился с Верой Анри, и потом уже в Москве моя мать рассказала мне о французской ветви нашей семьи. Дед очень дружил со своим сводным братом Виктором. Сохранилось много писем от него к Алексею Николаевичу. Часть потомков Виктора пере-

ехали в США, я с ними встречался в 80-х годах. Только теперь я решил предать гласности эту историю».

Виктор Анри (Крылов) приехал в Россию в 1915 г., в 1916—1918 гг. заведовал лабораторией в Институте биологической физики (под эгидой Лазарева) — там, где спустя 12 лет стал работать его племянник Алеша Ляпунов. В 1918 г. Лазарев создает журнал «Успехи физических наук». Второй том журнала, как особо отмечает Воронцов, открывается проблемной статьей

В.Анри «Современное научное мировоззрение», посвященной открытию А.Эйнштейном принципа относительности. Затем Анри переезжает в Петроград и становится профессором Государственного оптического института, читая лекции в разных институтах.

Вскоре происходит резкая перемена в его личной жизни: страстно увлекшись своей двоюродной сестрой Верой Ляпуновой, он расторгает прежний брак и вместе с Верой навсегда уезжает во Францию.



Ветвь родословной — от Шафирова к Ляпуновым. Кружками обозначены неустановленные потомки женского пола, квадратами — мужского.

С позиции генетики здесь можно думать о явной материнской передаче генов, определяющих выдающиеся способности в области математики и физики. Заметим, Виктор Анри (Крылов) был женат на своей кузине Вере, в этом кузенном браке родилось четверо детей, и один из них Виктор Филипп Анри (Victor Philippe Henri) тоже стал профессором физики, работал с Жолио Кюри, участвовал в сопротивлении. После войны оказался в США, в Беркли. Специализируясь в области атомной физики, он несколько раз приезжал в Россию. Здесь с ним встречался Алексей Андреевич и рассказал ему семейную тайну рождения. Виктор Анри-младший знал, что его мама русская, но думал, что его отец — француз. Елена Алексеевна Ляпунова, сообщившая мне эту деталь, два года назад посетила семью свое-

го родственника Виктора Филиппа Анри. Накануне 2012 года и мне довелось навестить эту семью. Жена Виктора Анри-младшего Кристина, по профессии архитектор, увлеклась генеалогией и составила родословное древо внероссийских ветвей династии Ляпуновых.

Можно вообразить, что Александр Пушкин, описавший свою необычную родословную, с интересом воспринял бы евгеническое исследование Филипченко. Поэт в рамках принятой классификации оказался бы в группе выдающихся талантов смешанного происхождения: его дед по материнской линии Осип Ганнибал родился от брака арапа Петра Великого Абрама Ганнибала и немки Регины фон Шеберг. Как ни странно, необычному рождению поэтического гения Пушкина Россия в определенной мере обязана прихоти

Петра I, приказавшего привезти ему мальчика-эфиопа. Петр послал его во Францию для получения образования, а затем дал возможность проявить свой ум и военно-организационные таланты на службе в России. Но если в четвертом поколении арапа Петра Великого родился Пушкин, то в шестом поколении другого любимца Петра I — его сподвижника П.П.Шафирова — родился А.А.Ляпунов!

Петр I не колеблясь выдвигал человека любого сословия и этнического происхождения на высокий пост, если видел в нем таланты. Отец Шафирова — еврей родом из Смоленска, переехал в Москву, где был крещен и принят на службу благодаря знанию языков. Своему сыну он дал прекрасное домашнее образование. По одной из легенд, Петр I, прогуливаясь по московским торговым рядам, обратил

внимание на молодого Шафиров, вступил с ним в разговор и, оценив его острый ум и образованность, распорядился принять переводчиком дипломатических бумаг и иностранных книг в Посольском приказе. В 1697 г. царь взял его в свою поездку в Западную Европу в составе Великого посольства. Карьера Шафирова стремительно росла, он стал вице-канцлером и прекрасно проявил себя на сложном дипломатическом приеме.

В «Русском евгеническом журнале», издаваемом под эгидой Н.К.Кольцова, в статье о личности барона Шафирова он обрисован как «человек обширного ума, обладающий выдающимися дипломатическими способностями... изумительной гибкостью ума, находчивостью и умением пользоваться слабыми сторонами противника» [10]. Этим сторонам личности Шафирова и его даровитым потомкам (С.Ю.Витте, религиозному философу С.Н.Трубецкому, писателю А.Н.Толстому) посвящена вышедшая в 2011 г. книга историка С.Дудакова [11].

В поколении А.А. линии Ляпуновых и Хованских вновь пересеклись. Рогнеда Алексеевна, родная сестра А.А., выходит за

муж за математика Георгия Сергеевича Хованского. Их сын Аскольд Хованский, с детства влюбленный в математику, стал крупным ученым, открыл новые направления, ныне профессорствует в Университете Торонто. Гены Ляпуновых продолжают свое путешествие во времени и пространстве.

Когда после восьми месяцев энергичных усилий осенью 1922 г. Филипченко подготовил к публикации результаты генетико-демографического анализа выдающихся ученых Петербурга, он с горечью отметил, что семь из них унесены смертью и трое покинули Россию. «А сколько выдающихся ученых было потеряно Россией за предыдущих четыре года!» После этого горестного восклицания следует вывод: если подобные утраты будут продолжаться и далее, то «очень скоро мы можем прийти до отсутствия талантливых людей в нашей среде, которое Пирсон глубоко правильно считает худшим из зол, могущих постигнуть нацию».

* * *

Книга об Алексее Андреевиче Ляпунове, его окружении и родословной в определенной мере продолжает (спустя 75 лет) тра-

дицию описания интеллектуальных династий и феномена «пульсации талантливости». Редактор книги доктор биологических наук Е.А.Ляпунова искусно составила расширенную генеалогическую схему родословного древа Ляпуновых. Рассматривать это древо мне как генетику очень интересно, без него трудно разобраться в сложных и запутанных генеалогических связях. Любопытно хотя бы мысленно представить пути наследственной передачи генных комбинаций, вызывающих высокий уровень интеллекта, склонность к математике и другие способности, а также оценить, какие факторы среды способствуют становлению выдающихся способностей.

Памятуя об этом, читатели должны быть глубоко признательны Воронцову, к сожалению, не увидевшему прекрасного воплощения своего замысла, научному редактору книги Е.А.Ляпуновой, издателю Л.С.Яновичу и лицам, оказавшим финансовую поддержку, за любовно изданную книгу. Она вводит в мир интеллектуальной династии Ляпуновых, без творческой активности которых уже трудно представить науку и культуру России. ■

Литература

1. Юшкевич А.П. Дело академика Н.Н.Лузина // Репрессированная наука. Л., 1991.
2. Фет А.И. Очерки истории информатики в России. Новосибирск, 1998. С.206—209.
3. Владимир Вернадский. Открытия и судьбы. М., 1993. С.538—555.
4. Канаев И.И. Френсис Гальтон. Л., 1972.
5. Микулинский С.Р. Альфонс Декандоль и его работа «История науки и ученых за два века» // Из истории биологии. Вып.4. М., 1972.
6. Филипченко Ю.А. Наши выдающиеся ученые // Бабков В. Заря генетики человека. М., 2005. С.232—244.
7. Голубовский М.Д. Гены, активность интеллекта и судьбы людей в истории // Природа. 1999. №7. С.113—120.
8. Горяшина В. Сергей Михайлович Ляпунов (1859—1924) и Санкт-Петербургская консерватория // www.conservatory.ru
9. Капица А.П. Мемуары академика А.Н.Крылова: Предисловие к книге // Крылов А.Н. Мои воспоминания. СПб., 2003.
10. Нелидов Ю.О. О потомстве барона Петра Павловича Шафирова // Русский евгенич. журн. 1925. Т.3. Вып.1 (Перепечат. В кн.: Бабков В. На заре генетики. М., 2005. С.348—353.)
11. Дудаков С.Ю. Петр Шафиров и другие. Иерусалим; М., 2011.

Геология. Геофизика

Ал.А.Шрейдер. ФОРМИРОВАНИЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ КОТЛОВИНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ. М.: Научный мир, 2011. 216 с.

Монография предназначена для ученых-специалистов в области морской геологии и геофизики, аспирантов и студентов геологических и геофизических специальностей высших учебных заведений.

В книге обобщены результаты комплексных геолого-геофизических исследований глубоководной котловины Черного моря, проводившихся отечественными и зарубежными научно-исследовательскими организациями. Автор дает современные представления о структуре и особенностях формирования этой котловины. Создан электронный банк информации о структуре осадочного чехла глубоководной котловины. Его цель — восстановление палеогеодинамики Черного моря, включая вычисление эйлеровых полюсов и углов поворота литосферных блоков, а также оценка возраста возникновения и расчет параметров эволюции осадочного тела котловины и ее погребенного склона.

Почвенная зоология

Б.Баяртогтох. ПАНЦИРНЫЕ КЛЕЩИ МОНГОЛИИ (Acari: Oribatida). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2011. 371 с.

Впервые публикуется монография-обзор фауны панцирных клещей Монголии с определительными таблицами надсемейств, семейств, родов и видов. Каждый вид подробно описан и иллюстрирован оригинальными рисунками, а также фотографиями Р.Пенттине-на (Финляндия) и С.Шимано (Япония).

Панцирные клещи (отряд Oribatida) представляют одну

из многочисленных групп почвенной микрофауны, широко распространенную на разных континентах и в разных природных зонах, которая принимает активное участие в трофических сетях почвенного яруса экосистем. По экспертным оценкам, современное таксономическое разнообразие панцирных клещей составляет до 100 тыс. видов, из которых описано едва ли 10%. При этом большая часть исследований была выполнена на территории Европы, а на Азиатском материке — лишь в отдельных регионах (в рамках маршрутных экспедиционных работ).

Создание настоящего тома оказалось непростым делом. Обилие описаний новых видов, рассеянных в зарубежных изданиях, не всегда доступных в библиотеках Монголии, невозможность в ряде случаев изучить типичные первоописания, очень лаконичные и неясные диагнозы, подкрепленные рисунками разного качества, — все это создавало значительные, не всегда преодолимые трудности.

Экологические исследования панцирных клещей во многих регионах приостановлены из-за недостаточной изученности их систематики. В частности, в Монголии, где широко развито животноводство, фауна панцирных клещей до последних лет была исследована фрагментарно, их на территории страны было известно всего 107 видов.

Охрана природы

А.Б.Абатуров, Е.Г.Егорова, В.В.Киселева и др. ЛОСИНЫЙ ОСТРОВ: ВЕКА И ВЕХИ (Четыре экскурсии в прошлое национального парка). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2011. 130 с.

Национальные парки — вторая по строгости охраны (после заповедников) категория ох-

раемых природных территорий. Заповедники — традиционно русская форма охраны природы. Они создавались и создаются для сохранения и изучения эталонов дикой природы. Задачи национальных парков шире, они призваны совместить, казалось бы, несовместимые вещи: охрану дикой природы, с одной стороны, и образование, туризм, рекреацию и традиционные формы хозяйства — с другой.

Поэтому в национальных парках принято разделение территории на так называемые функциональные зоны, у каждой из которых свое предназначение и, соответственно, свой режим охраны и использования. В «Лосином острове» таких зон пять. Первая — это особо охраняемая зона (заповедное ядро национального парка). Вторая — зона охраны историко-культурных объектов (предназначена для сохранения и демонстрации природного окружения памятников). Третья — рекреационная зона (образует примерно километровую полосу вдоль границ национального парка). Четвертая — зона познавательного туризма (своего рода буфер между рекреационной и особо охраняемой зоной). Пятая — хозяйственная зона (объединяет поселки и усадьбы лесничества).

В книге в форме путевода-теля по четырем экскурсионным маршрутам рассказывается об истории множества природных и культурных объектов, расположенных на территории национального парка «Лосиный остров» и его окрестностей. Очерки проиллюстрированы как современными, так и архивными фотографиями. Издание предназначено для широкого круга читателей и представляет интерес для всех, кто интересуется природой и историей Москвы и Подмосквья.

Мой первый учитель

Воспоминания об Александре Васильевиче Фурсенко

Академик Ю.М.Пущаровский
Геологический институт РАН
Москва

В 2003 г. Институтом геологических наук Национальной академии наук Беларуси издан солидный том трудов, посвященный 100-летию со дня рождения выдающегося ученого, геолога-палеонтолога Александра Васильевича Фурсенко [1]. Но не анализу этой богатой по содержанию книги посвящен очерк. Речь будет идти о моих воспоминаниях об этом замечательном человеке.

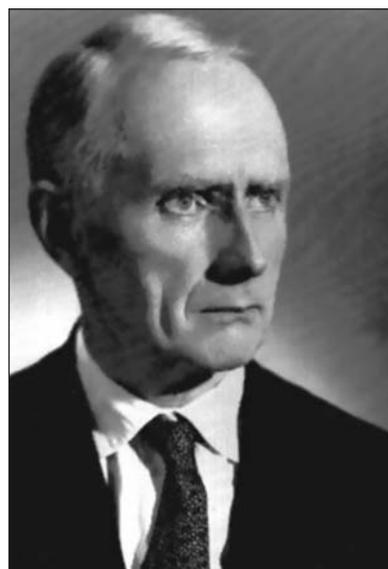
В 1933-м году я окончил фабрично-заводское училище (ФЗУ) при знаменитом московском металлургическом заводе «Серп и Молот» по слесарной специальности. Мне было 16 лет. В те годы поступить в институт сыну служащего было практически невозможно: нужен был рабочий стаж. Вот я и оказался в ФЗУ. Меня тянуло к геологии, с которой я связывал интересные путешествия. И уже в конце упомянутого года меня приняли на работу в Нефтяной геолого-разведочный институт (НГРИ), в микропалеонтологическую лабораторию, на самую маленькую должность — младшего препаратора. Лабораторией ведал Александр Васильевич Фурсенко, незадолго до того приехавший из Ленинграда в столицу в связи с переводом в Москву НГРИ. Это был тридцатилетний белокурый, ростом выше среднего, худощавый человек, очень ровно относящийся к своим сотрудникам. Лабораторию надо было созда-

вать, что называется, с нуля, и он этой деятельностью был очень озабочен. Я препарировал микрофауну.

Шли первые пятилетки, и страна нуждалась в мощной нефтяной промышленности. И тут микропалеонтология оказалась в высшей степени востребованной. Ее практическая значимость состояла (и ныне состоит) в том, что по фораминиферам проводилась датировка возраста геологических слоев, вскрываемых в естественных выходах и бурением. Мировая практика того времени уже достаточно широко использовала такой подход, но в нашей стране соответствующие исследования только начинались. Фурсенко оказался основоположником отечественной микропалеонтологии.

Коллектив лаборатории был небольшой. Среди них — только что окончивший МГРИ Борис Максимович Келлер, впоследствии ставший виднейшим стратиграфом-палеонтологом. Я — на четыре-пять лет моложе. Мы очень подружились. Оказалось, что на всю жизнь. В лаборатории нередко звучала немецкая речь. Один из сотрудников — Мартин Артурович Глесснер — приехал из Австрии как иностранный специалист.

Время летело быстро, и уже в мае 1934 г. я оказался коллектором Александра Васильевича, собиравшегося на полевые работы в Эмбенский нефтегазоносный район Западного Казах-



А.В.Фурсенко. 1963 г.

стана. Из Москвы поездом выехали в Горький, а оттуда по Волге спустились до Астрахани, что заняло несколько дней и оставило неизгладимое впечатление. Место назначения — г.Гурьев, находившийся в устье р.Урала. В Гурьеве размещался трест «Эмбанефть», с которым Александр Васильевич должен был заключить договор о проведении наших работ. Эта часть прошла гладко, но организационные хлопоты затянулись. Пребывание в степи в те годы не было безопасным: там бродили басмачи. И в Гурьеве нам выдали наганы и патроны. Мы с ними не расставались в течение всего периода полевых работ.

Костяк партии составляли шесть человек. Кроме нас двоих — прораб Айдингали Исов, старший коллектор Миша Баранов и двое рабочих: Кожасов и Далбаев. Средства передвижения — семь верблюдов и три лошади.

Врезались в память изумительные геологические объекты — обрывистые склоны выступов и понижений в рельефе, сложенные белыми, сияющими на солнце известняками меловых и палеогеновых отложений. Александр Васильевич тщательно их описывал, а я собирал коллекцию пород.

Пространства безлюдные. Однако однажды неподалеку от нашего лагеря мы заметили трех бредущих людей. А.В. тут же направил меня выяснить, кто такие. Оказалось, что беглецы из лагеря для заключенных, который существовал где-то среди солончаков, окружавших Каспий. Всем им присудили по уголовным статьям 10 лет лагерей — высшую тогда меру наказания. И мы, суперпатриоты, решили их задержать, чтобы отправить в ближайший сельсовет,



А.В.Фурсенко на полевых работах в Западном Казахстане. 1934 г.

километров за 25. Эта сомнительная миссия выпала мне. Я вновь подъехал к троице (кстати, на ремне у меня висел наган) и потребовал идти обратно, на брошенный нефтепромсел Иман-Кара, находившийся в 7 км от нас. Там стоял пустой

дом с подвалом. В этот подвал и надлежало беглых заключенных поместить, а на первой же попутной машине вывезти в сельсовет. Дело было под вечер. По прибытии беглецов покормили пшенной кашей и заперли в подвал. Одному из рабочих



Западный Казахстан. Перебазировка геологической партии. 1934 г.

составляло развитие основ микропалеонтологии и ее применения в нефтяной геологии [1, 2]. Что касается педагогической деятельности, то ею Александр Васильевич начал заниматься еще в ранней молодости. В памятном мне 1934 г. он был уже доцентом, а в 1937-м стал профессором. Самым значительным организационным делом является создание в четырех городах микропалеонтологических лабораторий: в Ленинграде, Москве, Минске и Новосибирске. В каждой из них он работал по многу лет и оставил многочисленных учеников.

За особые достижения в работе Александр Васильевич в 1971 г. был награжден высшим орденом Советского Союза — орденом Ленина.

О периоде Великой Отечественной войны Голубцов пишет: «5 июля 1941 г. он (Фурсенко) добровольно вступил в народное ополчение, а 10 июля уже участвовал в боях на Ленинградском фронте и был награжден медалью “За оборону Ленинграда”... Только лишь в марте 1944 г. он был отозван из рядов Советской армии и направлен в распоряжение Министерства нефтяной промышленности СССР» [1. С.18].

Я тоже служил в армии. Однажды в Москве, осенью 1943 г., мы случайно встретились. Александр Васильевич был в солдатской шинели, худощавый, на чем-то сосредоточенный. Время для разговора было очень коротким.

В отношении ученых степеней и званий у Александра Васильевича дело обстояло очень нестандартно. В 30 лет он был уже хорошо известен своими научными трудами и как организатор микропалеонтологических исследований в стране. На проводившуюся в 1937 г. в Москве XVII сессию Международного геологического конгресса он представил тезисы об итогах микропалеонтологических исследований в Советском



Александр Васильевич Фурсенко с сыновьями.

Союзе. Но ученой степени у него еще не было. Позже в том же году ему присвоили степень кандидата геолого-минералогических наук без защиты диссертации и звание профессора. Докторскую степень Александр Васильевич получил только в год своего шестидесятилетия (1963). Я присутствовал на его защите. Он представил доклад, посвященный основным вопросам микропалеонтологии, подготовленный по ранее опубликованным им работам. Защита происходила в Геологическом институте АН СССР. То, что доклад носил обобщающий характер, как мне показалось, немного волновало диссертанта, несмотря на то что еще в 1950 г. Фурсенко избрали членом-корреспондентом Белорусской академии наук. Но защита прошла совершенно благополучно.

На мой взгляд, имелись две основных причины нестандартности в присвоении ученых званий и степеней. Одна из них — большая занятость организационными делами, а другая — слабый интерес к титулам. В подтверждение приведу слова Александра Васильевича из письма ко мне от 14 декабря 1953 г.: «Много разных дел и по универ-

ситету, где геологическое отделение было организовано буквально со дня моего переезда в Минск, и в организации которого я принимаю самое деятельное участие. Дело не в том, чтобы университет командировал меня в докторантуру, а в том, что очень трудно бросить лишь едва начатое дело и полторы сотни будущих геологов».

Какую-то роль, возможно, сыграло и то, что семья Александра Васильевича была многодетной.

Александр Васильевич ушел из жизни 30 сентября 1975 г. в возрасте 72 лет.

Он был моим первым учителем геологии. От него я получил свою первую служебную характеристику, предназначенную для поступления на новую работу.

Очень кратко остановлюсь на важнейших научных трудах Александра Васильевича.

Настольной книгой в начальный период отечественной микропалеонтологии была монография американского палеонтолога Дж. Кешмэна (Cushman) «Фораминиферы». Фурсенко задумал и осуществил издание этого труда на русском языке. Ряд текстов им переведен лично. Он же был и редактором.

На русском языке книга вышла в свет в 1933 г. Это было настоящее методическое руководство по изучению микрофауны. А.В. внес в него ряд положений из своего опыта. Через несколько лет за этим трудом последовало издание «Определителя фораминифер нефтяных районов СССР» (1937), не требующее комментариев.

На рубеже 40—50-х годов Александр Васильевич публикует работы о происхождении и эволюции фораминифер. Одна из них посвящена эволюции фораминифер в связи с проблемами стратиграфии нефтяных месторождений (1950).

В развернутой статье «Основные этапы развития фораминифер в геологическом прошлом» (1958) обсуждаются кардинальные вопросы эволюционной микропалеонтологии.

Большое внимание уделял Фурсенко систематике фораминифер. В общей части издания «Основы палеонтологии» (1959) приводится раздел «Простейшие» под редакцией Д.М.Раузер-Черноусовой и А.В. Фурсенко.

Итоговым трудом за многие годы деятельности стал указанный выше обобщающий доклад

по опубликованным работам (1963), представленный на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук: «Основные вопросы микропалеонтологии фораминифер (в связи с задачами стратиграфии)».

Значительные публикации были у Александра Васильевича и позднее. Их список содержится в упомянутом выше томе, посвященном 100-летию ученого [1].

* * *

Научный вклад Александра Васильевича в геологию и палеонтологию оценивается как исключительно значимый. То же можно сказать и об организационной деятельности. Его большой портрет висит в конференц-зале Института геологических наук Академии наук Беларуси в Минске.

Я не могу привести другого примера ученого, который создал бы четыре мощных научных лаборатории в разных городах страны. Им руководило, конечно, чувство практической важности избранного научного направления, прежде всего для нефтяных геологоразведочных и нефтепоисковых работ.

Этот замечательный человек был к тому же прекрасным семьянином. Его старший сын, Александр Александрович, — академик АН СССР, «выдающийся ученый-историк, один из лидеров отечественной американистики» [3].

Заключая, отмечу следующее.

Микропалеонтологические исследования в нашей стране ведутся уже многие десятки лет, составляя одно из фундаментальных направлений в геологии и палеонтологии. Одновременно они представляют собой исключительно важную часть работ, связанных с развитием нефтяной промышленности. Более того, микропалеонтологические данные лежат в основе расчленения осадков современных океанов и морей Земли и их корреляции с отложениями, распространенными на континентах. Выдающаяся роль в этих работах принадлежит Александру Васильевичу Фурсенко, глубокому исследователю, крупному организатору научных работ и прекрасному человеку. В 2013 г. исполнится 110 лет со дня его рождения. Этой памятной дате и посвящен мой очерк. ■

Литература

1. Стратиграфия и палеонтология геологических формаций Беларуси. Минск, 2003.
2. У истоков советской микропалеонтологии // Природа. 1978. №12. С.75—83.
3. Вестник Российской академии наук. 2008. Т.78. №4. С.374.

Ускользящая птица: история кеклика в Крыму

А.Н.Цвелых,
кандидат биологических наук
Институт зоологии НАН Украины
Киев

Герой рассказа кеклик (*Alectoris chukar*) принадлежит особому роду куриных птиц — горных, или красноногих, куропаток. Кеклики широко распространены в Азии, а в Европе населяют только крайнюю северо-восточную часть Балканского п-ова. На остальной его территории, в Альпах и на Апеннинском п-ове обитает другой вид — каменная куропатка (*Agraecus*), еще дальше, в юго-западной Европе, лежит область распространения третьего вида этого рода — красной куропатки (*Arufa*). Горные куропатки — оседлые птицы, они не совершают далеких перелетов. Именно поэтому присутствие одного из видов на отдаленной изолированной территории (например, в горном Крыму) может свидетельствовать о ее древних зоогеографических связях с регионами, где этот вид распространен в настоящее время.

История горных куропаток в Крыму напоминает захватывающий детектив. Этим птиц здесь видели многие, но в руки ученых они практически не попадали. Помимо ученых, в этой истории участвовали военные, охотники, один путешественник XVII в. и даже средневековый художник.

Первые научные сообщения о существовании горных куропаток в Крыму поступили от британских офицеров — лейтенанта королевской артиллерии Т.Блэкстона и лейтенанта легкой пехоты Л.Х.Ирби. Участвуя в Крымской войне



Кеклик.

Фото Е.Ю.Рудневой

(нам эти события больше знакомы как оборона Севастополя 1854—1855 гг.) и будучи хорошими натуралистами, эти офицеры параллельно занимались орнитологическими исследованиями. Сразу же по окончании военных действий оба они почти одновременно опубликовали обширные статьи по орнитофауне Крыма в старейшем британском научном журнале «Zoologist». В обеих статьях были упоминания о встречах красноногих куропаток в районе Севастополя. Блэкстон писал, что получил сведения об этих куропатках от своего коллеги-воен-

ного — минера [1]. Тот рассказал, что встретил французского военного с добытыми им несколькими красноногими куропатками, которых, по словам того, он застрелил в Мекензиевых горах (возвышенность к северо-востоку от Севастополя). К какому именно виду горных куропаток они принадлежали, Блэкстон, естественно, выяснить уже не мог, но Ирби, с которым он беседовал по этому поводу, почему-то выразил уверенность, что это — красная куропатка. Сославшись на Ирби, Блэкстон включил этот вид в свой список птиц Крыма. Сам



Кеклик, распространенный на Ближнем Востоке (слева) и на Балканском п-ове. Ближневосточная птица — одна из наиболее светлокрашенных и с хорошо заметным ярким красным кольцом вокруг каждого глаза. У балканского кеклика спина с темным красноватым оттенком.

Фото Е.Ю.Рудневой и Ц.Нешевой

Ирби в опубликованном им подробном списке птиц, отмеченных в Крыму, лишь мельком упомянул, что красную куропатку встречали здесь изредка в течение года [2].

Сообщения об обитающей в Крыму красной куропатке выглядели более чем неожиданно. Дело в том, что область распространения птиц этого вида, как уже говорилось, находится очень далеко от Крымского п-ова — в юго-западной части Европы. Следует сказать, что все три вида европейских горных куропаток внешне очень похожи. Кеклик и каменная куропатка настолько сходны, что их долгое время принимали за один вид, а красная куропатка отличается главным образом преобладающими на спинной стороне красноватыми тонами окраски и несколько более широкой черной шейной полосой, которая распадается в нижней части на отчетливые пестрины. Эти признаки хорошо заметны только тогда, когда куропатка находится в руках исследователя или спокойно стоит вблизи. Если испуганная птица улетает или стремительно убегает (горные куропатки зачастую предпочитают именно такой способ бегства), распознать вид почти невозможно. Похоже, удобного случая наблюдать куропатку

вблизи у лейтенанта Ирби не было. О встречах или о добыче птиц других видов он писал намного подробнее, обычно с указанием места и даты. Да и Блэкстон впоследствии оговорился, что в списке птиц Крыма Ирби включил ряд видов, окончательно не удостоверенных, которых только видели (а может быть, только слышали, например, от того же Блэкстона?). Кроме того, красная куропатка, еще в XVIII в. завезенная в Англию в качестве охотничьей дичи, широко распространилась там и, конечно же, в отличие от других видов горных куропаток, была очень хорошо знакома английским охотникам. О том, что это обстоятельство могло повлиять на решение британского офицера о видовой принадлежности красноногих куропаток, которых встречали в районе Севастополя во время Крымской войны, впоследствии писали отечественные ученые. Но события развивались по-другому.

Почти через 30 лет после окончания Крымской войны, в 1888—1890 гг., фауну Крыма изучал известный зоолог А.М.Никольский, опубликовавший по материалам своих исследований капитальную монографию «Позвоночные животные Крыма» [3]. Зная из ста-

тей британских офицеров о встречах в Крыму красной куропатки и почему-то будучи уверенным, что оба они сами наблюдали ее, он был заранее настроен на поиски именно этого вида. Правда, самому Никольскому встретить горных куропаток в Крыму не довелось, но он слышал об их существовании в горах от местных охотников. Однако Никольский широко пользовался научными дневниками другого известного зоолога — своего учителя, профессора К.Ф.Кесслера. Он начал изучать фауну Крыма раньше — в 1879—1880 гг., но умер, так и не успев завершить исследований. В дневниках Кесслера были собраны опросные сведения о встречах каких-то красноногих куропаток в горной местности недалеко от Симферополя. Была также запись о том, что таких птиц встречали где-то по дороге из Симферополя в Севастополь. Судя по описаниям, они как будто бы походили на красных куропаток. Эта куропатка, в отличие от обыкновенной серой, тоже обитающей в Крыму, даже получила от местных русских охотников собственное название — «каменка». По-видимому, как это присуще горным куропаткам, птицы предпочитали голые каменистые места, за что и были так названы. Кес-

слер предпринял попытку добыть загадочных птиц и для этого посетил одно из мест, где, по рассказам охотников, водились красные куропатки, но там их не нашел, а смог только поговорить с местным жителем. Он-то и подтвердил, что куропаток с красными ногами раньше здесь встречали. Никольский, естественно, понимал, что красная куропатка не могла исходно обитать в Крыму по зоогеографическим причинам. Но почему-то даже не предположил, что здесь мог быть какой-нибудь другой вид горных куропаток. Поэтому, находясь под гипнозом существования в Крыму именно красной куропатки, Никольский принял малоубедительную версию появления здесь этого вида, основанную на истории, услышанной им от ботаника А.Х.Стевена. А Стевену рассказывал его покойный отец, князь М.С.Воронцов (генерал-губернатор Новороссии) будто бы пытался развести в своих крымских имениях охотничью дичь: ланей, фазанов и красных куропаток. Эти воспоминания позволили Никольскому сделать заключение, что все горные куропатки, которых встречали в Крыму, были потомками красных куропаток, выпущенных когда-то князем Воронцовым в своих имениях (от себя замечу, что места, откуда поступали сообщения о встречах красноногих куропаток, находились очень и очень далеко от имений князя). Хотя ни одна из этих неуловимых куропаток так и не попала в руки ученых, не подтвержденное ни одним фактом предположение, будто бы в Крыму жили красные куропатки, некогда разведенные здесь князем Воронцовым, попало во многие сводки и не оставлено до сих пор.

Но вот в 1898 г. в Зоологический музей Императорской академии наук в Петербурге поступила плохо сохранившаяся шкурка одной из трех красноногих куропаток, убитых охотником, который встретил

стаю из 10—15 этих птиц на южном склоне Крымских гор — у подножья перевала Байдарские ворота. Так крымская горная куропатка впервые попала в руки ученых. Образец был тщательно изучен известным зоологом А.П.Семеновым (сыном знаменитого географа и путешественника П.П.Семенова-Тян-Шанского), а видовое определение было проверено выдающимся орнитологом профессором (впоследствии академиком) М.А.Мензбиром. Выяснилось, что эта птица была не красной куропаткой, а кекликом. Его обитание на Крымском п-ове было вполне логично, так как именно этот вид распространен в ближайших к Крыму регионах: на Кавказе, в Малой Азии и юго-восточной части Балканского п-ова. Это открытие дало возможность Семенову высказать ряд важных соображений о былых зоогеографических связях Крыма с соседними территориями и о происхождении фауны Крыма [4]. Однако драматическая история с горными куропатками в Крыму на этом не завершилась. В 1930 г. некто В.А.Кизе-рицкий опубликовал в авторитетном академическом издании — «Ежегоднике Зоологического музея Академии наук СССР» — небольшое сообщение, где в очередной раз была подвергнута сомнению аборигенность крымской красноногой куропатки, на этот раз уже кеклика [5]. И вновь, как в случае с «красными куропатками князя Воронцова», это сообщение было основано на пересказе давних воспоминаний. Их Кизе-рицкий записал со слов контр-адмирала И.Н.Псиола (к повышенной причастности военных к истории крымских горных куропаток уже начинаешь привыкать) в 1920 г. — через 25 лет после описываемых событий. Контр-адмирал сообщил, что Севастопольское общество любителей правильной охоты завезло в 1894 или 1895 г. несколько пар горных куропаток из Греции. Три пары этих птиц бы-

ли выпущены у лесного кордона в 18 км по дороге к северо-востоку от Севастополя. Вначале они держались на месте выпуска, но затем исчезли: по предположению, их уничтожили хищники. Однако в том же году или через два года в 10 км отсюда местный охотник якобы встретил одного или двух гибридов кеклика и серой куропатки, которые держались в стае последней. Еще через несколько лет в таких же стаях будто бы видели подобных птиц, но с менее выраженными гибридными чертами. Как ни странно, эта крайне сомнительная история (например, кеклики не скрещиваются с серыми куропатками в естественных условиях) была благо-склонно воспринята: версия об очередном завозе горных куропаток в Крым, на этот раз кекликов из Греции*, попала в последнюю обобщающую монографию о птицах Крыма [6], а оттуда и в другие издания.

Тем временем сведения о встречах красноногих куропаток в Крыму продолжали поступать. В начале 1900-х годов появилось сообщение зоолога Л.А.Молчанова, полученное от местного охотника, который якобы видел стаю горных куропаток в предгорьях — на каменистых берегах р.Бельбек [7]. Курьезно, но последних, очевидно, местных кекликов в Крыму (до начала их массовой интродукции, о чем позже) опять наблюдал военный. Немецкий солдат Х.Крациг, попавший в Крым во время Второй мировой войны в составе оккупационных войск, проводил орнитологические исследования в предгорьях между

* Следует сказать, что в Греции распространен вовсе не кеклик, а другой вид горных куропаток — каменная куропатка. В современной Греции кеклики встречаются только в ее крайней северо-восточной оконечности и на некоторых островах Эгейского моря, но в конце XIX в., когда происходили описываемые события, эти территории в состав Греции еще не входили, а принадлежали Османской империи.

Севастополем и Бахчисараем. Еще до освобождения Крыма советскими войсками Крациг успел опубликовать обширную статью об орнитофауне исследованного им района в одном из старейших немецких орнитологических журналов «Journal für Ornithologie» [8], где описал свои наблюдения за парой кекликов в марте 1942 г. Примечательно, что эта последняя встреча произошла в той же местности, где и предыдущая — в каменистой долине у р.Бельбек в предгорьях. После окончания войны ситуация с горными куропатками в Крыму кардинально изменилась. Начиная с 1947 г. на протяжении 30 лет в разные места горного Крыма завозили большие партии кекликов из Средней Азии и с Кавказа. Делалось это с целью обогащения охотничьей фауны. Птицы размножились и к настоящему времени заселили подходящие для них биотопы по всему горному Крыму — от Севастополя до Феодосии. Популяция местных птиц, вероятно, полностью растворилась в массе пришельцев.

Как видно из сказанного, история изучения красноногих куропаток в Крыму длилась на протяжении более чем полутора веков. И за это время неоднократно менялись представления о видовой принадлежности и происхождении птиц. А ведь за весь этот период горная куропатка из Крыма попала в руки орнитологов только однажды. Поразительно, но ученые, профессионально изучавшие орнитофауну Крыма, охотнее доверяли сомнительным сообщениям непрофессионалов, чем данным своих коллег. Так существовала ли в Крыму местная популяция кекликов? Корректно на этот вопрос можно было бы ответить, отыскав доказательства пребывания птиц на полуострове до XIX в. На протяжении этого века могли происходить, хотя и сомнительные, но все же возможные события, приводившие к появлению и исчезновению в Крыму завози-

мых отовсюду разных видов горных куропаток.

Переместимся по шкале времени на три с половиной века назад. Турецкий путешественник Э.Челеби, исследуя в 1666—1667 гг. Крымский п-ов, в своей многотомной «Книге путешествий» («Сейхатнаме») оставил подробное и точное для того времени описание мест, расположенных в районе будущего Севастополя. Перечисляя птиц (естественно, речь шла об охотничьей дичи), которые водятся в горах вокруг крепости Инкерман (ее развалины и сейчас можно увидеть у Инкермана — города-спутника Севастополя), Челеби первыми назвал рябчика и куропатку [9, 10]*. Конечно, представить, что в те времена в Крыму водились рябчики, просто невозможно. Настоящие рябчики обитают в северном лесном поясе Европы и Азии, а также в горных лесах Центральной Европы. Эти птицы никогда не жили и не могли жить в Крыму, да и вряд ли у них было тогда собственное турецкое название. Понятно, что речь явно шла о какой-то другой птице. Но какой? Пришлось разбираться в турецких названиях птиц. Оказалось, по-турецки не только собственно кеклик, но и любые другие куропатки называются кекликами, подобно тому, как в русском куропатка — собирательное название для разных видов куриных птиц средних размеров. Турецко-русские словари предлагают перевод слова «кеклик» (*keklik* — в современном турецком написании) только как «куропатка» (без прилагательного). А для перевода названия птицы «чиль» (*çil*) приводятся два варианта: «серая куропатка» и «рябчик» (интерес-

* Книга путешествий Челеби написана на старотурецком (османском) языке арабскими буквами и неоднократно переписывалась впоследствии — сохранилось несколько списков этого сочинения. Существует множество переводов книги на разные языки, я использовал последние русские переводы [9, 10].

но, что в качестве прилагательного это слово имеет также значения — «серый» и «рябой»). Естественно, что русские переводчики текстов Челеби слово «кеклик» однозначно переводили, не располагая другими вариантами, как «куропатка». Но, чтобы избежать тавтологии, при переводе слова «чиль» вместо его первого правильного значения «серая куропатка» вынужденно выбирали второе, явно искусственное — «рябчик»**. Таким образом, Челеби, повествуя о пернатой дичи, которая водится в горах, окружающих крепость Инкерман, несомненно упоминал кеклика и серую куропатку, которых «трудности перевода» превратили одного просто в куропатку, другую — в загадочного рябчика***. Приходится признать, что по крайней мере за два столетия до того как британские офицеры сообщили о встречах горных куропаток вблизи Севастополя, об их обитании в этом районе уже знал Челеби.

Но это еще далеко не все. В 1889 г. при раскопках древнего Херсонеса Таврического в Севастополе был открыт христианский архитектурный комплекс византийского времени. Он состоял из двух базилик — одна построена на фундаменте другой, более древней. Взору археологов предстали удивительные напольные мозаики, на которых реалистично изображены различные птицы. По оценкам специалистов, эти мо-

** Тюркоязычные народы Средней Азии в тех местах, где куропаток нет, чилем называют другой вид — пустынную куропатку (*Ammoperdix griseogularis*). Это же название как синоним используется и в русской научной литературе. а вот по-турецки она — «кум кеклиги», т.е. песчаный кеклик.

*** Интересно, что в горах, окружающих современный Инкерман (они составляют единый массив с Мекензиевыми горами, о которых в связи с находками красноногих куропаток упоминал лейтенант Блэкстон), кеклики живут и в настоящее время [11].

заики созданы в период раннего Средневековья — в VI в. [12]. (Мозаики были отреставрированы, и сейчас часть из них доступна для осмотра посетителями музея «Древний Херсонес» в Севастополе.) Кроме изображений домашних птиц там есть многочисленные «портреты» красноногих куропаток, диких голубей и уток, дроф, цапель и др. Несмотря на некоторую схематичность мозаичных изображений птиц, их определение до вида трудностей для специалиста не представляет. По данным наших исследований, всех этих птиц в разные сезоны и сейчас можно встретить на Герacleйском п-ове, где был расположен Херсонес, или в акватории Севастопольской бухты. Важно также, что такая редкая комбинация видов сухопутных и водных птиц необычна, но очень характерна именно для этого района. Это, на мой взгляд, свидетельствует о том, что мастер (мастера?), создавший мозаики, был местным жителем и черпал вдохновение из окружающей его природы. Не исключено также, что случайно пойманных диких птиц жители Херсонеса содержали в птичниках вместе с домашними. А значит, у мастера была возможность изображать птиц «с натуры» — уж очень детально отобразены некоторые особенности окраски и строения некоторых из них. Несмотря на то что мозаики набраны довольно крупными разнородными элементами (кусочками мрамора, цветного известняка, керамики, смальты), характерные особенности кекликов воспроизведены безвестным художником с поразительной точностью. На одном из наиболее хорошо сохранившихся изображений видны красные ноги и клюв, из красного камешка глаз, который у живой птицы темный красновато-коричневый, но окружен хорошо заметным красным окологлазничным кольцом. Четко обозначены и характерные черные полосы на боку птицы, и свет-

ло-охристое, с черным окаймлением, горло. Важно, что охристый оттенок горла характерен именно для кеклика, у других европейских видов горных куропаток — каменной и красной — окраска горла белая. А ведь если бы в этом была необходимость, мастер мог бы воспроизвести и белое горло — белые камешки под рукой у него были, ими, например, выложен фон, окружающий медальон с изображением птицы. Важным может быть и то, что спинная сторона птицы выполнена буро-розоватыми камешками. Дело в том, что в разных частях огромного ареала популяции кекликов отличаются степенью интенсивности красноватой окраски спинной стороны. Из-за таких существенных особенностей окраски ученые-систематики часто рассматривают некоторые географические популяции кекликов в ранге отдельных подвидов. Ближе всего к Крыму, на Балканах, живут кеклики одного из наиболее темноокрашенных подвидов, почти такие же, но чуть более бледные птицы населяют Кавказ. Не исключено, что кеклики крымской популяции тоже могли отличаться интенсивностью темного тона, и автор мозаики отразил эту особенность. В связи с этим можно вспомнить, что для красных куропаток, о которых здесь столько говорилось, характерна темная красноватая окраска верхней стороны тела. Не этим ли внешним сходством объясняется «уверенность» лейтенанта Ирби в том, что в районе Севастополя встречались каменные куропатки именно этого вида? Таким темно-красным выглядит балканский кеклик. Так или иначе, но мозаичные изображения кекликов, найденные в Херсонесе Таврическом, свидетельствуют в пользу того, что по крайней мере 15 веков назад эти птицы уже жили на крымской земле.

И наконец, существуют доказательства намного более раннего — в эпоху каменного ве-

ка — обитания кекликов в Крыму. В 1955—1958 гг. в гроте Кара-Коба, что в 25 км на юго-восток от Севастополя, производились археологические раскопки, в результате которых было найдено большое количество костей разных животных (среди них остатки мамонта, шерстистого носорога, бизона), служивших добычей древнему человеку. Интересно наличие костных остатков некоторых северных видов (песца, белой куропатки). Они появились в Крыму только в период максимального похолодания, наступившего в конце последнего оледенения, и исчезли во время начавшегося затем потепления. Следовательно, кости накапливались в основном в холодный период (примерно 20—30 тыс. лет назад). Исследуя ископаемые остатки птиц из этого захоронения, известный орнитолог М.А.Воинственский обнаружил две косточки, которые, как он определил, принадлежали кеклику [13]. Правда, плохая сохранность костей все же заставила ученого высказать некоторое сомнение в точности определения. Тем не менее давнее обитание кекликов в Крыму недавно было подтверждено новой находкой — кость птицы этого вида обнаружена в кухонных отбросах неандертальцев, живших приблизительно 40 тыс. лет назад на краю горного плато Караби, что в восточной части Крымских гор [14].

Таким образом, кеклики несомненно жили в Крыму в период последнего оледенения: тогда на них охотились неандертальцы, а впоследствии и пришедшие им на смену люди современного типа. Очевидно, что крымские кеклики благополучно дождалась послеледникового потепления климата в голоцене, дожили до исторического времени и только недавно были поглощены более многочисленными пришельцами, завезенными извне. Теперь кеклики широко распространены в горном Крыму, их можно встретить во всех тех местах,

где их отмечали раньше, и проверить, сохранились ли где-либо представители аборигенной популяции, невозможно. Остается только надеяться, что гене-

тический материал кекликов, живших в Крыму до начала массовой интродукции сюда птиц азиатского происхождения, сохранился в генотипе популя-

ций, которые обитают здесь сейчас, а современные методы генетического анализа позволят когда-нибудь получить ответ на этот вопрос. ■

Литература

1. *Blakiston T.* Birds of the Crimea // *Zoologist*. 1857. V.5. P.5597—5604.
2. *Irby L.H.* Lists of birds observed in the Crimea // *Zoologist*. 1857. V.2. P.5353—5362.
3. *Никольский А.М.* Позвоночные животные Крыма // Записки Императорской Академии наук. 1891. LXVIII. №4. С.1—484.
4. *Семенов А.* Несколько соображений о прошлом фауны и флоры Крыма по поводу нахождения там горной куропатки (*Saccabis chukar* J.E.Gray) // Записки Императорской Академии наук. 1899. Сер.VIII. Т.VIII. №6. С.1—19.
5. *Кизерицкий В.А.* Некоторые данные о горной куропатке (*Saccabis*) в Крыму // Ежегодник Зоологического музея Академии наук СССР. 1930. Т.30. Вып.4. С.650.
6. *Костин Ю.В.* Птицы Крыма. М., 1983.
7. *Молчанов Л.А.* Список птиц Естественноисторического музея Таврического губернского земства (в г. Симферополе) // Матер. к познанию фауны и флоры Российской империи. Отд. зоолог. 1906. Вып.7. С.248—301.
8. *Kratzig H.* Beitrage zur Vogelkunde der Krim // *Journal für Ornithologie*. 1943. V.91. №2—3. S.268—285.
9. Книга путешествий Эвлии Челеби. Походы с татарами и путешествия по Крыму (1641—1667 гг.) / Перевод М.Б.Кизилова. Симферополь, 1996.
10. *Эвлия Челеби.* Книга путешествия. Крым и сопредельные области. (Извлечения из сочинения турецкого путешественника XVII века) / Перевод Е.В.Бахревского. Симферополь, 2008.
11. *Цвелых А.Н., Миронов А.Н.* О максимальной величине кладки у кеклика — *Alectoris kakelik* (Falk.) // Вестник зоологии. 1994. №1. С.58.
12. *Домбровский О.И.* Византийские мозаики Херсонеса Таврического. Poznan, 2004.
13. *Воинственский М.А.* Ископаемая орнитофауна Украины // Природная обстановка и фауны прошлого. 1967. Вып.4. С.4—76.
14. *Gavris G., Taykova S.* Aves from Karabi-Tamchin cave // *Etudes et Recherches Archeologiques de l'Universite de Liege*. 2004. V.104. P.295—297.

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь

Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы

О.О.АСТАХОВА

Л.П.БЕЛЯНОВА

Е.Е.БУШУЕВА

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

Н.В.УСПЕНСКАЯ

О.И.ШУТОВА

С.В.ЧУДОВ

Литературный редактор

Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор

Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией

И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор

Г.С.ДОРОХОВА

Перевод:

С.В.ЧУДОВ

Набор:

Е.Е.ЖУКОВА

Корректоры:

М.В.КУТКИНА

Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:

А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

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

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

Подписано в печать 20.02.2012
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать, усл. печ. л. 10,32,
усл. кр.-отт. 67,8 тыс., уч.-изд. л. 12,2
Заказ 2209
Набрано и сверстано в редакции

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