ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

6 17

ПРИРОДА

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Издается с января 1912 года

Главный редактор
академик, доктор физико-математических наук **А.Ф.Андреев**

Заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук **А.В.Бялко**

доктор биологических наук **А.С.Апт**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Арискин**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **П.И.Арсеев**, **О.О.Астахова**, доктор биологических наук **Ф.И.Атауллаханов**, член-корреспондент, доктор юридических наук **Ю.М.Батурин**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A.Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T.Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Кунин** (**E.Koonin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Леин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh.Mitalipov**, США), доктор геолого-минералогических наук **Т.К.Пинегина**, доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, кандидат географических наук **Ф.А.Романенко**, академик, доктор физико-математических наук **А.Ю.Румянцев**, член-корреспондент, доктор биологических наук **Н.И.Санжарова**, доктор физико-математических наук **Д.Д.Соколов**, кандидат физико-математических наук **К.Л.Сорокина**, кандидат исторических наук **М.Ю.Сорокина**, **Н.В.Ульянова**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепащук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибаев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Лисенок 54-го поколения селекции в эксперименте по доместикации серебристо-черной лисицы — главного исследования жизни академика Д.К.Беляева.

Фото А.Р.Калтыковой

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Барельеф на стене Института цитологии и генетики СО РАН, который академик Д.К.Беляев возглавлял более 20 лет.

Фото П.М.Бородина

См. в номере: ЭВОЛЮЦИЯ, НАПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА.
К 100-летию со дня рождения Д.К.Беляева.

«Наука»

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2017
ФГУП «Издательство «Наука», 2017
© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2017

В НОМЕРЕ:

3 **Ю.Г.Куденко**

Нейтрино — ключ к загадкам Вселенной?

В ускорительных экспериментах с длинной базой получены первые указания на существование нового источника CP-нарушения в нейтринных осцилляциях. Если данные подтвердятся, вполне вероятно, что этот феномен станет ключом к разгадке тайны барионной асимметрии Вселенной.

12 **М.И.Кузьмин, В.В.Ярмолюк**

Биография Земли: основные этапы геологической истории

На основе современных знаний о начальных стадиях формирования Солнечной системы, а также геологической истории Земли показано, как образовалась наша уникальная планета, на которой появился и живет человек.

26 **Н.Н.Клюев**

Сельское хозяйство России в «экологическом зеркале»

За последние десятилетия в структуре сельского хозяйства нашей страны произошли существенные изменения. Можем ли мы оценить их экологические последствия? Что такое эколого-ресурсный диссонанс? И в каком направлении развивается аграрная сфера российских регионов сегодня? Попробуем разобраться.

Научные сообщения

34 **С.В.Чудов**

Столбчатые базальты и конвекция Рэлея—Бенара

Р.К.Расцветаева, С.М.Аксенов

Содружество модулей: структура роймиллерита — нового минерала из Намибии (41)

Времена и люди

46 **ЭВОЛЮЦИЯ, НАПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА**

К 100-летию со дня рождения Д.К.Беляева

Вступительное слово П.М.Бородина **(46)**

А.О.Рувинский

Доместикация (49)

Д.К.Беляев

Дестабилизирующий отбор как фактор изменчивости при доместикации животных (63)

Р.В.Кожемякина

Приручение серой крысы (70)

Возрождение поруганной науки
Фрагменты из книги воспоминаний об академике Д.К.Беляеве **(79)**

«Я верю в добрые начала человека...»
Интервью с Д.К.Беляевым **(86)**

88 **Новости науки**

Как обезопасить население от воздействия ^{14}C? **Р.М.Алексахин, Е.В.Спирин, В.М.Соломатин** (**88**). Новый экологически чистый способ производства олигосахаридов. **Т.М.Васильева** (**89**). Древняя карбонатитовая провинция на Алданском щите. **И.Р.Прокопьев** (**90**). Желтые алмазы из северных регионов Якутии. **Д.А.Зедгенизов** (**91**).

Рецензии

93 **В.Н.Комаров**

Геология Северной Евразии
(на кн.: В.Б.Караулов. Введение в региональную геологию России и ближнего зарубежья)

95 **Новые книги**

CONTENTS:

3 **Yu.G.Kudenko**

Is Neutrino a Clue to the Mysteries of the Universe?

First indications of the existence of a new source of CP violation in neutrino oscillations were obtained in accelerator long-baseline neutrino experiments. This new source of CP violation, if confirmed, can be a key to the mystery of baryon asymmetry of the Universe.

12 **M.I.Kuzmin, V.V.Yarmolyuk**

The Biography of Earth: Milestones in Geological History

On the basis of modern knowledge about the initial stages of Solar System formation and geological history of the Earth it is shown how our unique planet formed, where humans emerged and live.

26 **N.N.Kluev**

Russian Agriculture in «Ecological Mirror»

Significant changes in the structure of agriculture took place in our country during the last decades. Can we evaluate their ecological consequences? What is the ecological and resource discord? And in which direction does agrarian sphere of Russian regions evolve today? Let's try to find out.

Scientific Communications

34 **S.V.Chudov**

Columnar Basalts and Rayleigh–Benard Convection

R.K.Rastsvetaeva, S.M.Aksenov

Cooperation of Modules: the Structure of Roymillerite – New Mineral from Namibia (41)

Times and People

46 **EVOLUTION GUIDED BY HUMAN WILL**

To the 100th Birth Anniversary of D.K.Belyaev

Opening Remarks of P.M.Borodin **(46)**

A.O.Ruvinsky

Domestication (49)

D.K.Belyaev

Destabilizing Selection as a Variability Factor in Animal Domestication (63)

R.V.Kozhemyakina

Taming of the Norway Rat (70)

The Revival of Desecrated Science

Fragments from the Memoirs about the Academician D.K.Belyaev **(79)**

«I Believe in Human Pure Principles...»

Interview with D.K.Belyaev **(86)**

88 **Science News**

How to Safeguard the Population from ^{14}C Impact? **R.M.Aleksakhin, E.V.Spirin, V.M.Solomatin** (**88**). New Ecologically Harmless Method of Oligosaccharide Synthesis. **T.M.Vasilieva** (**89**). Ancient Carbonatite Province on the Aldan Shield. **I.R.Prokopyev** (**90**). Yellow Diamonds from the Northern Regions of Yakutia. **D.A.Zedgenizov** (**91**).

Book Reviews

93 **V.N.Komarov**

Geology of the Northern Eurasia

(V.B.Karaulov. Introduction to Regional Geology of Russia and the Near Abroad)

95 **New Books**

Нейтрино — ключ к загадкам Вселенной?

Ю.Г.Куденко

Юрий Григорьевич Куденко, *профессор, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики высоких энергий Института ядерных исследований РАН. Область научных интересов — физика элементарных частиц, нейтринная физика.*

Ключевые слова: нейтринные осцилляции, эксперименты с длинной базой, смешивание кварков и нейтрино, массы нейтрино, CP-нарушение, барионная асимметрия Вселенной.
Key words: neutrino oscillations, long baseline experiments, quark and neutrino mixing, neutrino masses, CP violation, baryon asymmetry of the Universe.

Крошечная нейтральная частица из класса лептонов — нейтрино — самая загадочная из всех элементарных частиц. Нейтринная физика за свою еще довольно короткую историю (началу которой положила гипотеза В.Паули в 1930 г.) уже неоднократно опровергала устоявшиеся принципы и базовые понятия микромира. Последним ярким результатом стало открытие осцилляций нейтрино, означающее, что нейтрино различных поколений (ароматов) смешиваются. Осцилляции нейтрино невозможны в Стандартной модели физики элементарных частиц, которая постулирует, что существуют три поколения безмассовых активных (участвующих в слабых взаимодействиях) нейтрино: электронное ν_e, мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ. Распространяясь со скоростью света, они не могут менять свой аромат, т.е. не смешиваются. Каждому поколению-аромату нейтрино соответствует свое антинейтрино. Наличие осцилляций, заключающееся в периодическом переходе активного нейтрино одного типа в частицу другого типа, означает, что массы покоя нейтрино не равны нулю, хотя и очень малы, а каждая частица (электронное, мюонное и тау-нейтрино) — линейная комбинация трех массовых состояний. Идея о возможности смены нейтрино своего типа, выдвинутая Б.М.Понтекорво в 1957 г. [1, 2], была экспериментально подтверждена в экспериментах с солнечными, атмосферными, реакторными и ускорительными нейтрино, а работы, в которых были открыты осцилляции солнечных и атмосферных нейтрино, удостоились Нобелевской премии в 2015 г. [3, 4]. Об истории этих исследований, как обычно, можно было прочитать в свое время и в «Природе»*. Здесь же пойдет речь о новых экспериментальных результатах, полученных в ускорительных нейтринных экспериментах, которые могут приблизить нас к разгадкам тайн возникновения и существования Вселенной.

© Куденко Ю.Г., 2017

Смешивание кварков и нейтрино

Нельзя сказать, что Стандартная модель совсем не приемлет смешивания частиц — оно предусмотрено там для кварков, «кирпичиков», из которых сложены адроны. Математическим образом такого сме-

* *Герштейн С.С., Куденко Ю.Г.* Лауреаты Нобелевской премии по физике 2015 года — А.Макдональд, Т.Каджита // Природа. 2016. Т.1. С.59–65.

шивания состояний служит матрица Кабиббо—Кобаяши—Маскава (Cabibbo—Kobayashi—Maskawa, или СКМ), элементы которой — это коэффициенты для соответствующих линейных комбинаций. В свое время было показано, что нарушение CP-четности* в слабых процессах с участием кварков может быть объяснено наличием в СКМ-матрице комплексной фазы. Как в 1973 г. доказали М.Кобаяши и К.Маскава, для появления комплексной фазы необходимо существование трех поколений кварков.

Таким образом, ответственность за нарушение CP-симметрии Стандартная модель возлагает на CP-нечетную фазу $\delta_{СКМ}$, величина которой ~70°. Матрица СКМ является диагональной и имеет следующий вид**:

$$V_{СКМ} \sim \begin{pmatrix} 0.98 & 0.2 & 0.004 \\ 0.2 & 0.98 & 0.04 \\ 0.007 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Напомним, что подобные линейные конструкции можно составлять лишь из частиц, имеющих массу. Поскольку в Стандартной модели нейтрино — частицы безмассовые, их смешивание невозможно, и соответствующей матрицы в принципе нет. Но после экспериментального наблюдения осцилляций нейтрино стало ясно, что без нее не обойтись, и пришлось выйти за пределы Стандартной модели. Такая матрица для нейтрино носит имя Понтекорво—Маки—Накагава—Саката (Pontecorvo—Maki—Nakagawa—Sakata, или PMNS). Смешивание трех типов активных нейтрино ν_e, ν_μ и ν_τ, а также их антинейтрино, которым отвечают массовые состояния ν_1 (с массой m_1), ν_2 (m_2) и ν_3 (m_3), соответственно, характеризуется следующими параметрами***: разностью квадратов масс $\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2$ и $\Delta m_{23}^2 = m_3^2 - m_2^2$, тремя углами смешивания, а также потенциально возможной CP-нечетной фазой δ_{CP}, которая характеризовала бы нарушение комбинированной зарядово-пространственной четности в лептонном секторе, если таковое существует. Угол θ_{12} описывает смешивание между первым и вторым массовыми состояниями, угол θ_{23} характеризует смешивание между массовыми состояниями 2 и 3, и угол θ_{13} определяет смешивание между массовыми состояниями 1 и 3.

Из изучения осцилляций нейтрино вытекает фундаментальный результат, что все три угла матрицы PMNS [6]

$$V_{PMNS} \sim \begin{pmatrix} 0.85 & 0.54 & 0.16 \\ 0.33 & 0.62 & 0.72 \\ 0.40 & 0.59 & 0.70 \end{pmatrix} \quad (2)$$

не равны нулю и близки по величине, в отличие от СКМ-матрицы, описывающей смешивание кварков (для СКМ-матрицы значения синусов углов смешивания имеют величины: $\sin\theta_{12} \approx 0.22$, $\sin\theta_{23} \approx 0.041$, $\sin\theta_{13} \approx 0.0037$, т.е. $\sin\theta_{13} << \sin\theta_{23} << \sin\theta_{12} << 1$, в случае PMNS-матрицы ее элементы $\sin\theta_{12} \approx 0.57$, $\sin\theta_{23} \approx$ ≈ 0.71, $\sin\theta_{13} \approx 0.16$ — величины одного порядка). Матрица PMNS, как и матрица СКМ, имеет структуру 3×3 и тоже может включать в себя комплексные элементы (упомянутую выше фазу), т.е. CP-четность может нарушаться и в лептонном секторе, как и кварковом. Параметр Ярлског J [7], характеризующий CP-нарушение в Стандартной модели, здесь имеет следующий вид:

$$J_{CP}^{PMNS} = \cos\theta_{12}\sin\theta_{12}\cos^2\theta_{13}\sin\theta_{13}\cos\theta_{23}\sin\theta_{23}\sin\delta_{CP}. \quad (3)$$

Так как все три угла смешивания отличны от нуля, как и в кварковом секторе, то $J_{CP}^{PMNS} \neq 0$, если $\delta_{CP} \neq 0$, но в первом случае $J_{CP}^{PMNS} = 0.035\sin\delta_{CP}$, а во втором — $J_{CP}^{СКМ} \sim 3\cdot10^{-5}$. Учитывая, что параметры смешивания нейтрино довольно велики, CP-нарушение в лептонном секторе может быть довольно большим. Таким образом, исследование нейтринных осцилляций способно привести к открытию нового источника нарушения CP-симметрии. Почему это очень важно и привлекает к себе большое внимание?

Барионная асимметрия Вселенной

Согласно общепринятой среди космологов точке зрения, современная Вселенная возникла в результате Большого взрыва, во время которого частицы, античастицы и фотоны рождались в одинаковом количестве. Однако в сегодняшней Вселенной антивещество отсутствует: есть барионы (протоны и нейтроны), но нет антибарионов, что стало следствием мизерного преобладания первых над вторыми на ранней стадии:

$$\frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_B + N_{\bar{B}}} \approx 10^{-10}, \quad (4)$$

а отношение числа барионов к числу фотонов реликтового излучения составляет величину

$$\eta = \frac{N_B}{N_\gamma} \sim 6\cdot10^{-10}. \quad (5)$$

Иначе говоря, на каждый барион приходится примерно $2\cdot10^9$ фотонов с энергией $\sim3\cdot10^{-4}$ эВ (температура 2.7 К). Почему в процессе эволюции «выжило» немного вещества (барионы) и исчезло антивещество (антибарионы)? Что послужило источником барионной асимметрии в ранней Вселенной,

* CP-симметрия, или CP-четность, — это произведение (комбинация) — двух дискретных симметрий: зарядового сопряжения C, превращающего частицу в ее античастицу, и пространственной четности P, которая меняет знак координат частицы на противоположный, или, другими словами, переводит частицу в зеркальный мир.

** Здесь приведены абсолютные значения матричных элементов, фаза $\delta_{СКМ}$ не влияет на эти величины, ее вклад чрезвычайно мал. Матрица практически диагональна (два различных наименьших элемента измерены с не очень хорошей точностью).

*** Подробнее об этом см.: *Куденко Ю.Г.* Нейтринная физика: год угла смешивания θ_{13} // Природа. 2012. №11. С.3–13.

которая заключалась в том, что на 10 млрд пар кварк—антикварк приходился один лишний кварк, как видно из выражения (4). Это одна из фундаментальных проблем, решение которой пока не найдено. Найти ответ в рамках Стандартной модели не удается: имеющегося CP-нарушения в кварковом секторе недостаточно, его учет дает для отношения η величину ~10^{-20}, что на 10(!) порядков меньше наблюдаемой (5). (Это связано с малостью масс кварков по сравнению с характерным масштабом шкалы электрослабого взаимодействия 100 ГэВ.) Вполне вероятно, что загадка барионной асимметрии может быть разгадана с помощью нейтрино, если в нейтринных осцилляциях будет обнаружено CP-нарушение. Ниже кратко рассмотрим, какие для этой надежды есть основания.

Малую массу нейтрино не удается получить через механизм Хиггса в Стандартной модели; для преодоления этой проблемы, очевидно, требуется расширение модели и привлечение других механизмов, а возможно, и новых частиц. Следует отметить, что все заряженные фермионы (частицы со спином $^1/_2$) являются так называемыми дираковскими частицами, для которых частица не тождественна античастице. Нейтрино (тоже фермионы, спин $^1/_2$, но нейтральные, электрический заряд равен 0), могут быть дираковскими или майорановскими частицами. Во втором случае нейтрино = антинейтрино, и отличие между ними состоит только в значении проекции спина на направление импульса, которое называется спиральностью. Спиральность нейтрино равна –1 (направление спина противоположно направлению импульса), а спиральность антинейтрино равна +1 (оба направления совпадают). Безмассовые нейтрино имеет только левую спиральность (–1), а антинейтрино — только правую (+1). Для безмассовых нейтрино спиральность во всех процессах строго сохраняется. Массивные нейтрино могут иметь как левую, так и правую спиральность (вероятность того, что нейтрино с массой m и энергией E имеет не левую, а правую спиральность, пропорциональна отношению массы к энергии).

Один из наиболее интересных подходов объяснения малой массы нейтрино — модель качелей (see-saw), которая предлагает расширение Стандартной модели за счет добавления тяжелых (с массами до 10^{15} ГэВ) майорановских нейтрино, обладающих правой спиральностью. Кроме объяснения малости масс нейтрино, в этой модели возникает простое и элегантное объяснение барионной асимметрии через механизм лептогенезиса [8], в котором предполагается, что CP-нечетные распады тяжелых нейтрино могут быть источником лептонной асимметрии в ранней Вселенной. Лептонная асимметрия затем частично превращается в барионную с нарушением суммарного (барионного + лептонного) числа. Хотя в настоящее время доминирует представление, что прямой связи между возможным CP-нарушением при низких энергиях в нейтринных осцилляциях и CP-асимметрией в распадах тяжелых нейтрино в ранней Вселенной нет, в ряде теоретических моделей все же предлагаются механизмы, в которых устанавливаются связи между этими асимметриями. Здесь следует еще раз отметить, что нейтринная физика — необычайно интересная область, в которой общепринятые представления и теоретические модели неоднократно пересматривались благодаря неожиданным экспериментальным результатам.

Осцилляции ускорительных и реакторных нейтрино

Рассмотрим несколько выражений, описывающих осцилляции ускорительных и реакторных нейтрино. Выражение для вероятности переходов мюонных нейтрино в электронные $\nu_\mu \to \nu_e$ в случае трех типов частиц и их распространения в среде выглядит следующим образом:

$$P(\nu_\mu \to \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13}\cos^2\theta_{23}\sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2_{13}L}{E}\right) -$$

$$-\frac{\sin 2\theta_{12}\sin 2\theta_{23}}{2\sin\theta_{13}}\sin\left(\frac{1.27\Delta m^2_{12}L}{E}\right)\sin^2 2\theta_{13}\sin\left(\frac{1.27\Delta m^2_{13}L}{E}\right)\sin\delta_{CP} +$$

$$+ \text{(CP-even term, solar term, matter term)}, \qquad (6)$$

где L — расстояние (км), которое пролетает нейтрино от источника до детектора, E — энергия нейтрино (ГэВ). Некоторые члены выражения (6) в явном виде не приведены: CP-even term обозначает вклад CP-четного члена в вероятность перехода, solar term — вклад осцилляций с параметрами, характерными для осцилляций солнечных нейтрино, а matter term отражает эффект прохождения нейтрино через вещество, например Землю. Для вероятности осцилляций мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино второй член выражения (6) меняет знак. Кроме того, при переходе от мюонных нейтрино к мюонным антинейтрино меняет знак и вклад в вероятность осцилляций от эффекта прохождения через вещество — таким образом, он имитирует эффект CP-нарушения (напомним, что последний возникает, когда $\sin\theta_{CP} \neq 0$). Из выражения (6) следует, что доминирующим вкладом в вероятность осцилляции оказывается член, пропорциональный $\sin^2 2\theta_{13}$ (первая строка); заметный вклад также дает CP-нечетный член, который меняет знак с «–» на «+» при переходе от нейтрино к антинейтрино. Величина угла θ_{13}, которую можно извлечь из измерения вероятности (6), зависит от значения δ_{CP}, а также от того, какая иерархия масс нейтрино реализуется в природе: нормальная ($m_3 > m_2$) или инверсная ($m_3 < m_2$). Первое указание на нену-

левое значение угла θ_{13} было получено в ускорительном эксперименте с длинной базой T2K [9, 10] в 2011 г.

Выражение для вероятности осцилляций реакторных антинейтрино (исчезновение антинейтрино) выглядит следующим образом (эта вероятность равна суммарной вероятности осцилляций электронных антинейтрино в мюонные и тау-антинейтрино, которые не регистрируются в реакторных экспериментах из-за малой энергии антинейтрино):

$$P(\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e) = 1 - \cos^4\theta_{13}\sin^2 2\theta_{12}\sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2_{12}L}{E}\right) -$$

$$- \sin^2 2\theta_{13}\left(\cos^2\theta_{12}\sin\left(\frac{1.27\Delta m^2_{13}L}{E}\right) + \sin^2\theta_{12}\sin^2\left(\frac{1.27\Delta m^2_{23}L}{E}\right)\right), \quad (7)$$

где L — расстояние в метрах, которое пролетает нейтрино от источника до детектора, а E — энергия нейтрино (МэВ). Измерение вероятности перехода $\bar{\nu}_e \to \bar{\nu}_e$, которая в отличие от выражения (6) не зависит от фазы δ_{CP} (отсутствует множитель $\sin\theta_{CP}$), позволяет определить значение угла θ_{13} с высокой точностью в реакторных экспериментах с пролетной базой около 1.5 км. При анализе данных, накопленных в течение нескольких лет набора статистики в реакторных экспериментах Daya Bay, RENO и Double Chooz, была получена величина $\sin^2 2\theta_{13} = 0.0841 \pm 0.0027$(стат) $\pm$ 0.0019 (сист) [11–13].

CP-нарушение в лептонном секторе, если таковое существует, должно проявиться в осцилляционных экспериментах в виде разности между вероятностями осцилляций мюонных нейтрино в электронные нейтрино и мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино, это следует из наличия CP-нечетного (второго) члена в выражении (6). Например, для случая осцилляций в вакууме асимметрия

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_\mu \to \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \to \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e)} \cong \frac{\Delta m^2_{12}L}{4E}\,\frac{\sin 2\theta_{12}}{\sin\theta_{13}}\sin\delta_{CP} \quad (8)$$

должна иметь ненулевое значение. Другой способ поиска CP-нарушения — измерение с широким пучком мюонных нейтрино (антинейтрино) их осцилляций в электронные нейтрино (антинейтрино) в первом и втором осцилляционных максимумах. Сравнение формы спектров электронных нейтрино, интенсивности и положения этих осцилляционных максимумов позволяет измерить фазу δ_{CP} даже с одним пучком нейтрино, если иерархия масс известна. Еще один метод — сравнение двух значений величины $\sin^2\theta_{13}$: полученного в реакторных экспериментах и определенного в ускорительных экспериментах из вероятности осцилляций мюонных нейтрино в электронные, величина которой зависит от фазы δ_{CP}, как показано в выражении (6).

Поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях

Эксперимент T2K

Первый прямой поиск нарушения CP-симметрии в нейтринных осцилляциях был проведен в эксперименте T2K (Япония), схема которого показана на рис.1. В эксперименте используется чистый квазимоноэнергетичный пучок мюонных нейтрино (антинейтрино), полученный на протонном ускорителе J-PARC. Пионы, рожденные при взаимодействии протонов с мишенью, распадаются на мюоны и мюонные нейтрино в тоннеле длиной 96 м. Направление внеосевого (off-axis) пучка нейтрино составляет угол 2.5° с направлением протонного пучка. Параметры нейтринного пучка до возможных осцилляций измеряются с помощью ближнего нейтринного детектора ND280 (рис.2), расположенного на расстоянии 280 м от пионорождающей мишени. Вероятность перехода мюонных нейтрино с энергией E в электронные при прохождении расстояния L описывается выражением (6). Энергия нейтрино и пролетная база в эксперименте T2K выбраны так, чтобы получить максимальную чувствительность к осцилляциям $\nu_\mu \to \nu_e$ в области осцилляций атмосферных нейтрино, т.е. для разности квадратов масс $\Delta m^2_{23} \approx 2.4 \cdot 10^{-3}$ эВ^2. Комплекс ближних нейтринных детекторов, расположенный на расстоянии 280 м от пионорождающей мишени, измеряет направление, спектр и состав нейтринного пучка до возможных осцилляций. Пролетная база эксперимента составляет 295 км. В качестве дальнего детектора используется черенковский детектор SuperKamiokande. Размер, направление и форма черенковского конуса от заряженной частицы (мюона или электрона), возникшей в результате взаимодействия нейтрино в детекторе, позволяет идентифицировать тип зарегистрированного нейтрино (мюонное или электронное), измерять энергию и направление мюона или электрона и в конечном итоге восстанавливать энергию нейтрино.

Набор данных с пучками нейтрино и антинейтрино в соотношении 50%:50% проводился с 2010 по 2016 г. Всего в детекторе SuperKamiokande было зарегистрировано 32 электронных нейтрино и 4 электронных антинейтрино [14]. Доверительные интервалы для значений $\sin^2\theta_{13}$ и δ_{CP}, полученные в результате анализа накопленных данных, показаны на рис.3. Анализ выполнен для двух возможных иерархий масс нейтрино: нормальной и инверсной. Как видно их этого рисунка, в обоих случаях наиболее вероятным значением CP-нечетной фазы оказывается $\delta_{CP} \approx -\pi/2$.

Используя величину $\sin^2\theta_{13}$, найденную в реакторных экспериментах, в качестве дополни-

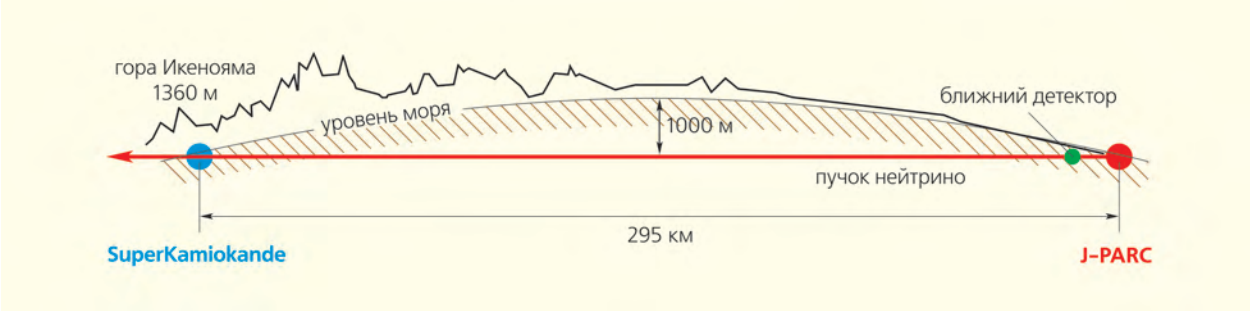
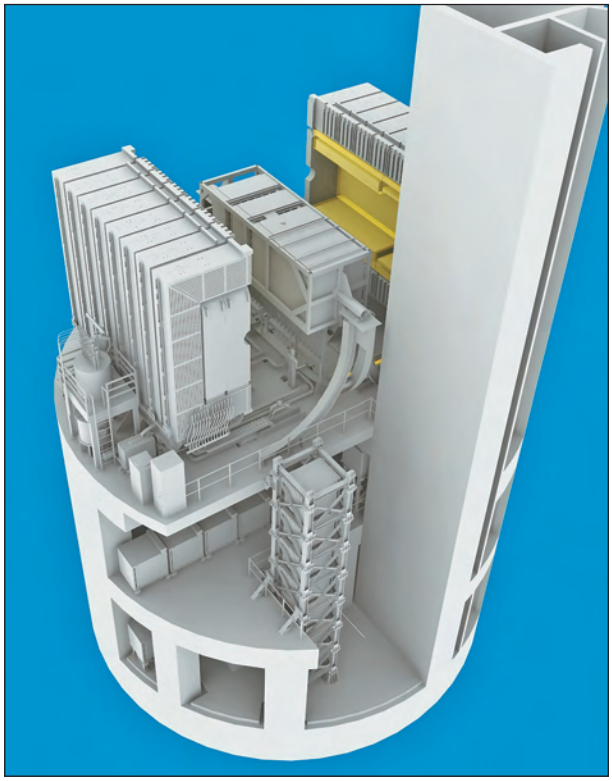


Рис.1. Схема эксперимента T2K [9]. Нейтрино (антинейтрино), рожденные на протонном ускорителе J-PARC, пролетают сквозь Землю расстояние 295 км и регистрируется в черенковском детекторе SuperKamiokande.



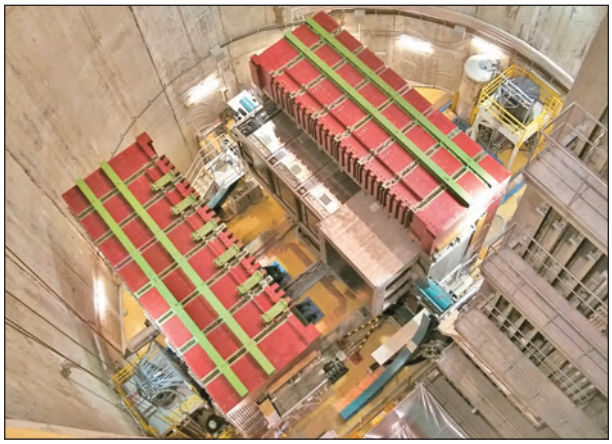


Рис.2. Ближний нейтринный детектор эксперимента T2K: модель (вверху) и фотография с открытым магнитом.

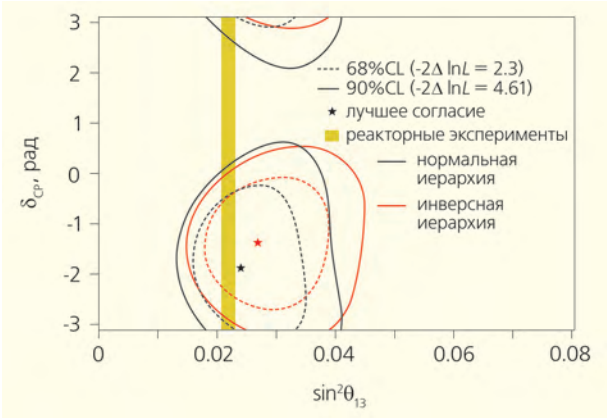


Рис.3. Области значений $\sin^2\theta_{13}$ и δ_{CP} ,полученные в эксперименте T2K при измерениях вероятностей осцилляций мюонного нейтрино (в электронное нейтрино) и мюонного антинейтрино (в электронное антинейтрино). Пунктирная кривая показывает интервал параметров, соответствующий доверительному интервалу (CL) 68%, сплошная кривая соответствует 90% CL. Показаны результаты для нормальной и инверсной иерархии масс. Сплошная вертикальная полоса показывает $\pm 1\sigma$ интервал значений $\sin^2\theta_{13}$, измеренных в реакторных экспериментах.

тельного ограничения на угол θ_{13}, можно получить более узкие доверительные интервалы для δ_{CP}. В этом случае данные также наилучшим образом подгоняются для значения фазы около $-\pi/2$ и случая нормальной иерархии масс, как следует из рис.4. Наилучшим образом экспериментальные данные описываются для величины $\delta_{CP} = -1.791$ рад ($\approx -\pi/2$), для которой $-2\Delta\ln L = 0$ (здесь Δ — разность логарифмов функции правдоподобия), что соответствует максимуму функции правдоподобия и нормальной иерархии масс нейтрино. Этот результат указывает на максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях, или, другими словами, на максимальное CP-нарушение в лептонном секторе Стандартной модели. Исключительно важно, что гипотеза CP-сохранения ($\delta_{CP} = 0$ или π) исключена на уровне 90% доверительной вероятности, а величина $\delta_{CP} = 0$ исключена на уровне бо-

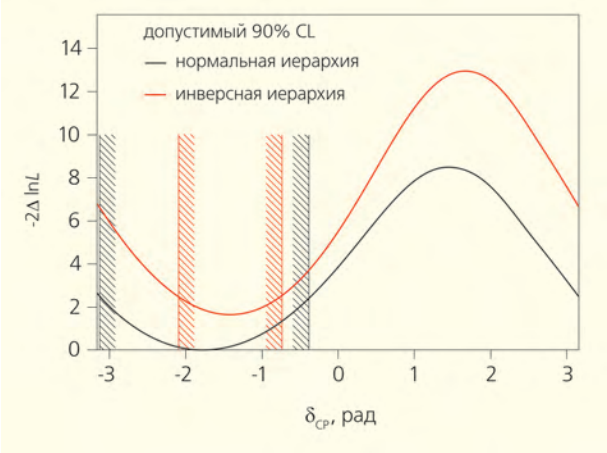


Рис.4. Доверительные интервалы для δ_{CP}. Кривая черного цвета соответствует нормальной иерархии масс, оранжевая кривая — инверсной иерархии масс.

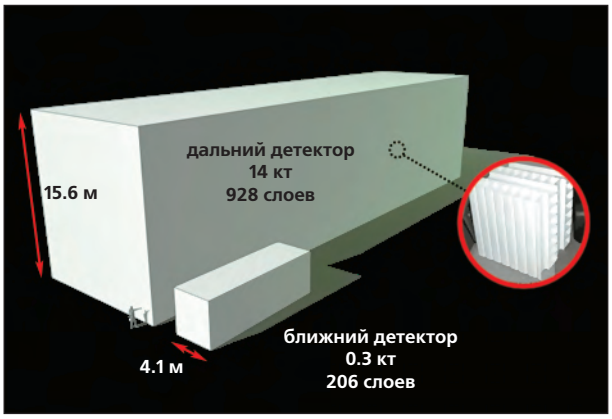


Рис.5. Общая схема эксперимента NOvA (вверху) и ближний и дальние нейтринные детекторы.

лее 2σ. Также следует отметить, что в эксперименте T2K было получено указание (пока довольно слабое, как следует из рис.4) в пользу нормальной иерархии масс.

Эксперимент NOvA

В эксперименте NOvA [15], общая схема которого показана на рис.5 (вверху), мюонные нейтрино, рожденные на протонном ускорителе в Fermilab (США), пролетают в земле расстояние 810 км и регистрируются в дальнем детекторе общей массой 14 кт, который расположен на поверхности земли. В эксперименте используется внеосевой (off-axis) нейтринный пучок, смещенный на угол 14.6 мрад относительной центральной оси пучка. Энергия мюонных нейтрино в пике спектра составляет 2 ГэВ, что соответствует максимуму вероятности осцилляций $\nu_\mu \to \nu_e$ для пролетной базы около 800 км. Оба нейтринных детектора (рис.5, внизу) — ближний, массой 0.3 кт, расположенный на расстоянии 1 км от мишени и измеряющий параметры нейтринного пучка до осцилляций, и дальний — имеют одинаковую структуру, основным элементом которой служит ячейка, заполненная жидким сцинтиллятором, с сечением 3.9×6.6 см^2 и длиной 15.5 м в дальнем детекторе и 3.9 м в ближнем. Ячейки расположены вертикально и горизонтально в чередующихся слоях, что обеспечивает объемную картину треков вторичных частиц от нейтринных взаимодействий. Активные элементы детекторов (жидкий сцинтиллятор) составляют около 62% от общей массы детекторов.

Результаты этого эксперимента базируются на статистике данных по осцилляциям $\nu_\mu \to \nu_e$, набранной с февраля 2014 г. по май 2016 г. Так же, как и в эксперименте T2K, здесь получено указание на максимальное CP-нарушение $\delta_{CP} = 3/2\pi$ ($-\pi/2$ в случае T2K). Эксперимент NOvA обладает лучшей чувствительностью к иерархии масс нейтрино за счет более длинной базы и более высокой энергии нейтрино по сравнению с экспериментом T2K, и его первые результаты предполагают, что нейтрино имеют нормальную иерархию масс [15].

Дальнейшие перспективы

Каких перспектив можно ожидать в поиске CP-нарушения в нейтринных осцилляциях? Большая величина θ_{13} обеспечивает хорошую статистику в осцилляциях $\nu_\mu \to \nu_e$ (6), но одновременно дает довольно малую величину асимметрии в первом осцилляционном максимуме A_{CP} ~ 10–20%, как это следует из (8). Поэтому проведение измерений с интенсивными пучками мюонных нейтрино и антинейтрино требуют контроля систематических неопределенностей в измерении вероятности осцилляций на уровне нескольких процентов. Если рассматривать ближайшее будущее, прежде всего следует отметить, что одобрена вторая фаза

эксперимента T2K [16], цель которой — набрать статистику с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино для величины интегрального потока протонов на мишени 20×10^{21}. Это позволит исключить гипотезу сохранения CP-инвариантности ($\delta_{CP} = 0$) с достоверностью $>3\sigma$ и достичь чувствительности к CP-нарушению на уровне $3–4\sigma$ (в зависимости от величины угла смешивания θ_{23}) в случае максимального CP-нарушения. При этом предполагается, что иерархия масс нейтрино будет определена в других экспериментах. Эксперимент NOνA продолжит набор статистики с мюонными нейтрино и антинейтрино; ожидается, что к 2022 г. будет достигнута чувствительность к CP-нарушению порядка 2σ, а иерархию масс нейтрино удастся установить с достоверностью $>3\sigma$. Также рассматривается возможность продолжения этого эксперимента.

Два больших проекта, находящиеся в начальной стадии, нацелены на поиск CP-нарушения и измерение CP-нечетной фазы. В обоих проектах планируется создание гигантских нейтринных детекторов, которые будут размещаться глубоко под землей в искусственно созданных подземных пещерах. Это эксперимент DUNE (США) [17] и проект T2HK (Япония) [18].

Первый будет использовать нейтринный пучок из Fermilab, а дальний нейтринный детектор составят четыре модуля, каждый из которых в качестве основного элемента имеет время-проекционную камеру, помещенную в индивидуальный криостат с жидким аргоном, который обеспечивает температуру около –186°C (один из модулей показан на рис.6). Общая активная масса четырех модулей достигнет 40 кт. Детектор нейтрино будет расположен в подземной лаборатории Homestake в Южной Дакоте на расстоянии 1300 км от источника нейтрино. Это шахта, в которой был выполнен знаменитый хлорный эксперимент с солнечными нейтрино Р.Дэвиса. Для создания новых экспериментальных залов для детектора DUNE потребуется выполнить сложные подземные работы, извлечь с глубины 1.5 км и перевезти в другое место сотни килотонн горной породы. В этом эксперименте различие между нормальной и инверсной иерархией может быть установлено на уровне более 5σ для всего возможного интервала значений δ_{CP} от 0 до 2π.

В проекте T2HK, который будет иметь одинаковую с T2K пролетную базу 295 км и off-axis пучок нейтрино из ускорителя J-PARC с энергией около 0.6 ГэВ, идущий под углом 2.5° по отношению к направлению протонного пучка, нейтринный пучок планируется направить в новый водный черенковский детектор HyperKamiokande. Детектор составят два гигантских бака (рис.7), заполненных водой общей массой около 0.52 Мт и размещенных в новой подземной лаборатории, которая будет создана на глубине около 650 м, примерно на расстоянии 8 км от детектора SuperKamiokande. Строительство тоннелей, помещений для очистки воды и экспериментального холла (полости) для детекторов предположительно займет около пяти лет. Для регистрации черенковского света от заряженных частиц, возникающих в результате взаимодействия нейтрино с водой, в каждом детекторе будут использоваться 40 тыс. фотоумножителей. Ожидается, что в экспериментах DUNE и T2HK нарушение CP-симметрии будет открыто с чувствительностью более 5σ для 70% интервала значений CP-нечетной фазы (более 8σ, если $\delta_{CP} = -\pi/2$), а величина δ_{CP} может быть измерена с точностью около 7°. Оба эксперимента должны начать набор статистики в 2026 г. Потенциальные возможности по поиску нарушения CP-симметрии в упомянутых

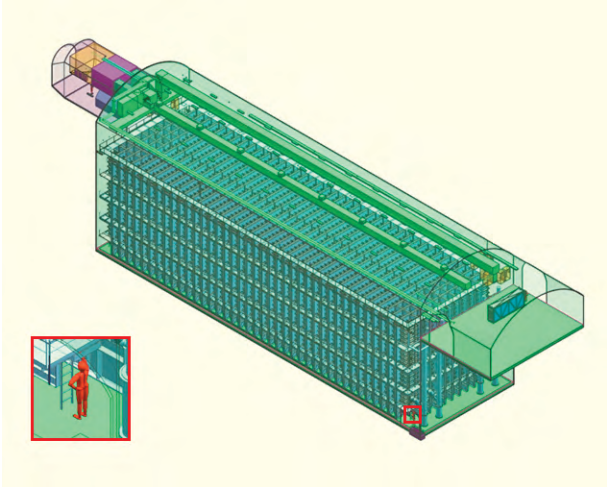


Рис.6. Схематическое изображение одного из модулей (время-проекционной камеры, заполненной жидким аргоном) эксперимента DUNE. Примерные размеры модуля: длина около 60 м, ширина 12 м, высота 14.5 м.

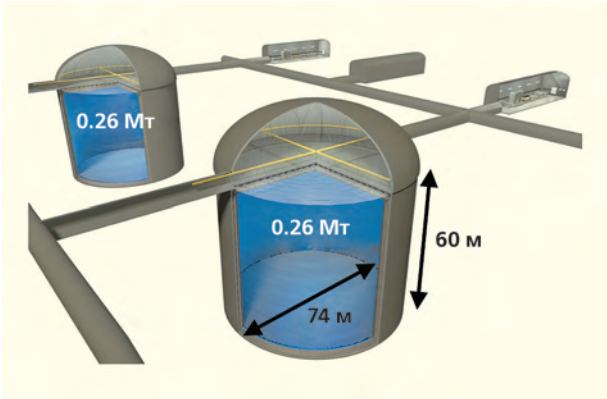


Рис.7. Установка HyperKamiokande, состоящая из двух черенковских детекторов — гигантских цистерн, заполненных чистой водой. Черенковское излучение регистрируется большими фотоумножителями, расположенными по всей внутренней поверхности цистерн. Масса воды в каждой цистерне составляет 0.26 Мт.

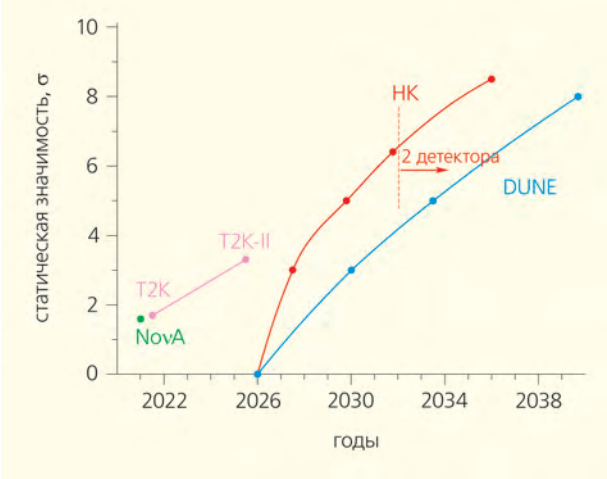


Рис.8. Ожидаемая чувствительность (в единицах σ) к нарушению CP-симметрии, которая может быть достигнута в текущих (T2K, NOνA) и готовящихся экспериментах T2HK (обозначен как HK) и DUNE [21]. Также показана чувствительность второй фазы эксперимента T2K, которая обозначена как T2K-II. Оценки чувствительности сделаны для $\delta_{CP} = -\pi/2$ и нормальной иерархии масс. Предполагается, что эксперименты T2HK и DUNE начнут набор статистики в 2026 г.

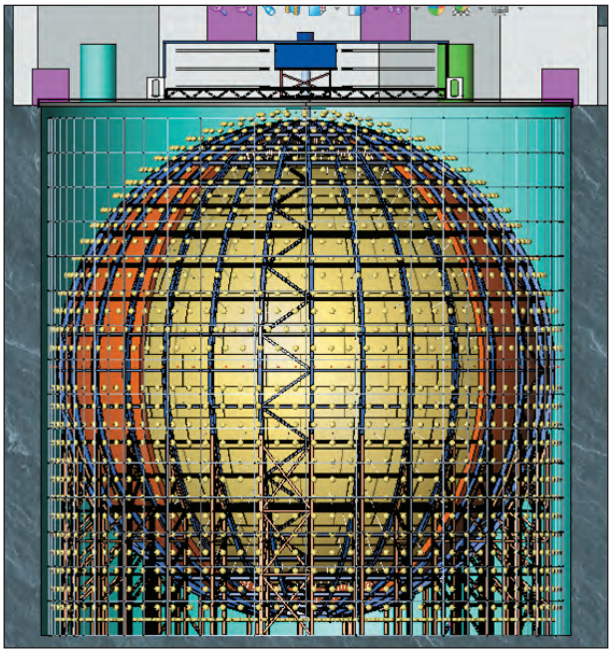


Рис.9. Детектор JUNO. Центральный детектор представляет собой сферу из акрила, заполненную жидким сцинтиллятором массой 20 кт, которая помещена в цистерну со сверхчистой водой массой 20–30 кт. Диаметр сферы около 40 м, диаметр и высота цистерны 43.5 м. Сцинтилляционный свет регистрируется 17 тысячами фотоумножителей с диаметром фотокатода 20 дюймов и 36 тысячами маленьких фотоумножителей с диаметром фотокатода 3 дюйма. Регистрация черенковского света в воде позволяет дискриминировать фоновые события.

выше экспериментах T2K, NOνA, а также T2HK и DUNE проиллюстрированы на рис.8.

Следует также упомянуть возможность установки одного из двух детекторов HyperKamiokande в Южной Корее, на расстоянии 1100–1300 км от J-PARC [19]. Внеосевой пучок нейтрино (угол 1–3°) из J-PARC с энергией 0.8–1.0 ГэВ в максимуме энергетического спектра позволит производить для этой пролетной базы измерения во втором осцилляционном максимуме, в котором величина CP-нечетной асимметрии в три раза больше, чем в первом. Таким образом, в этом подходе будут использоваться два дальних черенковских детектора (один в Японии, а второй в Корее) и один ближний детектор нейтрино, что даст возможность одновременно регистрировать первый и второй осцилляционные максимумы. Такая конфигурация эксперимента с двумя базами повышает точность измерения CP-нечетной фазы, снижает зависимость от уровня систематических погрешностей, а также дает реальные шансы для определения иерархии масс нейтрино с чувствительностью более 6σ для всех значений δ_{CP}.

Прямое определение иерархии возможно в реакторном эксперименте JUNO (Китай) [20]. Жидкий сцинтилляционный детектор нейтрино массой 20 кт, который планируется использовать в этом эксперименте, показан на рис.9. Детектор JUNO будет расположен в подземной лаборатории на глубине около 700 м, в провинции Гуандун на юге Китая. Среднее расстояние от детектора до нескольких реакторов суммарной мощностью около 36 ГВт составит около 60 км. В этом случае в спектре зарегистрированных антинейтрино, энергия значительной части которых приходится на осцилляционный максимум, характерный для «солнечных» осцилляционных параметров, возникают зависящие от иерархии масс модуляции, связанные с «атмосферными» параметрами. Если в детекторе удастся получить хорошее энергетическое разрешение ~3% при энергии антинейтрино около 1 МэВ, после набора статистики в течение 5 лет возможно различить нормальную и инверсную иерархии масс нейтрино на уровне достоверности около 3σ.

* * *

Открытие осцилляций нейтрино стало первым экспериментальным доказательством существования «новой физики» за пределами Стандартной модели, а сами нейтрино оказались уникальной лабораторией для ее изучения. За последние годы в нейтринной физике получено много удивительных результатов. Вполне вероятно, что Природа еще раз продемонстрирует благосклонность к исследователям и к неожиданному подарку (большая величина угла смешивания θ_{13}) добавит максимальное CP-нарушение в нейтринных осцилляциях. И тогда CP-нечетную фазу удастся измерить уже в ближайшее время. Как следует из полученных

и ожидаемых в ближайшем будущем результатов, для этого имеются реальные предпосылки.

В небольшой статье невозможно обсудить все горячие точки нейтринной физики. Например, одно из актуальных направлений исследований — поиск легких (~1 эВ) и тяжелых стерильных (взаимодействующих с веществом только гравитационно) нейтрино. Обнаружение таких частиц, которые отсутствуют в Стандартной модели, откроет новую научную страницу и, возможно, приведет к пересмотру многих базовых положений современной физики элементарных частиц. Широкий спектр текущих и готовящихся экспериментов по поиску стерильных нейтрино с реакторными и ускорительными нейтрино, а также с искусственными источниками нейтрино требует отдельного рассмотрения.

Несмотря на фантастический прогресс, достигнутый в последние годы в нейтринной физике, все еще остается много проблем, которые ждут своего решения. Вот далеко не полный список. За счет какого механизма возникают массы у активных нейтрино и какова природа смешивания нейтрино? Почему смешивание кварков и лептонов сильно различается? Существует ли новый источник CP-нарушения в лептонном секторе и есть ли связь с барионной асимметрией Вселенной? Существуют ли стерильные нейтрино? Нейтрино — это дираковские или майорановские частицы? Хотя много фундаментальных результатов уже получено, нейтринная физика по-прежнему находится в бурной стадии открытий, и сейчас невозможно предсказать, когда она перейдет в более спокойную фазу прецизионных измерений. ■

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 17-52-50038).

Литература

1. *Понтекорво Б.М.* Мезоний и антимезоний // ЖЭТФ. 1957. Т.33. С.549–551.
2. *Понтекорво Б.М.* Обратные β-процессы и несохранение лептонного заряда // ЖЭТФ. 1958. Т.34. С.247–249.
3. *Kajita T.* Nobel lecture: Discovery of atmospheric neutrino oscillations// Rev. Mod. Phys. 2016. V.88. P.030501.
4. *McDonald A.B.* Nobel lecture: The Sudbury neutrino observatory: observation of flavor change for solar neutrinos // Rev. Mod. Phys. 2016. V.88. P.030502.
5. *Kobayashi M., Maskawa K.* CP-violation in the renormalizable theory of weak interaction // Prog. Theor. Phys. 1973. V.49. P.652–657.
6. *Maki Z., Nakagawa M., Sakata S.* Remarks on the unified model of elementary particles // Prog. Theor. Phys. 1962. V.28. P.870–880.
7. *Jarlskog C.* Commutator of the quark mass matrices in the Standard Electroweak Model and a measure of maximal CP-violation // Phys. Rev. Lett. 1985. V.55. P.1039–1042.
8. *Fukugita M. and Yanagida T.* Baryogenesis without grand unification // Phys. Lett. 1986. V.B174. P.45–47.
9. *Abe K., Abgrall N., Aihara N. et al.* The T2K experiment // Nucl. Instr. Meth. 2011. V.A659. P.106–135.
10. *Abe K., Abgrall N., Ajima Y. et al.* Indication of electron neutrino appearance from an accelerator-produced off-axis muon neutrino beam // Phys. Rev. Lett. 2011. V.107. P.041801.
11. *An F.P., Balantekin A.B., Band H.R. et al.* Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment // ArXiv:1610.04802 [hep-ex], 44 p.
12. *Kim S.B.* Measurement of neutrino mixing angle θ_{13} and mass difference Δm^2_{ee} from reactor antineutrino disappearance in the RENO experiment. // Nucl. Phys. 2016. V.B908. P.94–115.
13. *Abe Y., Appel S., Abrahao T. et al.* Measurement of θ_{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques // JHEP. 2016. V.1601. P.163.
14. *Abe K., Amey J., Andreopoulos C. et al.* First combined analysis of neutrino and antineutrino oscillations at T2K // Phys. Rev. Lett. 2017. V.118. P.151801.
15. *Adamson P., Aliaga L., Ambrose D. et al.* Constraints on oscillation parameters from ν_e appearance and ν_μ disappearance in NOvA // ArXiv:1703.03328 [hep-ex], 6 p.
16. *Abe K., Aihara H., Ajmi A. et al.* Proposal for an extended run of T2K to 20×10^{21} POT // Arxiv:1607.08004 [hep-ex], 68 p.
17. *Acciarri R., Acero M., Adamowski M. et al.* Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE): V.1: The LBNF and DUNE Projects // Arxiv:1601.05471 [hep-ex], 63 p.
18. *Abe K., Aihara H., Andreopoulos C. et al.* Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande // PTEP. 2015. V.2015. P.053C02.
19. *Abe K., Abe Ke, Aihara H. et al.* Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea // ArXiv:1611.06118 [hep-ex], 60 p.
20. *An F., An., An Q. et al.* Neutrino physics with JUNO // J. Phys. 2016. V.G43. P.030401.
21. *Catanesi M.G.* Hyper-Kamiokande. Talk given at XVII International Workshop on Neutrino Telescopes, 13–17 March 2017, Venezia, Italy.

Биография Земли: основные этапы геологической истории

М.И.Кузьмин, В.В.Ярмолюк

***Михаил Иванович Кузьмин**, академик РАН, директор Института геохимии имени А.П.Виноградова СО РАН с 1988 по 2012 г. В настоящее время главный научный сотрудник института и советник РАН. Ведущий специалист в области геохимии, геодинамики, петрологии. Один из создателей нового направления в геологии — химической геодинамики. Лауреат Государственной РФ (1997) и Демидовской (2007) премий.*

***Владимир Викторович Ярмолюк**, академик РАН, заведующий лаборатории Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Область научных интересов — процессы глубинной геодинамики, изотопная геохимия, редкометалльный магматизм и связанные с ним месторождения, палеогеодинамические реконструкции. Лауреат премии имени Ленинского комсомола (1978), Государственной премии РФ (1997) и премии имени В.А.Обручева (2005).*

Ключевые слова: континентальная кора, мантия, магматизм, мантийные плюмы, субдукция, тектоника литосферных плит, горячие точки мантии.
Key words: crust, mantle, magmatism, mantle plumes, subduction, plate tectonics, hot spots.

Земля обладает уникальными характеристиками, которых нет у других планет Солнечной системы и у планет других звездных систем. Наиболее полно эти особенности обобщил в своей книге «Земля как эволюционирующая планетная система» замечательный геолог Кент Конди [1]. Книга написана для студентов университетов, но знать об этом, как нам кажется, необходимо со школы, так как только от нас — жителей Земли — зависит, как бережно следует использовать эти удивительные ее свойства, чтобы сохранить для будущих поколений нашу планету. Среди отличительных особенностей Земли Конди отмечает следующее.

Земная орбита близка к круговой, что обеспечивает более или менее постоянное поступление количества тепла, исходящего от Солнца. Если бы орбита была более вытянута, то на планете стало бы холоднее зимой и жарче летом. Тогда высшие формы жизни могли бы и не выжить.

Если бы Земля была только на 5% ближе к Солнцу, то (подобно тому, что происходит на Венере) температура на ее поверхности была бы слишком высокой для существования воды в жидком состоянии. Если бы наша планета находилась на 5% дальше от Солнца, то океаны замерзли бы, фотосинтез был бы значительно ослаблен, и содержание атмосферного кислорода сильно бы сократилось. В обоих случаях условия на Земле затрудняли бы появление привычных для нас форм жизни.

Если бы Земля была существенно массивнее, то силы гравитации, скорее всего, препятствовали бы появлению высших форм жизни, а если меньше, то Земля, подобно Марсу, лишилась бы атмосферы под воздействием солнечного ветра, что также не способствует развитию жизни.

© Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., 2017

Если бы Земля не имела достаточно мощного магнитного поля, то смертоносные космические лучи убили бы все формы жизни на ней. Если бы не было озонового слоя, фильтрующего и не допускающего вредную ультрафиолетовую солнечную радиацию, высшие формы жизни на Земле также не могли бы существовать.

Если бы гравитационное поле Юпитера не оказывало регулирующее воздействие на внутренние зоны Солнечной системы, Земля беспрерывно подвергалась бы бомбардировкам метеоритов и комет, следствием которых стали бы постоянные катастрофы глобального масштаба, препятствующие эволюции жизни до высших ее форм.

И наконец, если бы не было тектоники плит, то не произошла бы дифференциация рельефа Земли и не сформировались бы континенты, т.е. те территории, на которых мог обитать человек.

От себя добавим, что не образовались бы и многие рудные месторождения, обеспечившие развитие цивилизаций.

Вполне понятно, что большинство уникальных характеристик Земля приобрела как в ходе становления Солнечной системы, так и в процессе всей геологической истории. К сожалению, это предположение сложно обосновать из-за неполноты наших знаний, однако данные, накопленные разными науками (астрономией, геологией, биологией и др.) высвечивают отдельные участки земной истории, что дает основание для попыток реконструировать ее в полном объеме.

Благодаря использованию космических аппаратов и орбитальных телескопов (в том числе телескопа «Хаббл») получен огромный материал о других звездных мирах, позволивший более полно понять закономерности формирования планетных систем, и в частности расшифровать ранние этапы развития Солнечной системы.

Еще совсем недавно считалось, что наша планетная система зародилась во вращающемся газопылевом облаке, в центре которого возникло Солнце, а вокруг него (с учетом дифференциации облака) образовались планеты с определенными стабильными орбитами. Полученные новые данные сильно скорректировали эту стройную концепцию [2]. Разделение Солнечной системы на внутреннюю часть, в пределах которой развиты каменистые планеты небольших размеров, и внешнюю, с газовыми гигантами, делают нашу систему «белой вороной» среди других звездных систем. В Солнечной системе нет планет средних размеров (~1–10 масс Земли), называемых также суперземлями и обычных для других звездных систем. В них планеты расположены ближе к своей звезде, чем Меркурий к Солнцу, и их история, как правило, заканчивается столкновением со светилом. Как полагают некоторые исследователи, особый путь развития нашей системы вызван тем, что в первые миллионы лет ее становления гигантские планеты, возникшие в ее пределах, испытывали динамическую неустойчивость и орбитальные миграции [2]. Эти бурные события могли сбросить на Солнце (или выбросить в межзвездное пространство) целые планеты.

Здесь на основе современных знаний о начальных стадиях формирования Солнечной системы, а также геологической истории Земли мы хотим показать, как образовалась наша уникальная планета, на которой появился и живет человек.

Мы понимаем, что поднимаемую проблему можно раскрыть лишь на уровне наших сегодняшних познаний, в которых еще много пробелов. Однако накопление новых достижений науки в разных направлениях происходит в геометрической прогрессии. В скором времени будут получены новые данные. Они, вероятно, внесут принципиальные изменения в сложившуюся картину земной истории. И тем не менее нам представляется, что какой-то итог понимания эволюции нашей планеты надо подводить в разное время. Это помогает следить за развитием науки и вносить соответствующие дополнения и исправления в наши более ранние построения.

Возникновение Солнечной системы и особенности ее формирования

Зарождение Солнечной системы произошло в недрах гигантского газопылевого облака (рис.1). По-видимому, «родам» способствовало участие некой сверхновой звезды, засеявшей облако короткоживущими изотопами. Продукты их распада позволяют расшифровать некоторые особенности становления планетной системы (включая Землю) на ранней стадии ее формирования.

Расчеты показывают, что за менее чем 100 тыс. лет в центре газопылевого скопления под действием гравитации возникла звезда, окруженная широким кольцом из газа и пыли — протопланетным диском [3]. Мельчайшие частицы, двигаясь вместе с потоками газа, сталкивались и слипались друг с другом. Движение пылинок в газе тормозилось, что вынуждало их по спирали опускаться к звезде. При этом они постепенно нагревались. В результате вода и другие летучие вещества с низкой температурой кипения испарялись. Граница, на которой все происходило, называется «линией льда». Располагается она между орбитами Марса и Юпитера, разделяя Солнечную систему на внутреннюю область, лишенную летучих веществ и содержащую твердые планеты, и внешнюю — богатую летучими веществами (см. рис.1). В пределах последней располагаются газовые планеты-гиганты.

Первые 2 млн лет истории Солнечной системы стали временем формирования многочисленных планетных эмбрионов — планетозималей, а за линией льда — планет-гигантов Юпитера и Сатурна. Этим Солнечная система резко отличается от дру-

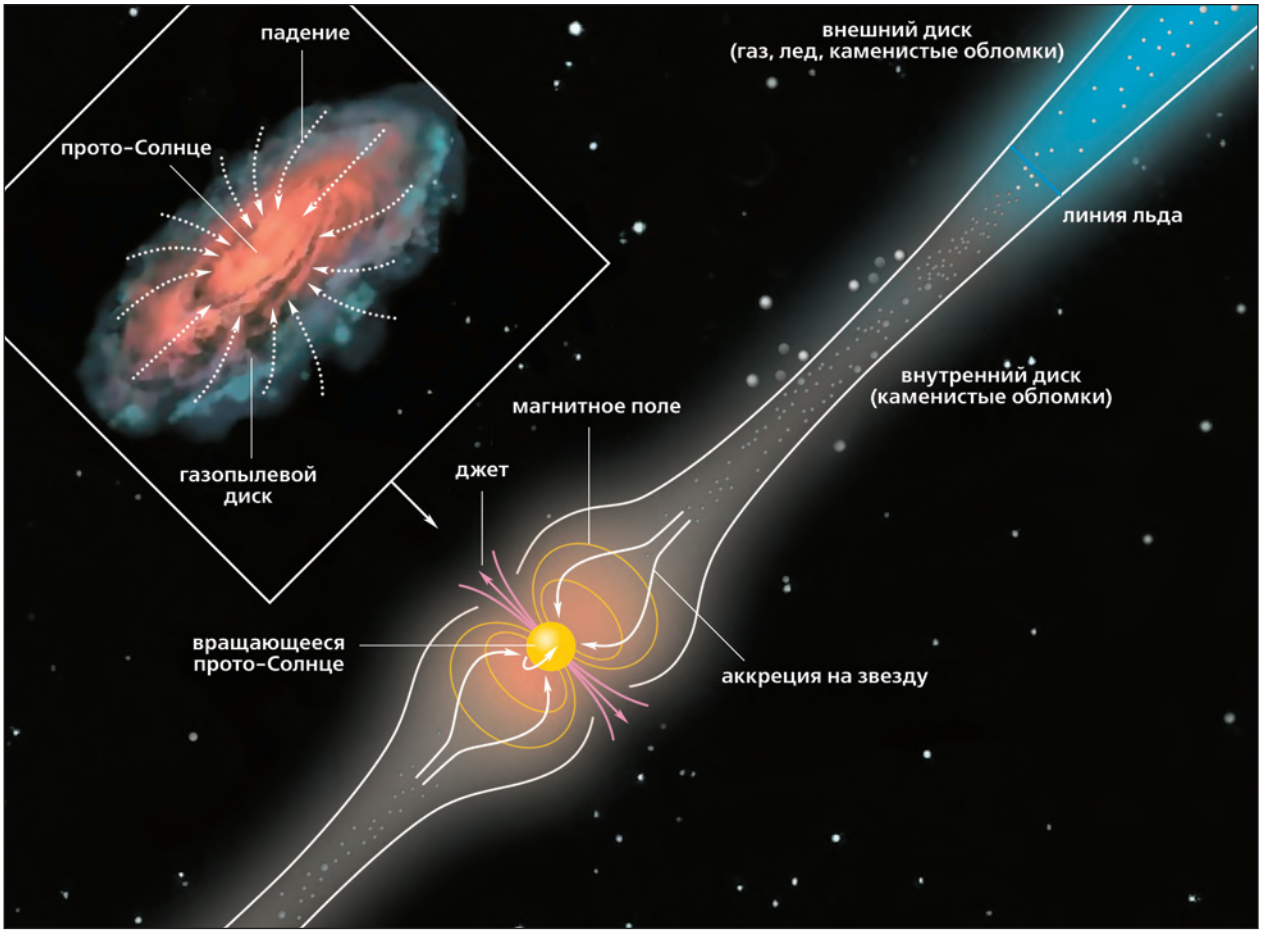


Рис.1. Рождение Солнечной системы 4568 млн лет тому назад [2]. Наша звезда возникла как прото-Солнце в центре гигантского молекулярного облака во вращающемся газопылевом диске. В его внутренней области образовались каменные планеты: Меркурий, Венера, Земля, Марс. В более холодной внешней части через 2 млн лет сформировались планеты гиганты: Юпитер и Сатурн, которые начали дрейфовать в сторону Солнца.

гих планетных систем, где подобные гиганты расположены гораздо ближе к светилу. По образному выражению К.Батыгина с коллегами, такие особенности Солнечной системы — «продукты ее молодости... включавшей больше драмы и хаоса» [2]. Важным элементом первичного хаоса стало сложное взаимодействие гигантских периферийных планет. Впервые на это было обращено внимание в компьютерной модели Ф.Массе и М.Снэллгроува, описавшей одновременную эволюцию в протопланетном диске орбит Сатурна и Юпитера [4]. Эти исследователи показали, что в результате миграции к центру системы планеты-гиганты обрели определенную конфигурацию, благодаря которой они смогли воздействовать на протопланетный диск. Сложившийся баланс сил (гравитации, момента импульса, гравитационного влияния внешнего пояса комет и др.) изменил движение обеих планет.

Развивая эти идеи, Батыгин с коллегами установили, что главным эффектом смены галса стала атака Юпитера и Сатурна на «население» первичных внутренних планет Солнечной системы [2]. Еще двигаясь к Солнцу, гиганты возмущали движение мелких тел, которые сталкивались и дробились, образуя рои обломков. За сотни тысяч лет такие рои могли сбросить на Солнце любую суперземлю. По мере того как бывшие суперземли падали на Солнце, они должны были оставлять за собой пустынную область в протопланетной туманности. Допускается, что прежде чем сменить галс, Юпитер мигрировал к Солнцу до расстояния нынешней орбиты Марса. При этом он увлек за собой во внутреннюю область Солнечной системы ледяные скопления общей массой более 10 масс Земли, обогатив ее водой и другими летучими веществами. Такой сброс протопланет во внутренние участки Солнечной системы изменил орбитальный момент не только Юпитера, но и Сатурна и вызвал смену их галсов в сторону от Солнца. В результате во внутренних участках Солнечной системы возникли условия для формирования новых планет из сохранившихся там редких обломков. Постепенно планеты-путешественники стабилизировали свои орбиты. Этому способствовало их взаимо-

действие с другими планетами-гигантами (Нептуном и Ураном) и внешним поясом льдистых астероидов (поясом Койпера). Предполагается, что побочным эффектом такого уравновешивания стал еще один вброс во внутреннюю область Солнечной системы потока обломков, который вызвал мощную астероидную бомбардировку внутренних планет. Шрамы от нее видны в виде гигантских кратеров на поверхности Луны, Меркурия и Марса, а на Земле они привели к практически полному уничтожению пород гадейской континентальной коры — первой коры в геологической истории нашей планеты. Около 3.9 млрд лет назад планеты-гиганты успокоились. Структура Солнечной системы стабилизировалась в том виде, в котором сейчас и наблюдается [2].

Мы полагаем, что картина, представленная Батыгиным с коллегами, наиболее полно объясняет особенности ранних этапов развития Солнечной системы, в том числе разделение планет на две большие группы — каменные и газово-ледяные. Вполне понятны обоснования появления планет небольших масс во внутренней части Солнечной системы и их каменный облик. В значительной степени предложенная модель объяснила и смену галсов планет-гигантов. В то же время наши знания о рождении Солнечной системы еще очень скудны, и, очевидно, описанная картина будет модифицироваться по мере появления новых данных.

Историю формирования и развития Земли необходимо начинать практически с зарождения Солнечной системы, ранний этап которой характеризовался путешествием планет газовых гигантов к центру системы и обратно. Он-то во многом и определил особенности строения нашей планеты и ее дальнейшую геологическую историю.

Темные эоны

Два первых эона в истории Земли выделяются как хаотичный, охватывающий время формирования Земли и Луны в интервале от 4568 млн лет до 4500–4450 млн лет назад, и гадейский, характеризующий первые страницы геологической истории Земли в интервале 4500/4450–4000/3900 млн лет назад [5]. Оба эона отвечают времени ранней «бурной» юности Солнечной системы, и их следы не сохранились в явном виде в структурах нашей планеты.

В **хаотичный эон** (спустя 11 млн лет после зарождения Солнечной системы) масса Земли составляла 63% от ее современных значений, а через 30 млн лет достигла 93% [6]. Конечно, хронология этих ранних событий устанавливается частично и с большим допущением и в основном опирается на данные о поведении продуктов распада короткоживущих изотопов (с константой полураспада в несколько миллионов лет).

Земля — высокодифференцированная планета, имеющая железное ядро и твердую силикатную оболочку, которая включает мантию, литосферу и земную кору. Узнать состав оболочек Земли помогают данные по углистым хондритам, которые стали строительным материалом при образовании внутренних планет Солнечной системы (в том числе и нашей). Сходство хондритов с составом солнечной короны позволило Б.Вуду не только определить состав прото-Солнечной туманности, но и использовать их для оценки среднего состава Земли [6]. При аккреции (слипании, как в снежном коме) такого материала к прото-Земле и его последующем плавлении, вызванном соударениями и радиоактивным распадом, происходило разделение элементов в соответствии с их геохимическими свойствами. Литофильные элементы, имеющие сродство с силикатами (Si, Mg, Ca, Ti, Sc, Al, РЗЭ и др.), концентрировались в мантии и земной коре в соотношениях, близких к составу углистых хондритов. В отличие от них, сидерофильные (Fe, Ni, Co, Mn, W, Cr, Pt, Re и др.) элементы, геохимически близкие к железу, «ушли» совместно с его расплавами в ядро планеты. Их содержание в мантии существенно ниже, чем в хондритах.

О времени формирования ядра позволяют судить данные о распределении в силикатной оболочке Земли продуктов короткоживущих изотопных систем, в которых родительские и дочерние изотопы могли иметь разные геохимические свойства. В результате они по-разному себя вели в процессах аккреции Земли и дифференциации ее оболочек. В этом отношении наиболее интересные результаты дала система $^{182}Hf \rightarrow {}^{182}W$. В ней родительский изотоп ^{182}Hf с периодом полураспада около 9 млн лет практически исчез в течение первых 50 млн лет земной истории. В отличие от дочернего сидерофильного изотопа ^{182}W, гафний — литофильный. При дифференциации планеты на железное ядро и силикатную мантию ^{182}W стремился уйти в ядро, а ^{182}Hf оставался в мантии (рис.2). Если бы ядро сформировалось сразу после аккреции, то дочерний изотоп остался бы вместе с родителем в мантии и соответствовал составу хондритов. Мантия по сравнению с хондритом обеднена вольфрамом (Hf/W = 19 и 1.1 соответственно), что указывает на формирование ядра в некотором интервале геологического времени, в течение которого вольфрам вместе с железом частично перераспределились в ядро. На основе изотопного состава вольфрама в земной мантии минимальное время, необходимое для образования ядра, оценивается в 34 ± 7 млн лет после начала аккреции Земли [7].

Таким образом, дифференциация вещества Земли началась практически с момента ее образования. Столкновение формирующейся планеты с крупными астероидами, а также тепло радиоактивного распада (в первую очередь короткоживущих изотопов) вызывали плавление ее силикат-

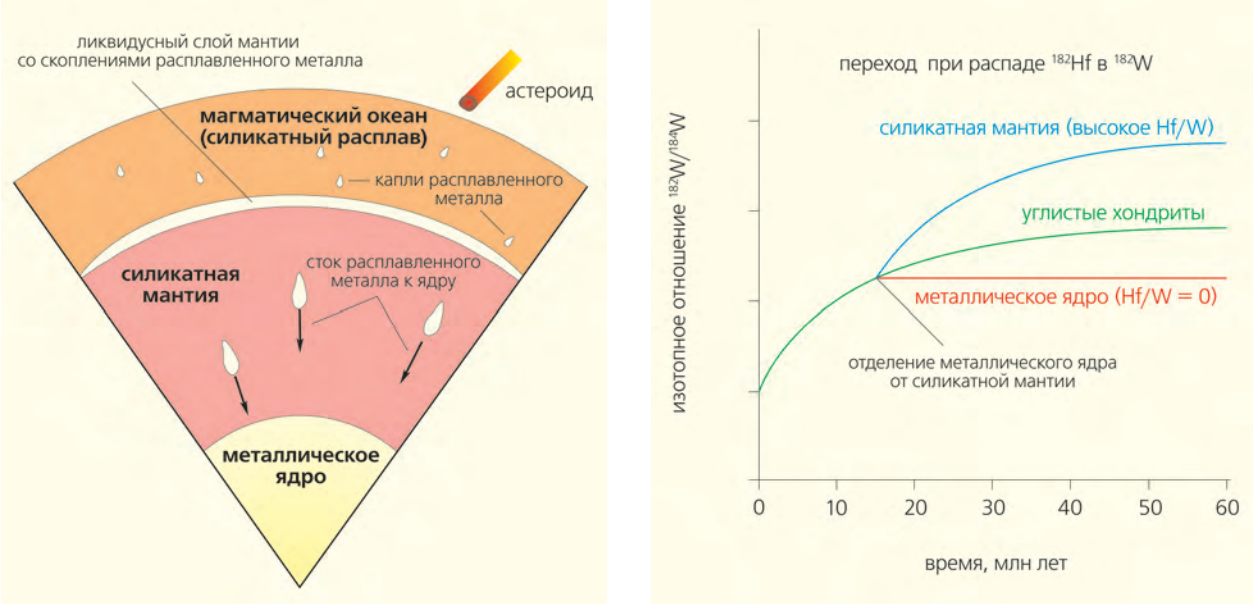


Рис.2. Дифференциация Земли в хаотичный эон. Слева — модель образования ядра [6]. Большое значение при формировании ядра играли глубокие магматические бассейны силикатного расплава, образовавшиеся при столкновении Земли с большими астероидами. Крупнейшее столкновение привело к плавлению верхних оболочек Земли до глубины 700 км. Капли сидерофильных элементов, возникавшие при плавлении смешанного железокаменного материала, погружались на дно магматических бассейнов и образовывали крупные скопления более плотного расплавленного металла, который стекал через нижнюю мантию в формирующееся ядро. Справа — время формирования ядра согласно распаду ^{182}Hf → ^{182}W (период полураспада 8.9 млн лет). Через 20 млн лет образовалась большая часть ядра, а через 50 млн лет — все ядро. Примерно через 30 млн лет после возникновения Солнечной системы Земля столкнулась с космическим телом, по массе близким Марсу. В космос было выброшено силикатное вещество мантии, которое послужило строительным материалом для Луны.

ной оболочки с образованием магматических океанов. При высокой температуре и давлении 20–23 ГПа происходило разделение магмы на силикатный и железный расплавы [6]. Уже через первые 5–8 млн лет объем Земли был близок к половине его нынешнего размера. Удары крупных астероидов могли образовывать магматические бассейны глубиной до 400 км. Расплавы железа, как более тяжелые, накапливались на его дне, а затем «проваливались» вниз, наращивая ядро [6].

Исключительным событием в хаотичном эоне стало формирование Луны, сыгравшей важную роль в дальнейшем развитии нашей планеты. Большинство исследователей считают, что причина ее образования — столкновение Земли с крупным космическим телом, по размеру близким к Марсу. Предполагается, что такая космическая катастрофа произошла спустя 30 млн лет после образования Солнечной системы [8]. Это согласуется с последними оценками минимального возраста нашего спутника — 4.51 млрд лет, полученными по циркону из лунных пород. Масса Земли тогда уже составляла около 93% ее современной массы [8]. К тому времени сформировалась и большая часть ядра Земли (см. рис.2). Столкновение небесных тел изменило наклон оси вращения Земли к оси ее орбиты, составивший 23° [9], что способствовало, как считает Конди, установлению благоприятных климатических условий для существования жизни. В то же время косой удар обусловил выброс значительной части мантийного (силикатного) вещества, которое пошло на формирование Луны [9]. Ядро же Земли этим столкновением затронуто не было. Действительно, породы Луны обеднены сидерофильными элементами, а также изотопом ^{182}W, что указывает на возникновение удара после формирования значительной части земного ядра.

В результате столь мощного импакта произошло массовое плавление мантии Земли с образованием глубокого (до 700 км) магматического океана, эволюция которого способствовала вещественной дифференциации верхних оболочек планеты в гадейское время.

Название **гадейского эона** происходит от имени Гадеса — древнегреческого бога подземного мира, — указывая тем самым на «адские» условия на Земле в то время. Новая эпоха началась после формирования системы Земля—Луна. Выделение гадейского эона (как распознаваемой эпохи в истории Земли) началось после обнаружения в конце XX в. на западе Австралии в осадочных породах гор Джек Хиллс обломков циркона $Zr[SiO_4]$ с возрастными характеристиками, уходящими за известную к тому времени границу геологической истории. Следует отметить, что цир-

кон — великолепный геохронометр, устойчивый к самым экстремальным геологическим воздействиям (высоким температуре и давлению). Находка обломков цирконов с возрастом их центральных частей в 4.376 млрд лет стала мировой сенсацией. Наиболее интенсивно эти цирконы начали изучаться в последние два десятилетия, когда появилось аналитическое оборудование новейшего поколения, позволяющее проводить разнообразные (в том числе геохимические и изотопные) исследования в точке. Обобщающая работа по изучению цирконов Джек Хиллс была выполнена О.Нэбелом с соавторами [10]*. Основные результаты также приведены и в нашей работе [8]. Возникновение этих цирконов связывается с кристаллизацией первых гранитоидных (кислых) расплавов, которые образовались при плавлении первичной основной (базальт-коматиитовой) континентальной коры при воздействии на нее восходящих горячих потоков (плюмов) мантии. Астероидно-метеоритные бомбардировки, имевшие в гадее большой масштаб и, как отмечалось, продолжавшиеся до стабилизации орбит Юпитера и Сатурна, разрушали первичную континентальную кору [8]. Ее фрагменты смешивались с мантией и плавились. Цирконы же, устойчивые до температуры более 1690°С, сохранялись и со вновь образованными порциями магм возвращались на поверхность, принимая участие в формировании новой коры. При плавлении уже этой коры цирконы концентрировались в остаточных кислых расплавах и служили затравками для новых их генераций. Подобный процесс неоднократного вовлечения циркона в разные субстраты плавления, называемый рециклингом, мог повторяться до тех пор, пока Земля подвергалась массированным астероидным бомбардировкам, т.е. вплоть до архейского времени.

Цирконы с гадейскими возрастными характеристиками установлены также в архейских породах Гренландии, Канады, Северного Китая, Северной Америки и Южной Африки [8, 10]. Это говорит о том, что условия для их возникновения в гадейской коре существовали практически повсеместно. Детальное изучение цирконов показало, что пик возрастов в разных их генерациях пришелся на 4.25 млрд лет, что позволяет предполагать наиболее быстрый рост гадейской земной коры именно в тот период. Относительный пик значений возраста приходится также на 4.1 млрд лет, а цирконов возрастом 3.9–4.0 млрд лет очень мало. Это время определяется как окончание гадейского эона. Именно тогда произошла последняя тяжелая бомбардировка Земли и Луны и, очевидно, резко сократился процесс рециклинга цирконов, связанный с их насильственным мгновенным перемещением в область плавления.

Большое значение для понимания геологических условий, существовавших на нашей планете в гадейское время, имеет изучение цирконов в породах Луны, которые были доставлены на Землю экспедициями «Аполлон-14» (1971 г.) и «Аполлон-17» (1972 г.). Возраст лунных цирконов лежит в диапазоне 4.0–4.35 млрд лет [10], т.е. они формировались одновременно с гадейскими. Образование лунных цирконов происходило при высоких температурах (~920–1140°С), а земных — при средних (~700°С) [10, 11]. Отличаются земные и лунные цирконы также по нормированному содержанию в них редкоземельных элементов (рис.3). В земных цирконах четко видна положительная аномалия церия. Она свидетельствует об

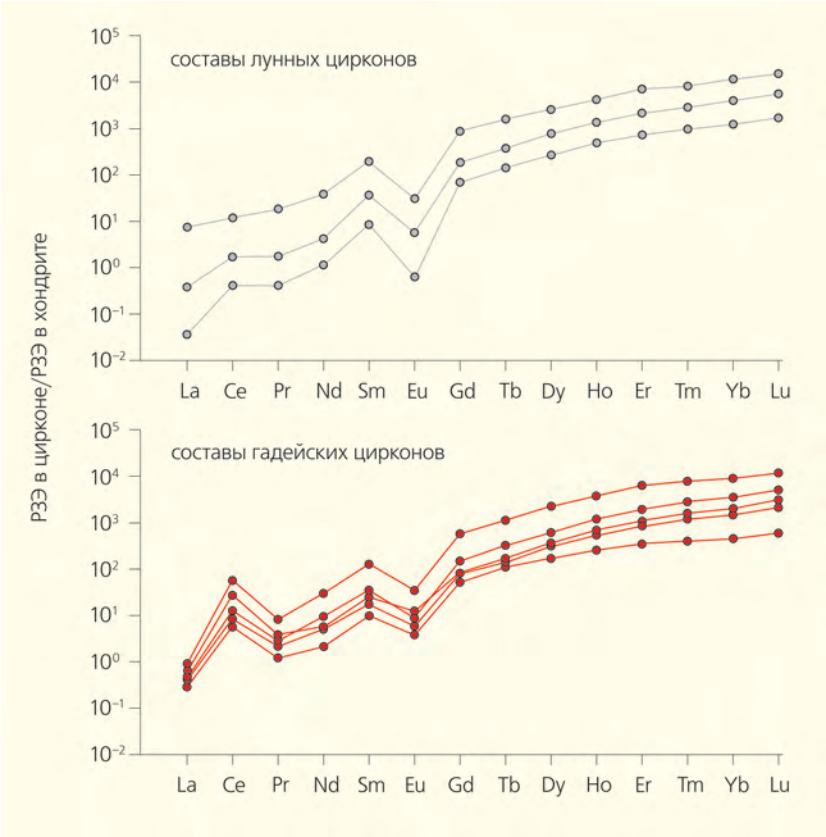


Рис.3. Нормированные содержания редкоземельных элементов в лунных и земных (гадейских) цирконах. Температура образования лунных цирконов 920–1140°, а земных — 700° [10, 11].

* Ссылки на других авторов можно найти в этой работе.

окислительных условиях кристаллизации расплавов, способствовавших вхождению церия валентностью +4 в структуру минерала. Об окислительных условиях на Земле в гадейское время свидетельствуют также данные по изотопному составу кислорода в цирконах [10]. В отличие от земных, лунные аналоги формировались в восстановительной среде. Они к тому же обладают и характерной микроструктурой. В них установлено присутствие локальных участков перекристаллизации и аморфизации, выявляются пластические деформации, разрывы и трещины, т.е. типичные следы импактных структур [12]. Судя по всему, эти кристаллы подвергались метеоритным бомбардировкам. В земных цирконах таких структур не наблюдается, что указывает на меньшее влияние астероидных ударов на образование данных минералов.

Несмотря на общий пессимизм в отношении сохранности гадейской коры после переработки ее мощнейшими астероидными бомбардировками, похоже, что ее фрагмент все же был обнаружен. Ему соответствует Нуввуагитугский (Nuvvuagittuq) зеленокаменный пояс на северо-восточном побережье Гудзонского залива в Канаде, изученный в самые последние годы [13]. Его центральная часть (серия Ujaraaluk) сложена основными и ультраосновными вулканическими и интрузивными породами, возраст которых по соотношению продуктов распада короткоживущей ($^{146}Sm \rightarrow {}^{142}Nd$; $T_{1/2} = 68$ млн лет) и долгоживущей ($^{147}Sm \rightarrow {}^{143}Nd$; $T_{1/2} = 106$ млрд лет) изотопных систем оценен в ~4400 млн лет. Полученные оценки позволяют говорить об этих породах как о древнейшей коре Земли, которая сформировалась после гигантского импакта, приведшего к образованию Луны [13].

По завершении аккреции Земли и обособлению ее ядра (т.е. к концу гадейского эона) температура мантии была в 1.2 раза выше современной [1], а перенос тепла и вещества из глубин Земли к поверхности обеспечивался общемантийной конвекцией. На поверхности Земли располагались крупные лавовые плато, подобные лунным морям. Кора наращивалась за счет излияний базальтов и коматиитов, питаемых мантийными плюмами, а также за счет подслаивания снизу магм, внедрявшихся в основание коры. Такой тип развития коры выделяется как режим тектоники покрышки* [14]. Значительные лавовые платоизлияния, массивные метеоритные бомбардировки и общемантийная конвекция служили основными механизмами, определявшими развитие Земли в гадейское время.

* В гадей-архейское время верхняя каменная оболочка Земли была более или менее однородной. Ее сплошность нарушалась либо бомбардировкой астероидов, либо прорывом магмы глубинных плюмов. Оба эти процесса обеспечивали появление на поверхности магматических расплавов, наращивающих кору сверху. Такое состояние земной поверхности обозначается как «тектоника инертной покрышки», или, кратко, — «тектоника покрышки» (lid-tectonics).

Эры самоорганизации Земли

После тяжелой бомбардировки около 4.0–3.9 млрд лет назад [2, 15] космический фактор перестал играть ведущую роль в формировании и разрушении коры Земли. Характер геологических процессов стал определяться механизмами «самоорганизации» недр планеты, которые упорядочили строение и состав всех ее оболочек. С того же времени в структурах верхней оболочки Земли (в ее коре) прослеживается поддающаяся расшифровке летопись событий, которая позволяет с той или иной степенью детальности реконструировать историю нашей планеты.

Архейская эра представляет собой наиболее ранний отрезок, доступный для изучения. Он начался с прекращения тяжелых астероидных бомбардировок и продолжался более миллиарда лет (3.9–2.5 млрд лет назад). В ту эпоху широкое развитие приобрели основные и ультраосновные (коматииты) вулканические породы, а также кислые породы тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) серии. Совместно они образуют гранит-зеленокаменные пояса в фундаменте древних платформ.

Об обстановке формирования этих пород позволяют судить данные по изотопному составу кислорода в цирконах архейских гранитоидов, варьирующему в пределах: $\delta^{18}O = 6–7‰$. Подобное постоянство свидетельствует о слабом развитии процессов выветривания, способствующих фракционированию изотопов кислорода. Соответственно, можно говорить о слабой дифференцированности рельефа в архее с преобладанием ландшафтов типа лавовых равнин (подобных равнинам Луны и Марса), а также о развитой гидросфере, которая изолировала каменную оболочку от воздействия атмосферы [16]. Такой тип развития соответствует режиму lid-tectonics и свидетельствует о доминировании в то время механизмов общемантийной конвекции с участием мантийных плюмов. Восходящие мантийные потоки питали лавовые платоизлияния, наращивая тем самым мощность коры. В результате ее основание погружалось в глубины, где происходила трансформация пород в эклогиты. Плавление последних под влиянием тех же мантийных плюмов вело к образованию магм, исходных для пород тоналит-трондьемит-гранодиоритовой серии.

Вопрос о появлении кислых пород ТТГ-серии — принципиальный для понимания геологических процессов в архее. В современных геологических структурах подобные породы образуются преимущественно в обстановках, связанных с зонами субдукции. Однако в те далекие времена процессы тектоники литосферных плит (включающие в качестве основного элемента субдукцию) не имели широкого развития [1, 17]. Указанный выше механизм образования кислых магм за счет плавления низов базитовой коры не так давно обоснован на примере тоналит-трондьемит-гранодиоритового

комплекса Минто Блок (Minto Block) на севере Канады [18]. В детализированном виде предложенная модель включает подъем мантийного плюма к основанию коры, плавление его головной части и поступление расплавов не только на поверхность, но и на разные уровни коры (рис.4). Тепло, привнесенное расплавами в кору, вызывало ее плавление. Продуктами последнего стали тоналитовые магмы, которые поднимались вверх, образуя крупные внутрикоровые линзы. Последующие воздействия плюма на кору вовлекали в плавление тоналиты первого этапа. В результате появлялись все более кислые расплавы — вплоть до гранодиоритов. Предложенная модель полностью согласуется с современной обстановкой океанического плато и не требует образования зон субдукции [18].

Архейская эра была временем поступления высокого теплового потока из недр Земли. Это послужило причиной высокой степени плавления мантии и образования больших объемов высокотемпературных магм с содержанием MgO ≥ 32% [19, 20]. Потеря тепла привела к тому, что к окончанию архея внутри Земли формируется внутреннее металлическое ядро. Сейчас трудно сказать, как это сказалось на дипольном характере земного магнитного поля, но именно с конца архея в породах начинают определяться палеомагнитные характеристики, которые в руках геологов стали инструментом для распознавания важных событий геологического прошлого, прежде всего — для реконструкций древних континентов.

В соответствии с геологическими и палеомагнитными данными, первый суперконтинент Кенорленд возник около 2700 млн лет назад [1]. С этого момента в геологической истории Земли наступила эпоха суперконтинентальных циклов [21]. Их важная характеристика — перемещение континентальных масс в горизонтальном направлении — стала свидетельством зарождения в конце архея механизмов тектоники литосферных плит. Тем не менее до их доминирования оставалось еще около 700 млн лет.

Эпоха от 2.7 до 2.0 млрд лет — переходная между тектоникой ранней (>2700 млн лет) Земли и современной тектоникой [17, 22]. В этот интервал времени закончилось формирование основных внутренних оболочек планеты, на границе ядра и мантии возник слой D″, в результате развития процессов субдукции произошло разделение мантии на верхнюю и нижнюю, а общемантийная конвекция сменилась двухъярусной.

Переходный период четко фиксируется по смене целого ряда фундаментальных характеристик (рис.5), отразивших изменение состава

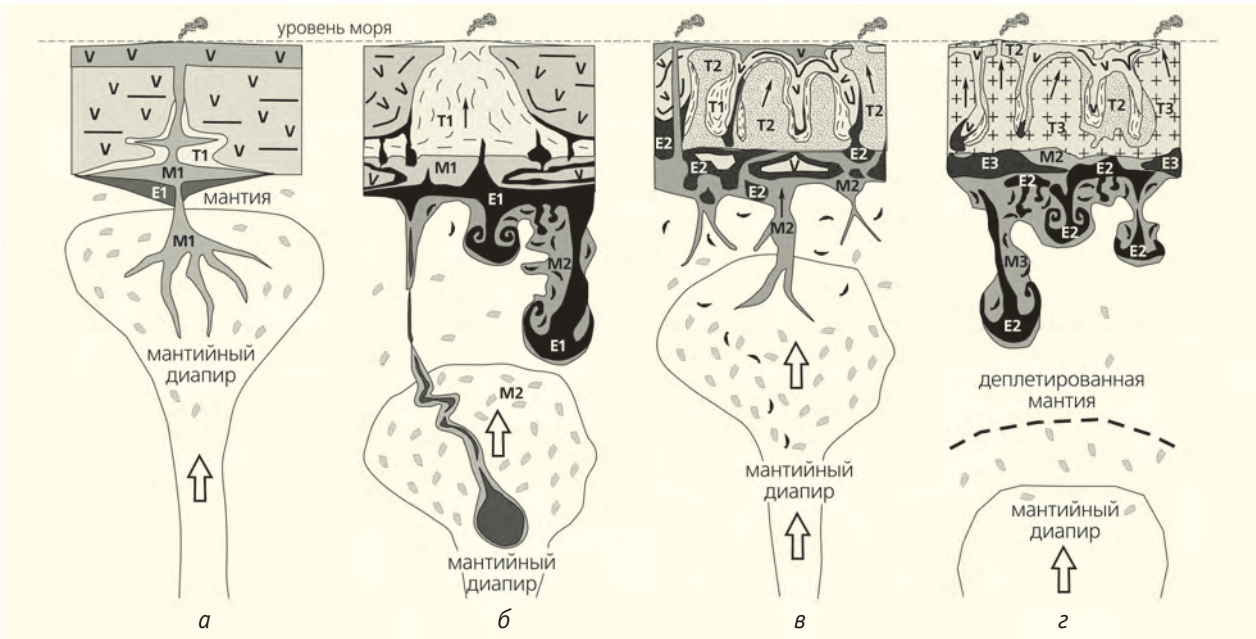


Рис.4. Модель формирования тоналитовых расплавов под влиянием мантийных плюмов в ранней истории Земли [18]: *а* — мантийный плюм — источник расплавов (M1), образующих мощную вулканическую кору; расплавы, задержавшиеся в ее основании, подплавляют ее и формируют тоналитовые расплавы (T1); *б* — более легкие расплавы T1 поднимаются в кору; реститы и кумуляты (E1) погружаются в мантию, где частично смешиваются со второй генерацией мантийных расплавов (M2); *в* — расплавы M2 воздействуют на основание коры и плавят участвующий в ее строении материал; формируется вторая генерация менее плотных тоналитовых расплавов (T2); *г* — с прекращением второго импульса магматизма низы коры остывают, частично отслаиваются и погружаются в мантию; этот процесс провоцирует мантийное плавление с образованием расплавов M3. Их воздействие на ранее сформированные тела M2 и реликты лав приводит к формированию третьей генерации тоналитов и гранодиоритов T3 и реститов генерации E3.

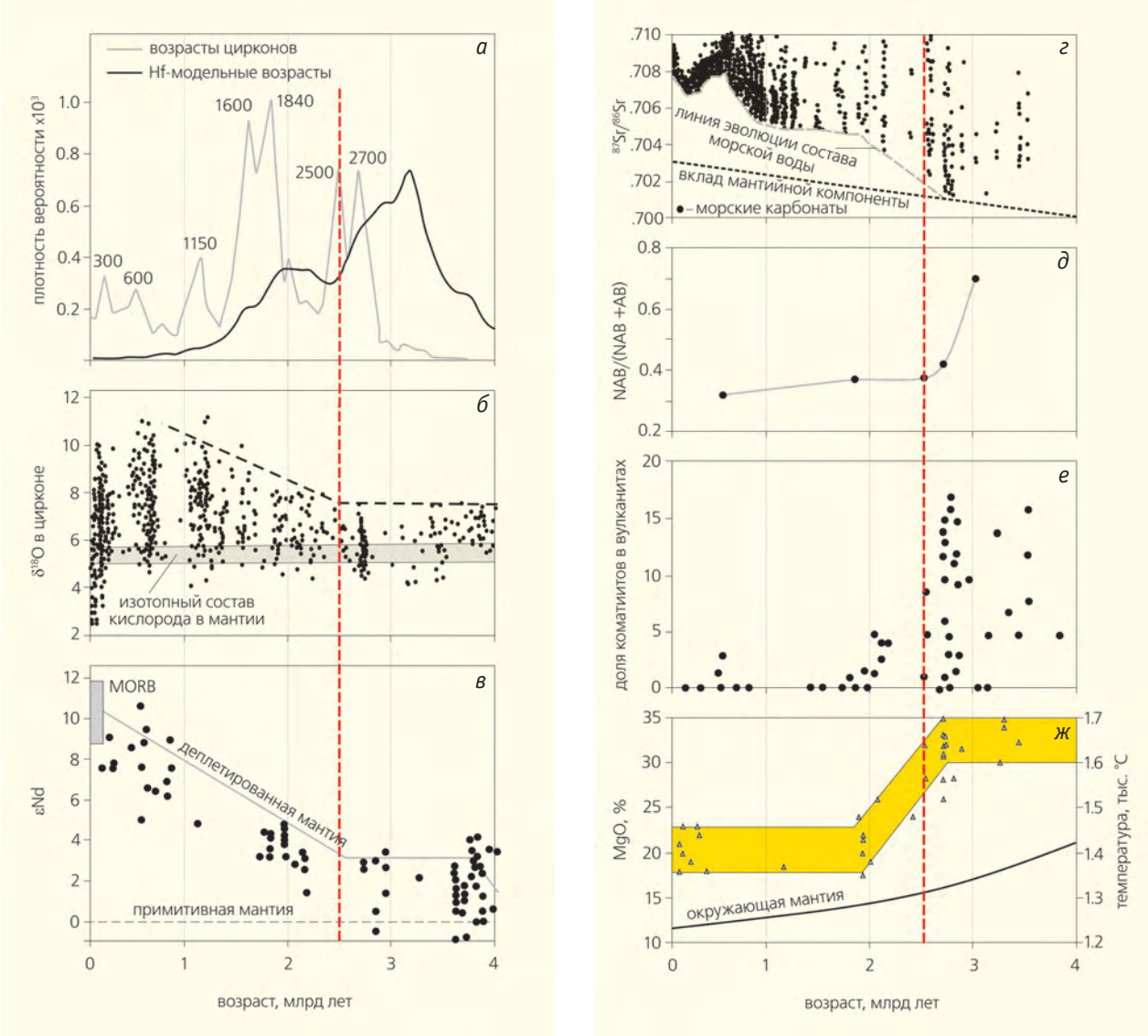


Рис.5. Корреляции вещественных параметров, характеризующих состояния земных оболочек и мантийных разновременных слоев в процессе эволюции планеты [22]: *а* — распределение возрастов цирконов и соответствующих им модельных (по изотопам Hf) возрастов [23]; *б* — вариации изотопного состава кислорода ($\delta^{18}O$) в цирконах из гранитоидов [16]; *в* — вариации изотопного состава неодима εNd в породах раннего архея, зеленокаменных поясов и конвергентных границ плит [1]; *г* — вариации изотопного состава стронция ($^{87}Sr/^{86}Sr$) в морской воде в течение геологической истории [1]; *д* — соотношения океанических базальтов, не связанных с магматическими дугами (NAB) и связанных с ними (AB), в течение всей геологической истории [1]; *е* — изменение доли коматиитов в составе магматических поясов в течение геологического времени [24]; *ж* — вариации и максимальные содержания MgO в коматиитах и пикритах, связанных с остыванием окружающей мантии [19].

источников магматических и осадочных пород, а также условий их формирования [22]. Тогда радикально модифицировались такие важные эндогенные системы Земли, как магматизм и магматогенное рудообразование. Если в гадее и архее ведущими магматическими ассоциациями были коматиит-базальтовые и трондьемит-тоналит-гранодиоритовые, то в переходный период их арсенал резко расширился. Появились новые группы и семейства пород, в том числе известково-щелочной, субщелочной и щелочной серий. В тот период резко возросла роль магматических ассоциаций андезит-дацитового ряда, которые несли метки формирования в субдукционных условиях. Стали проявляться принципиально новые рудообразующие процессы, существенно расширившие круг эндогенных полезных ископаемых в структурах коры. Начали формироваться полиметаллические месторождения, редких и благородных металлов и редких земель.

К рубежу ~2.7 млрд лет относятся изменения изотопного состава Nd в продуктах мантийного плавления. В магматических ассоциациях стали преобладать породы с характеристиками деплетированной (верхней, геохимически истощенной) мантии. Этот факт указывает на то, что к концу архея завершилось разделение мантии на верхнюю и нижнюю, более обогащенную несовместимыми элементами.

К этому времени относится также возникновение первой суши. Раньше поверхность Земли была слабо дифференцирована и в основном покрыта водами Мирового океана. 2.5 млрд лет назад размеры суши достигли таких объемов, которые отразились в составе отложений, и в частности в изотопном составе стронция морских вод (см. рис.5,*г*). Он формируется из двух основных источников: лав, излившихся на дно океана, и осадков, образовавшихся при разрушении континентальной коры. Изотопный состав стронция в карбонатах архейского океана практически равновесен с породами основных и ультраосновных лав его ложа. Примерно 2.7 млрд лет назад отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в карбонатах (см. рис.5,*г*) начало отличаться от мантийного и с тех пор постепенно растет. Это указывает на появление в водах океана дополнительного источника стронция с характеристиками континентальной коры и, соответственно, на образование в поверхностных структурах Земли суши, поставляющей осадочный материал в океаны.

Близкие выводы о времени формирования континентальной коры и суши следуют также из данных по изменению изотопного состава кислорода ($\delta^{18}O$) в источнике магматических пород (см. рис.5,*б*). Смена источников связывается с возникновением осадочных пород, образовавшихся в результате размыва материковой суши, т.е. с появлением ее значительных объемов. Формирование материков сопровождалось ростом поднятий, породы которых подвергались интенсивному химическому выветриванию. Обогащенные тяжелым изотопом кислорода (^{18}O) измененные породы разрушались и слагали осадки, которые в дальнейшем стали источником гранитных расплавов. Этот процесс — основная причина роста величины $\delta^{18}O$ в постархейских гранитоидах.

К границе архея и протерозоя относится и так называемая Великая кислородная революция (ВКР) — глобальное изменение состава атмосферы Земли, произошедшее 2460–2426 млн лет назад. Его результатом стало появление в атмосфере свободного кислорода, определившего смену восстановительных условий в атмосфере на окислительные. Природа этого события таит в себе много загадок. В земных недрах кислород, как правило, находится в связанной форме. В свободном виде он практически не может существовать, так как сразу расходуется на окисление горных пород и минералов. Эндогенная природа кислорода, появившегося в атмосфере на рубеже архея и протерозоя, скорее всего, исключается.

На Земле важнейший механизм высвобождения кислорода из химически связанного состояния в свободную форму — фотосинтез. В ранние эпохи развития фотосинтезирующими организмами были цианобактерии. Можно предположить, что на рассматриваемое время пришлась вспышка образования сообществ этих микроорганизмов. Однако результаты обобщения геохимических исследований, выполненные Т.Лайонзом с соавторами, показывают, что в архее продуцировалось столько же органического углерода, сколько и в более поздние геологические эпохи [26]. Это позволило авторам сделать вывод, что, хотя фотосинтетики и существовали в архее, их деятельность была вторичной по отношению к доминирующим анаэробным процессам. Выделяемый ими кислород практически сразу расходовался на окисление горных пород и растворенных соединений гидросферы .

Ответ на вопрос о природе ВКР и ее приуроченности к границе архея и протерозоя пришлось искать в совокупности таких геологических процессов, которые могли изменить условия в атмосфере и тем самым способствовать образованию свободного кислорода. Исследования, проведенные в Южной Африке, показали, что появление свободного кислорода, зафиксированное горизонтами окисленных пород и минералов, тесно сопряжено с принципиально новыми геологическими процессами. К их числу относится и образование суперконтинента Кенорленд, т.е. первой суши в более или менее значимых размерах; и гуронское оледенение, охватившее всю Землю; и распад суперконтинента под действием мантийного плюма. Эти процессы сопровождались изменениями характера магматизма. В том числе менялся состав вулканических газов, а соответственно, и химические составы океана и атмосферы. Предполагается, что в атмосфере уменьшилось количество сернистых газов и метана, на окисление которых тратился весь свободный кислород. Возможно, одним из следствий таких изменений стало снижение количества парниковых газов, послужившее толчком для глобального оледенения. В условиях суши деятельность фотосинтетиков способствовала поступлению кислорода прямо в атмосферу. В ней неокисленных соединений содержалось существенно меньше, чем в водной среде, которая доминировала на поверхности Земли в более ранние времена. Это обеспечивало большую сохранность кислорода в атмосфере и дальнейшее его накопление. В решении проблемы ВКР еще много вопросов, связанных с реконструкцией развития органического мира на ранних стадиях развития нашей планеты. Но они уводят в сторону от темы нашего повествования и потому здесь не обсуждаются. Нам представляется, что имеющиеся данные позволяют сейчас сделать следующий промежуточный вывод. Несмотря на то что ВКР не была результа-

том конкретного геологического процесса, она стала следствием кумулятивного эффекта от серии геологических событий, которые создали условия для появления свободного кислорода в атмосфере Земли и тем самым способствовали ускорению эволюции живого вещества.

Характер развития Земли 2.7–2.0 млрд лет назад, очевидно, связан с процессами, протекающими во внутренних оболочках планеты, а также с формированием новых. Во-первых, как уже отмечалось, на рубеже 3.0–2.7 млрд лет назад стали активно проявляться элементы тектоники плит. Это вело к тому, что часть погружающихся литосферных плит оставалась на границе верхней и нижней мантии, разделяя ее и создавая условия для формирования двухъярусной конвекции. Меньшая часть субдуцируемой литосферы погружалась до границы ядро—мантия и, очевидно, 2.7–2.0 млрд лет назад послужила основой для формирования слоя D″ — пограничного между ядром и мантией. В какой-то степени этот процесс можно наблюдать по изменению состава глубинных плюмов, поднимавшихся от границы ядро—мантия (см. рис.5,*ж*), что детально описано Л.Кэмпбеллом и Р.Гриффитсом [19]. Магма таких плюмов 3.4–2.7 млрд лет назад содержала постоянное количество MgO — около 32±2.5 мас.%, что соответствовало температуре расплавов не менее 1650±5°C. Как полагают авторы указанной работы, архейские плюмы формировались на термальной границе, отвечающей поверхности ядра. Их температура оставалась постоянной и соответствовала температуре внешнего жидкого ядра, которая сохранялась благодаря буферирующему эффекту кристаллизации внутреннего твердого железно-никелиевого ядра. 2.7 млрд лет назад плотная субдуцированная литосфера стала накапливаться на внешней границе ядра, создавая разделяющий мантию и ядро изоляционный слой D″, который последовательно понижал тепловой поток из ядра, а соответственно, и температуру глубинных плюмов (см. рис.5,*ж*). Постепенно толщина этого слоя достигла критических значений, необходимых для формирования внутренней конвекции [19]. Слой D″ изолировал мантию от непосредственного контакта с ядром, что и вызвало понижение температуры на их общей границе. Если на верхней границе ядра температура составляет около 3800–4200 К, то на верхней границе слоя D″ — 2700–2800 К [28]. Таким образом, буферный слой D″ при своей средней мощности около 200 км обеспечил перепад температур более чем в 1000 К и стал регулятором снижения температуры в основании мантии.

Процессы формирования слоя D″ и тектоники плит оказались тесно связанными, хотя и разделяются практически всем объемом мантии. Если слой D″ регулирует взаимодействие ядра и мантии, то субдукция послужила причиной интенсивной переработки и дифференциации земной коры и верхней мантии. В результате порожденных субдукцией процессов магматизма и метаморфизма кора разделилась на нижнюю, существенно базитовую, и верхнюю, обогащенную гранитным веществом. Важным агентом в этих трансформациях стала морская вода, вовлеченная совместно с субдуцированной литосферой в мантию. Она рециклировала (т.е. вновь перемещалась к поверхности),

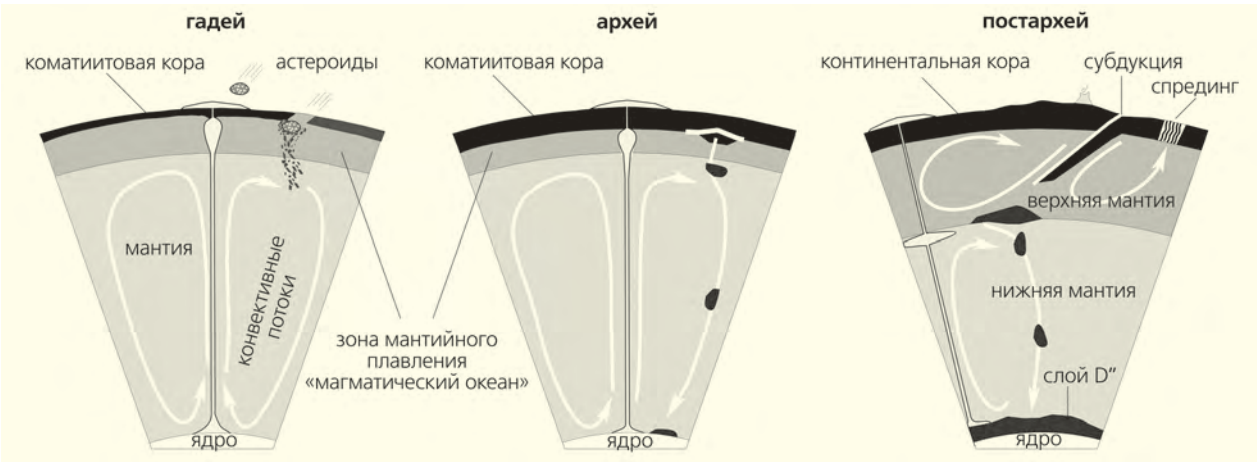


Рис.6. Эволюция стилей геодинамического развития Земли 4.5–2.7 (2.0) млрд лет назад [22]. В гадее первичная кора наращивалась за счет излияний, питаемых восходящими мантийными плюмами, и разрушалась при астероидных бомбардировках. В архее происходил рост коры за счет длительных платокоматиитовых излияний. По достижении большой мощности ее нижние горизонты подвергались эклогитизации. В дальнейшем эклогитизированные блоки погружались до границы ядра и мантии, где они закладывали основу для формирования слоя D″, который изолировал ядро; мантия охлаждалась, изменялась система конвективных потоков. Фазовые переходы в минералах разделили мантию на верхнюю и нижнюю. Постархей — протерозойский переходный период характеризовался началом и эволюцией процессов субдукции, формированием зон спрединга и ростом горных сооружений.

понижая температуру плавления мантии и низов коры, способствовала образованию расплавов с широким спектром составов, а также их обогащению металлами, редкими элементами и др. В конечном итоге благодаря процессам субдукции возникло большинство месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. Схематично смена стилей тектонических движений от гадейского эона до переходного периода показана на рис.6.

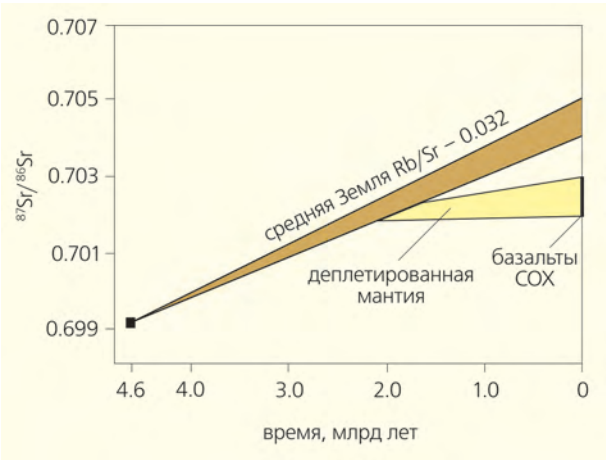
Поздние эпохи

Итак, окончательное изменение в составе отдельных оболочек Земли произошло 2.0 млрд лет назад [22]. К тому времени завершилось формирование деплетированной мантии нашей планеты, которая потеряла значительную часть литофильных элементов, перешедших в континентальную кору. Произошла дифференциация последней на базитовый и гранитный слои. Геологическим показателем такой дифференциации стало образование на рубеже 1.9 млрд лет огромной массы гранитов-рапакиви, обогащенных литофильными элементами. Деплетированная мантия стала основным поставщиком базальтов срединно-океанических хребтов.

С того времени в развитии Земли четко прослеживаются суперконтинентальные циклы [29]. Начало им, как уже отмечалось, положило образование в конце архея суперконтинента Кенорленд, который прекратил свое существование 2.1 млрд лет назад. Около 1.8 млрд лет назад возник суперконтинент Колумбия (или Нуна), распавшийся 1.4 млрд лет назад. Позднее, около 1 млрд лет назад, сформировался суперконтинент Родиния, прекративший свое существование 0.8–0.7 млрд лет назад. Около 300 млн лет назад образовался суперконтинент Пангея, раскол которого начался в ранней юре (200–180 млн лет назад) и привел к обособлению современных континентов.

Общее в этих суперконтинентальных циклах — смена доминирующих геодинамических механизмов. На ранней стадии образования суперконтинентов ведущую роль играли механизмы тектоники плит, определявшие перемещение отдельных блоков (континентов и микроконтинентов) к общему центру [22]. Блоки сталкивались, и вдоль их границ формировались орогенные пояса. Субдуцированная литосфера (главным образом океаническая) погружалась в мантию. Значительная ее часть сохранялась на границе верхней и нижней мантии, другая же отрывалась и в виде фрагментов слэбов погружалась до слоя D″, нарушая сложившееся в нем термальное равновесие. В результате формировался поток горячей мантии, который восходил от слоя D″ и компенсировал поступление в низы мантии фрагментов литосферных слэбов. Этот поток в виде огромного гриба (суперплюма) поднимался до границы нижней и верхней мантии, где преобразовывался в серию небольших плюмов. Последние воздействовали на литосферу суперконтинента, раскалывая его на более мелкие континентальные массы [30].

Еще один значительный процесс после рубежа 2.0 млрд лет — образование Африканского и Тихоокеанского горячих полей мантии [31], или мантийных провинций с пониженными скоростями сейсмических волн [32]. Соответствующие этим



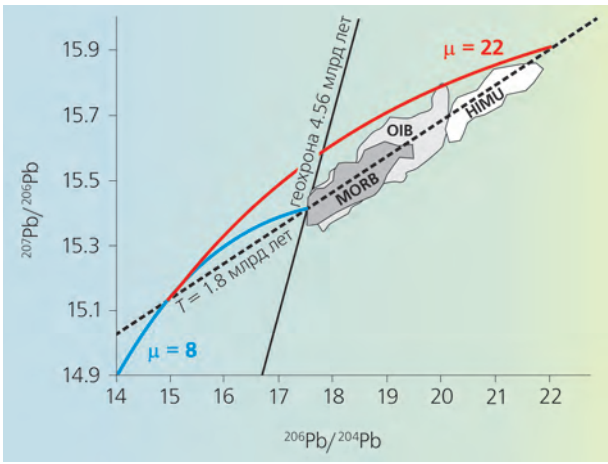


Рис.7. Графики, определяющие время формирования деплетированного (астеносферного) слоя мантии (источника базальтов срединно-океанических хребтов, MORB) и обогащенных базальтов океанических островов (Африканского и Тихоокеанского горячих полей мантии) [21]. Слева — состав изотопов стронция, показывающих время отделения деплетированной мантии [34]. Справа — график изменения состава изотопов свинца в базальтах MORB, OIB (океанических островов) и HIMU (с высоким μ = U/Pb) [33]. Темно-синяя линия — тренд эволюции состава мантии (от момента образования Земли до настоящего времени) с величиной μ = 8. Красная линия — тренд изменения состава обогащенной мантии с величиной μ = 22. Пунктирная черная линия аппроксимирует изотопные составы разных базальтов и отвечает времени (около 1.8 млрд. лет назад) образования их источников в составе мантии.

событиям мантийные пертурбации, по-видимому, нашли отражение в свинцовой изотопной системе базальтов океанических островов и срединно-океанических хребтов. На рис.7 видно, что их составы образуют тренд, наклон которого соответствует возрастной зависимости в 1.8 млрд лет [33]. Этот тренд позволяет оценить возраст существующей гетерогенности мантии. Низкоскоростные мантийные провинции (суперплюмы) по сравнению с окружающей мантией более горячие. Они представляют собой восходящие мантийные потоки и играют важную роль в современной геодинамике Земли. Например, Африканское горячее поле мантии сыграло роковую роль в судьбе Пангеи, вызвав продолжающееся до сих пор ее дробление. Таким образом, именно последние 2 млрд лет геологической истории отвечают окончательному становлению современного стиля тектонических движений на Земле. Выделение деплетированной мантии (источника базальтов срединно-океанических хребтов) можно определить по изменению изотопов стронция, которые показывают, что этот мантийный резервуар образовался также около 2.0 млрд лет назад [34].

Уникальная планета

Уникальность Земли определяется, во-первых, ее положением в той части Солнечной системы, где возможно возникновение жизни; во-вторых, особыми условиями ее внутреннего саморазвития, которые создали предпосылки для появления живых организмов и их эволюции вплоть до высших форм. На нашей планете реализовались геологические механизмы, обусловившие образование многочисленных месторождений полезных ископаемых, без использования которых возникновение человеческой цивилизации было бы невозможно.

И ныне наша планета остается тектонически активной. В геологических процессах, которые определяют формирование различных структур на континентах и в океанах, образование полезных ископаемых, естественные изменения окружающей среды и климата, принимают участие все оболочки Земли, включая атмосферу и гидросферу. Конечно, окончательно понять роль каждой оболочки в эволюции планеты пока еще нельзя, но очертить их значение попробуем.

Ядро, формирующее магнитное поле, определяет главное наше комфортное существование, не допуская на поверхность Земли смертоносные космические лучи. Внешнее ядро по плотности отличается от внутреннего, что, скорее всего, связано с наличием в нем легких летучих компонентов, которые, поднимаясь в слой D″, вызывают образование плюмов. В одной из последних сводок, выполненной К.Литасовым и А.Шацким, говорится, что легкими компонентами ядра могли быть Si, S, O, C, H и N [28]. Понятно, что они сохранились в жидком ядре во время кристаллизации внутреннего металлического, но когда и как они первоначально оказались в ядре, пока не ясно.

Мантийные плюмы, поднимаясь от ядра к поверхности, несут энергию для взаимодействия двух верхних оболочек — литосферы и астеносферы. Плюмы — важнейший элемент нижнемантийной конвекции. Их подъем вверх компенсируется погружением холодного субдуцированного вещества вниз, в слой D″. Нижнемантийная конвекция поддерживает мелкоячеистую верхнемантийную конвекцию.

Происходящие на Земле процессы отражены в ее современном рельефе, который чрезвычайно разнообразен — от обширных океанических котловин и континентальных равнин до узких горных систем, островных дуг и цепочек островов. Активные геологические процессы проявляются в виде сейсмических катастроф, вулканизма, гидротермальной (в том числе рудообразующей) деятельности. Кроме того, они во многом определяют климат планеты, состояние атмосферы и гидросферы.

В значительной степени характер современной активности Земли обусловлен механизмами тектоники литосферных плит, в которой взаимодействуют два слоя — литосфера и астеносфера. Они определяют формирование литосферных плит, рождение и закрытие океанических бассейнов, а вместе с веществом плюмового магматизма способствуют образованию месторождений полезных ископаемых. Рост гор, их разрушение, а также различные газы, поступающие из недр планеты, определяют изменения климата, появление холодных и теплых периодов, к приходу которых человечество должно готовиться.

Так схематично можно представить современную геолого-тектоническую жизнь нашей планеты.

Познавать историю Земли и понимать ее дальнейшее развитие необходимо для жизни последующих поколений землян, а также чтобы постичь устройство других планет и Космоса в целом. ■

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ (НШ-9638.2016.5) и Программы Президиума РАН №15.

Литература

1. *Condie K.C.* Earth as an evolving Planetary System. Elsevier, 2011.
2. *Батыгин К., Лафлин Г., Морбиделли А.* Рожденные из хаоса // В мире науки. 2016. №7. С.16–27.

3. *Лин Д.* Происхождение планет // В мире науки. 2008. №8. С.22–31.
4. *Masset F., Snellgrove M.* Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2001. V.320. №4. L55–L59.
5. *Goldblatt C., Zahnle K.J., Sleep N.H., Nisbet E.G.* The eons of chaos and hades // Solid Earth. 2010. V.1. P.1–3 (http://dx.doi.org/10.5194/se-1-1-2010).
6. *Wood B.* The formation and differentiation of Earth // Physics Today. 2011.V.64. №12. P.40–45 (http://dx.doi.org/10.1063/PT.3.1362).
7. *Костицын Ю.А.* Возраст земного ядра по изотопным данным: согласование Hf—W и U—Pb систем // Геохимия. 2012. №6. С.531–554.
8. *Кузьмин М.И.* Докембрийская история зарождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Статья I // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V.5. №3. P.625–640.
9. *Хейзен Р.* История Земли (от звездной пыли — к живой планете). М., 2015.
10. *Nebel O., Rapp R.P, Yaxley G.M.* The role of detrital zircons in Hadean crustal research // Lithos. 2014. V.190–191. P.313–327.
11. *Taylor D.J., McKeegan K.D., Harrison T.M.* Lu—Hf zircon evidence for rapid lunar differentiation // Earth and Planet. Sci. Lett. 2009. V.279. P.157–164.
12. *Grange M.L., Pidgeon R.T., Nemchin A.A. et al.* Interpreting the U—Pb data from primary and secondary features in lunar zircon // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2013. V.101. P.112–132 (http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.013).
13. *O'Neil J., Carlsona R.W., Paquetteb J.-L., Francisc D.* Formation age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt // Precamb. Res. 2012. V.220– 221. P.23–44.
14. *Debaille V., O'Neill C., Brandon A.D. et al.* Stagnant-lid tectonics in early Earth revealed by ^{142}Nd variations in late Archean rocks // Earth and Planet. Sci. Lett. 2013. V.373. P.83–92.
15. *Bottke W.F., Vokroublicky D., Minton D. et al.* An Archean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt // Nature. 2012. V.485. P.78–81.
16. *Valley J.W., Lackey J.S., Cavosie A.J. et al.* 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon // Contrib. Mineral. Petrol. 2005. V.150. P.561–580.
17. *Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Эрнст Р.Е.* Тектоническая активность Земли на ранних этапах (4.56–3.4 (2.7?)) ее эволюции // Геология и геофизика. 2016. Т.57. №5. С.815–832.
18. *Bédard J.H.* A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2006. V.79. P.1188–1214.
19. *Campbell I.A., Griffiths R.W.* Did the formation of D″ cause the Archean-Proterozoic transition? // Earth and Planet. Sci. Lett. 2014. V.388. P.1–8.
20. *Ernst R.E.* Large igneous provinces. Cambridge, 2014.
21. *Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Тектоника плит и мантийные плюмы — основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016. Т.57. №1. С.11–30.
22. *Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Изменение стиля тектонических движений в процессе эволюции Земли // Докл. АН. 2016. Т.469. №6. С.706–710.
23. *Condie K.C., Aster R.C.* Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth // Precamb. Res. 2010. V.180. P.227–236.
24. *de Wit M.J., Ashwal L.D.* Greenstone belts: what are they? // South African J. of Geology. 1995. V.98. P.505–520.
25. Магматические горные породы. Т.6. Эволюция магматической истории Земли. М., 1987.
26. *Lyons T.W., Reinhard C.T., Planavsky N.J.* The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere // Nature. 2014. V.506. P.307–315.
27. *Gumsleya A.P., Chamberlainb K.R., Bleekerd W. et al.* Timing and tempo of the Great Oxidation Event // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. V.114. №8. P.1811–1816.
28. *Литасов К.Д., Шацкий А.Ф.* Состав и строение ядра земли. Новосибирск, 2016.
29. *Li Z.X., Zhong S.* Supercontinent—superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole-mantle tectonics // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2009. V.176. P.143–156.
30. *Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. Т.55. №2. С.153–184.
31. *Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И.* Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника. 1983. №1. С.28–45.
32. *Dziewonski A.M.* Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P-velocity up to degree and order 6 // J. of Geophys. Res. 1984. V.89. P.5929–5952.
33. *Hofmann A.W.* Mantle geochemistry the message from oceanic volcanism // Nature. 1997. V.385. P.219–229.
34. *Кузьмин М.И.* Тектоника литосферных плит и геохимия // Современные проблемы теоретической и прикладной геохимии. Новосибирск, 1987. С.19–26.

Сельское хозяйство России в «экологическом зеркале»

Н.Н.Клюев

Николай Николаевич Клюев, *доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии РАН. Область научных интересов — экономическая география, геоэкология, эколого-экономическое моделирование региональных систем, теоретические и региональные проблемы природопользования, природоохранные проблемы России и ее регионов.*

Ключевые слова: сельское хозяйство, природопользование, экология.
Key words: agriculture, nature management, ecology.

В Советском Союзе времен перестройки в качестве непременных условий экологизации сельского хозяйства рассматривались развитие частного предпринимательства на селе, приватизация земли, ликвидация колхозов. С 1991 г. российская аграрная сфера претерпела сильные трансформации: была ликвидирована колхозно-совхозная система, возникла частная собственность на землю, сформировались фермерские хозяйства, начали развиваться крупные агрохолдинги. Рассмотрим некоторые реальные и потенциальные экологические последствия постсоветских изменений в сельском хозяйстве России и ее регионов.

К 2015 г. 21 российский регион заметно превысил объем сельскохозяйственного производства 1990 г. Достигли или почти достигли его 16 регионов, их индекс производства продукции сельского хозяйства варьирует от 95 до 105%. Вместе с тем более чем в половине регионов России этот индекс составляет от 7 до 94%*. Лидерами выступают центрально-черноземные области и республики Северного Кавказа (Дагестан, Кабардино-Балкария), а аутсайдерами — дальневосточные и северные регионы. Однако российские регионы неравнозначны по объему аграрного производства. Наибольшие абсолютные потери производства — в масштабах страны — наблюдаются не на севере и востоке России (где максимальные относительные потери), а в Московской, Тверской, Нижегородской и Курганской областях.

Новая агрогеографическая реальность — это изменение сельскохозяйственной специализации. Например, в 1990 г. животноводство давало 65.5% аграрной продукции, а в 2015 г. — только 47.7%. Вследствие этого изменился аграрный профиль российских регионов. В конце 1980-х годов растениеводство преобладало лишь в нескольких юго-западных районах, ныне же оно доминирует уже почти в половине регионов России. Соответственно, сильно уменьшились (на 15 млн га) площади естественных кормовых угодий — сенокосов и пастбищ.

За 1990–2015 гг. посевные площади сельскохозяйственных культур сократились на треть. В целом это экологически позитивный процесс, особенно в степных и лесостепных районах страны, но его стихийное течение снижает потенциальную экономическую и природоохранную эффективность земель. Причин этого несколько. Во-первых, вывод из оборота сельскохозяйственных площадей происходит на периферии регионов и сопровождается интенсификацией землепользования в городах, пригородах и селах — как раз там, где нагрузки на агроландшафты и ранее были повышены. Во-вторых, выводимые из сельскохозяйственного оборота земли необходимо «устраивать». Они могут и должны выполнять другие социально-экономические и экологические функции — естественных кормовых угодий, рекреационные, охраняемых территорий. Пока

* Здесь и далее, если не указано иное, рассчитано по официальным данным [1–5].

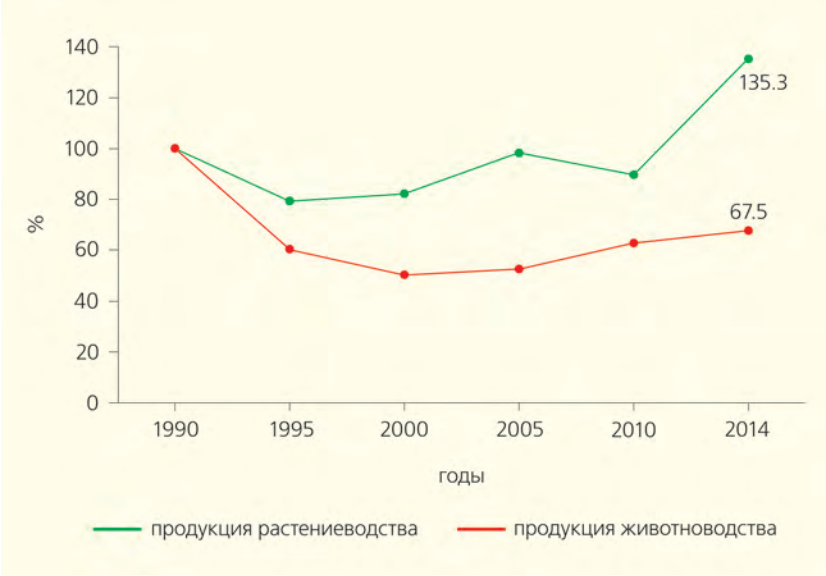
© Клюев Н.Н., 2017

же неиспользуемые агроценозы покрываются зарослями сорной растительности и выступают рассадниками вредителей и болезней сельскохозяйственных культур. В-третьих, выбывание земель из оборота должно сопровождаться повышением эффективности использования и улучшением экологического состояния сохраняющихся агроценозов, чего отнюдь не наблюдается. Из-за отсутствия средств не выполняются мероприятия по сохранению и повышению плодородия почв — агротехнические, агрохимические, мелиоративные, фитосанитарные, противоэрозионные.

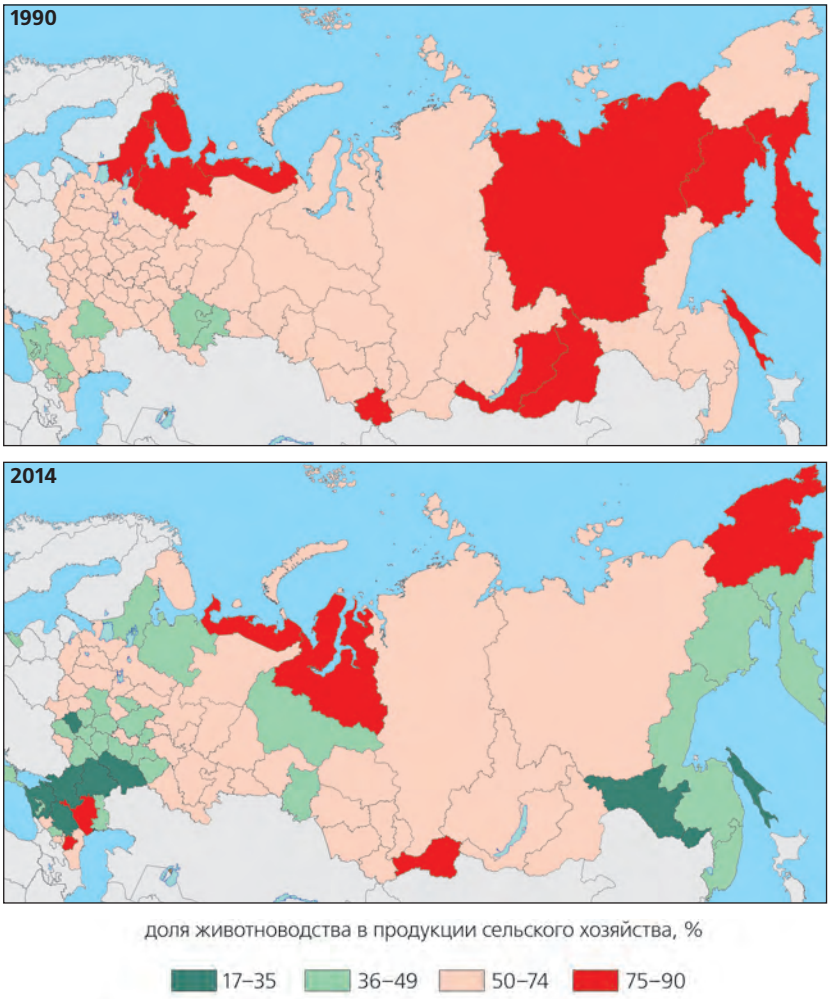
Масштабное запустение сельскохозяйственных земель, утрачивающих хозяйственную ценность и эстетическую привлекательность, наряду с депопуляцией сельской местности представляет реальную угрозу для национального достояния России — ее сельских культурных ландшафтов, формировавшихся столетиями.

В результате масштабного сокращения посевных площадей и резкого снижения поголовья скота изменился характер и масштаб аграрных воздействий на природные компоненты и комплексы, а вместе с ними и весь облик современных сельских ландшафтов. Так, традиционный для Нечерноземья лесолугово-полевой ландшафт в некоторых районах трансформировался в лугово-лесной.

Соотношение растениеводства и животноводства, помимо собственно хозяйственного, имеет и важное экологическое значение. Оно определяет тип и интенсивность аграрных нагрузок на природу, пропорции между видами сельскохозяйственных угодий (пашнями, сенокосами, пастбищами). Например, сокращение поголовья сельскохозяйственных животных может иметь вполне позитивные природоохранные следствия. Уменьшаются потребности в кормовой базе, следовательно, сокращаются объемы



Индексы продукции растениеводства и животноводства в России за 1990–2014 гг. Уровень 1990 г. соответствует 100%.



Доля животноводства в продукции сельского хозяйства регионов России.

выращивания кормовых культур, среди которых велика доля пропашных, обедняющих почву и стимулирующих эрозию. Снижаются нагрузки на пастбищные ландшафты, что особенно важно для регионов, подверженных опустыниванию. Напротив, сильное сокращение поголовья сельскохозяйственных животных нарушает гармонию между животноводством, производящим отходы, и земледелием — их главным потребителем. Многократное снижение внесения органических удобрений на российские поля — это во многом следствие резкого уменьшения поголовья скота: удобрения просто некому производить.

Конечно, абстрактная постановка вопроса об оптимальном соотношении животноводства и растениеводства — вне анализа природно-экономических условий конкретных хозяйств — лишена всякого смысла. Однако и в дорефоменный период, когда поголовье сельскохозяйственных животных было намного больше, аграрная сфера испытывала дефицит органических удобрений. В последнее десятилетие в черноземных областях России ведется интенсивное строительство крупных животноводческих комплексов. Это обостряет давнюю проблему утилизации локализующихся вблизи них крупнотоннажных отходов. Из-за дороговизны транспортировки, нехватки техники и организационных факторов значительная часть навозных и пометных стоков не используется в качестве удобрений, а сбрасывается в навозохранилища, пруды-накопители, на очистные сооружения, прилегающие земли и в водные объекты. Это, естественно, негативно сказывается на качестве воды в водоемах и водотоках.

К началу 1990-х годов на российских пахотных почвах был создан запас питательных веществ, но ныне баланс безнадежно отрицателен. Вынос питательных веществ из почвы с урожаем должен компенсироваться внесением удобрений. Сегодня в целом по России вынос азота компенсируется лишь на 15%, фосфора — также на 15%, калия — всего на 5% [6]. В то время как отечественному крестьянину минеральные удобрения недоступны по цене, Россия экспортирует свыше 80% производимых удобрений.

Прогрессирующая деградация почв связана и с резким уменьшением объемов известкования кислых почв (в 16 раз за 1990–2014 гг.) и гипсования солонцовых почв (в 106 раз).

В структуре продукции фермерских хозяйств доля животноводства составляла в 1995 г. 32.3%, а в 2015 г. снизилась до 21.4%. В отдельных регионах эта доля намного меньше: например, в Курской обл. — только 7.5%.

Вследствие сильного сокращения продукции отечественного животноводства резко возрос импорт продовольствия* [7]. Складывается своеобразная продовольственно-производственная цепочка, экономически и экологически невыгодная нашей стране: экспорт Россией минеральных удобрений (простых питательных веществ) — производство за рубежом и ввоз в Россию мяса и молока (сложных питательных веществ). Формирование такой цепочки вряд ли можно считать рациональным включением в международное разделение труда. Нынешняя продовольственная зависимость не просто унизительна для великой в прошлом сельскохозяйственной державы, это реальная угроза национальной безопасности. Немаловажно и то, что качество отечественного продовольствия зачастую пока еще лучше зарубежного по показателям санитарной и экологической безопасности.

Современное земледелие базируется на управляемом двустороннем (дренаж плюс ирригация) регулировании гидрологического, термического и других почвенных режимов. В постсоветской России мелиорируемые площади сокращаются, гидротехнические системы разрушаются. На их месте развиваются деградационные явления: пожары на осушенных торфяных почвах, вторичное заболачивание, засоление. В итоге продуктивные угодья теряют свою хозяйственную ценность, а оставшиеся в обороте земли эксплуатируются в условиях стихийного, нерегулируемого режима. Это — один из признаков примитивизации отечественного сельского хозяйства.

В России на 1 января 2015 г. лишь 27% мелиорированных земель находились в хорошем состоянии, при этом в Брянской, Рязанской, Свердловской, Челябинской областях, Еврейской АО, Адыгее, Северной Осетии таких земель не было совсем, а еще в половине регионов России их доля не превышала 10% [8]. Между тем только эти земли могут считаться улучшенными, экологически ценными, а остальные — скорее наоборот. Отнюдь не случайно катастрофические природные пожары лета 2010 г. затронули те регионы, где велики площади заброшенной пашни и ранее мелиорированных земель, находящихся теперь в неудовлетворительном виде.

В пореформенном сельском хозяйстве наблюдается, на первый взгляд, парадоксальный эффект расхождения индексов производства сельскохозяйственной продукции, с одной стороны, и индексов используемых ресурсов (посевных площадей, поголовья скота, применения органических и минеральных удобрений, техники, электроэнергии и т.п.) — с другой. На единицу продукции расходуется все меньше ресурсов. На первый взгляд, это интенсификация производства, и она действительно наблюдается в отдельных хозяйствах за счет использования новой техники, технологий, урожайных сортов растений и продуктивных пород скота и т.п. Так, в сельскохозяйственных организациях надой молока на одну корову за 1990–2015 гг. возрос с 2731 до 5699 кг, но поголовье коров сократилось почти вдвое. А настриг

* В связи с введением режима «контрсанкций» с 2014 г. импорт продовольственных товаров существенно сократился.

шерсти с одной овцы и вовсе снизился с 3.9 до 2.5 кг.

Существенная доля аграрной продукции по-прежнему производится в хозяйствах населения на базе преимущественно физического труда с низким уровнем агротехники. Если в 1990 г. такие хозяйства производили 26.6% продукции сельского хозяйства, то в 2015 г. — 38.4% (а в кризисном 1998 г. даже 58.9%). Полевые обследования [9] показали, что крестьянское землепользование в личных подсобных хозяйствах не столь экологично, как это может показаться на первый взгляд. В структуре их посевных площадей доминируют посевы картофеля, что препятствует ведению экологически рационального севооборота. Нарушаются технологии применения удобрений и пестицидов, что ухудшает фитосанитарное состояние агроэкосистем.

Индексы показателей сельского хозяйства России за 2015 г. Уровень 1990 г. соответствует 100%.

В целом по стране прирост производства во многом достигается за счет усиления эксплуатации земельных ресурсов, чреватой «проеданием» почвенного плодородия, деградацией почв. Вследствие бездарной аграрной реформы отечественный крестьянин старается выжать из земли все возможное, что, естественно, не может не подрывать экологический потенциал страны. В качестве позитивных результатов аграрных реформ некоторые исследователи отмечают увеличение урожайности сельскохозяйственных культур [10]. Однако рост урожайности* достигается, в частности, за счет концентрации земледелия на лучших землях, менее продуктивные земли выводятся из хозяйственного оборота. В условиях не компенсируемого внесением удобрений земледелия это чревато быстрым превращением лучших земель в бедленды, в дальнейшем неизбежно перемещение сельского хозяйства на менее плодородные земли и уже их последующая деградация и т.д. Повторное же вовлечение заброшенных земель в оборот потребует затрат, сопоставимых с первоначальным их освоением, поскольку не только, скажем, агродерново-подзолистые, но и более плодородные агросерые почвы после забрасывания деградируют по гумидному типу. В лесной зоне в дичающих ландшафтах активно идет утрата плодородия почв — процессы оподзоливания, осолодевания, элювиально-глеевые и др.

Отмеченное расхождение индексов производства и индекса ресурсов, парадоксальное несоответствие между сокращающимся потоком материальных ресурсов и увеличением выхода сельскохозяйственной продукции (парадокс «затраты–выпуск») назовем *эколого-ресурсным диссонансом*, чтобы акцентировать внимание на основном факторе такого несоответствия — ужесточении эксплуатации земельных ресурсов, выступающих важнейшим компонентом экосферы.

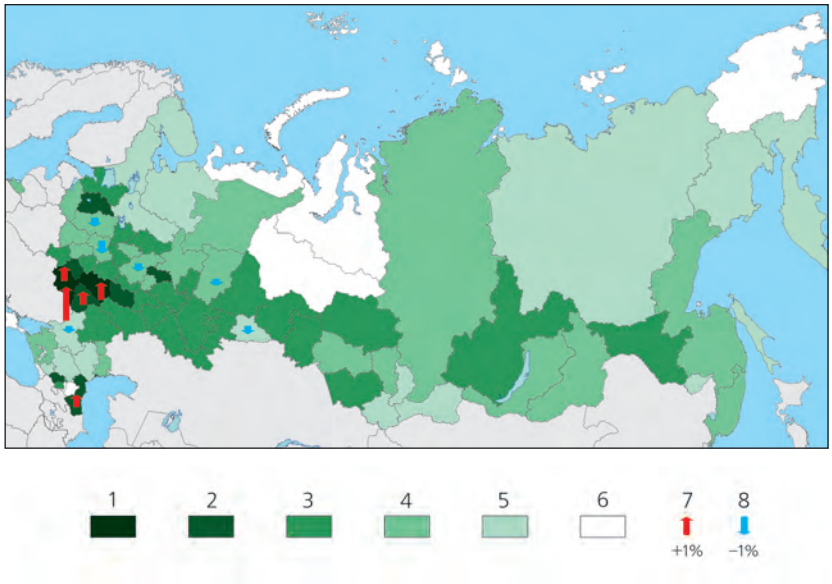
Рассмотрим этот своеобразный диссонанс в региональном разрезе. Предварительно были рассчитаны обобщенные, интегральные индексы используемых ресурсов за 1990–2014 гг. ($И_и$) по следующей формуле:

$$И_и = \frac{И_п + И_у + И_с}{3},$$

где $И_п$ — индекс посевных площадей; $И_у$ — индекс применения минеральных удобрений; $И_с$ — индекс поголовья скота в условных единицах. Иными словами, интегральный индекс определялся как среднее арифметическое из трех частных индексов используемых ресурсов, которые в решающей мере определяют продуктивность сельскохозяйственного производства.

Минимальными значениями интегрального индекса характеризуются Костромская, Смоленская, Ивановская, Тверская и Калужская области. Так, в Костромской обл. посевные площади сократились в 3.4 раза, применение минеральных удобрений — в 12.5, поголовье крупного рогатого скота — в 6 раз. На другом полюсе — Карачаево-Черкесия и Дагестан, где этот индекс превышает 100%, что говорит об увеличении вовлекаемых в оборот факторов производства. Например, поголовье овец в Дагестане возросло в 1.5 раза, в Карачаево-Черкесии — в 1.7 раза. В центрально-черноземных областях с середины 2000-х годов вновь вовлекается в оборот ранее заброшенная пашня, и в Курской, например, величина посев-

* Важным фактором роста урожайности в последние десятилетия стало также некоторое улучшение гидротермических условий в сельскохозяйственных районах — своего рода климатическая «гуманитарная помощь» перманентно реформируемой России.



Изменение нагрузки на российские сельскохозяйственные ландшафты за 1990–2014 гг. Цветом показана разность индексов производства продукции сельского хозяйства и индексов используемых ресурсов (%): 1 — 115–195; 2 — 75–105; 3 — 50–74; 4 — 30–49; 5 — <30; 6 — нет данных. Стрелки обозначают максимальный рост (7) и сокращение (8) производства продукции сельского хозяйства (в процентах от уровня 1990 г.).

ных площадей в 2015 г. уже превышает показатели советского периода.

Хорошо выражена закономерность: чем выше индекс производства, тем больше разность индексов (табл.1). Чем успешнее — с чисто производственной точки зрения — развивается региональное сельское хозяйство, тем выше ресурсно-экологический диссонанс.

Выделяются две группы регионов, различающиеся диаметрально противоположными экологическими траекториями.

1. Регионы, где велико расхождение индексов и наблюдается сильный спад производства (Тверская и Нижегородская области, Пермский край и др.), — это районы ускоренной «примитивизации» сельского хозяйства. В них усиливается зависимость аграрной сферы от природных режимов и тенденций, и прежде всего от климата. Кроме того, в этих регионах можно ожидать изменений региональных климатических характеристик. Известный российский климатолог А.Н.Кренке показал, что формирование *природно-хозяйственных зон* сильно нарушило природно-климатическую зональность [11]. Особенно ярко это проявилось в городских азональных ландшафтах. Например, в Москве знойным летом гидротермические условия (температура, влажность воздуха) соответствуют условиям сухих степей или даже полупустынь, а не смешанных хвойно-широколиственных лесов, в зоне которых расположена столица.

Ренатурализация ландшафтов (в связи с сокращением сельскохозяйственной деятельности и ее примитивизацией) ведет к ренатурализации региональных (зональных) климатических характери-

Таблица 1

Регионы, лидирующие по динамике производства продукции сельского хозяйства за 1990–2014 годы

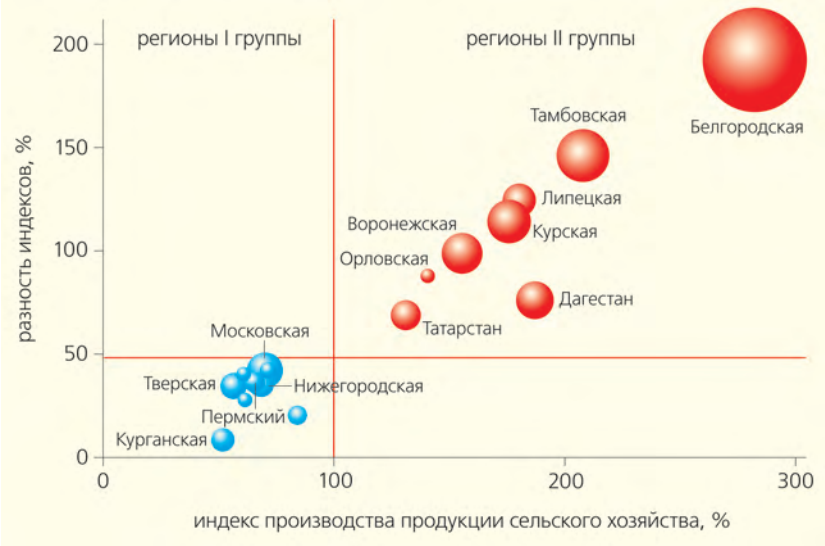
Регион	Индекс производства, %	Регион	Прирост производства, %*	Регион	Разность индексов производства и используемых ресурсов, %
*Белгородская область***	282	*Белгородская область*	2.87	*Белгородская область*	192
Тамбовская область	208	*Тамбовская область*	1.45	*Тамбовская область*	145
Республика Дагестан	187	*Курская область*	1.20	*Липецкая область*	124
Липецкая область	180	*Воронежская область*	1.15	*Курская область*	114
Курская область	176	Республика Дагестан	1.07	Республика Марий Эл	104
Кабардино-Балкарская Республика	164	*Липецкая область*	0.93	*Воронежская область*	98
Воронежская область	155	Республика Татарстан	0.84	Новгородская область	92
Орловская область	141	*Орловская область*	0.42	*Орловская область*	88
Республика Марий Эл	137	*Кабардино-Балкарская Республика*	0.39	*Кабардино-Балкарская Республика*	83
Республика Татарстан	131	Республика Башкортостан	0.38	Пензенская область	77

* % от объема производства продукции сельского хозяйства РСФСР в 1990 г.

** Курсивом выделены регионы, лидирующие по всем трем параметрам.

стик. Ныне в районах сильного сокращения сельскохозяйственной активности можно ожидать определенных подвижек и в изменениях регионального климата (которые здесь накладываются на изменения климата глобального).

2. В регионах, где большая разность индексов сопровождается ростом производства (Белгородская, Тамбовская, Липецкая, Курская области и др.), наблюдается усиление воздействия на ландшафты. Чрезмерная эксплуатация агроландшафтов Центрального Черноземья и смежных областей грозит их ускоренной экологической деградацией.



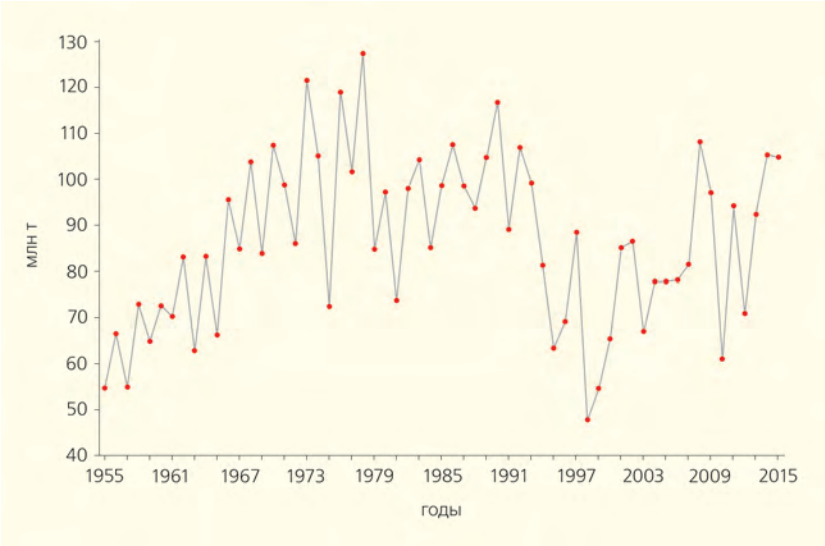
Разность индексов продукции сельского хозяйства и используемых ресурсов по некоторым регионам России за 1990–2014 гг. Объем шаров пропорционален росту/сокращению объема производства продукции сельского хозяйства за 1990–2014 гг. Красными линиями показаны среднероссийские значения.

Экологически неблагоприятные изменения происходят в региональных структурах посевных площадей. В черноземных регионах растет доля пропашных культур и чистых паров, провоцирующих эрозию, при этом сокращается доля почвоулучшающих многолетних трав и бобовых культур. Так, в Тамбовской обл. за постсоветские годы доля пропашных выросла до 36.5%, что в 3.5 раза превышает норму биологического земледелия, а доля многолетних трав сократилась в восемь раз — до 2.3% (что в 10–12 раз ниже нормы) [12]. В Курской обл. за 1990–2015 гг. с 52 до 66% возросла доля зерновых культур, которые характеризуются низкой почвозащитной (противоэрозионной) способностью. При этом доля посевов многолетних трав (с высокой противоэрозионной способностью) уменьшилась с 6.5 до 2.6%.

Основные зернопроизводящие районы наращивают экспорт, прежде всего пшеницы. В этом направлении Россия уже стала мировым лидером. Как известно, Советский Союз с 1960-х годов начал ввозить зерно, а в позднесоветский период выдвинулся в крупнейшие его импортеры. Советский импорт зерновых культур обеспечивал потребности отечественного животноводства — создавал для него кормовую базу. Урожаи зерна в современной России не превышают уровней, достигнутых в РСФСР. График производства зерна имеет «зубчатый» характер. Это свидетельство сильной зависимости российского сельского хозяйства от гидротермических условий конкретного года.

В постсоветские годы произошла переориентация аграрного сектора с импорта зерна для обеспечения отечественного животноводства на зерновой экспорт, сопровождаемый падением выпуска животноводческой продукции и ростом ее импорта. Коренной перелом произошел в начале 2000-х годов. В 1990-е импорт зерна, как правило, превышал его экспорт, внешнеторговое зерновое сальдо стало стабильно положительным только с 2001 г.

Основной причиной произошедших сдвигов выступает адаптация производителей, а отчасти и населения к условиям специфического российского «рынка». Современное животноводство, раз-



Производство зерна в России в 1955–2015 гг.

Поголовье крупного рогатого скота в России и экспорт зерна в 1990–2015 гг.

вивающееся на промышленной основе («фабрики» по производству мяса, молока, яиц), — более капиталоемкая сфера по сравнению с растениеводством. Более длительный инвестиционный цикл, не сулящий быстрой отдачи, оказывается не под силу — без существенной государственной поддержки — экономически слабому отечественному производителю. Его зарубежный конкурент, располагающий мощной материально-технической базой, эффективными технологиями и менеджментом, гораздо лучше поддерживаемый государственными субсидиями*, вытесняет нашего крестьянина-животновода с российского рынка. В то же время обедневшее население вынужденно изменило структуру потребления продуктов питания, сократив в своем рационе дорогие и ценные в пищевом отношении продукты животноводства (табл.2).

Замечу, что рациональное потребление продуктов питания имеет отношение и к экологической сфере — оно повышает устойчивость организма человека к неблагоприятным факторам окружающей среды.

Однако активизация экспорта продукции растениеводства («сырьевой» отрасли сельского хозяйства) на фоне обвального падения животноводства («обрабатывающей» отрасли) свидетельствует о закреплении сырьевой специализации страны, выпускающей продукцию с невысокой долей добавленной стоимости.

В черноземных регионах многократно выросли посевные площади «почворазрушающего» подсолнечника (табл.3). Его доля в посевах ряда регионов заметно превышает фитосанитарные нормы. Монокультура — это подвид «биологического оружия». Она ведет к истощению почв, развитию в посевах специфических вредителей и болезней. Особенно неэкологичны в этом отношении фермерские хозяйства. Например, в Ростовской обл. фермеры почти половину земель занимают подсолнечником (при норме 14–15%).

Таким образом, важнейшая черта трансформации сельскохозяйственного природопользования в пореформенной России — это изменение характера агроэкологических проблем. В позднесоветский период эти проблемы были обусловлены интенсификацией сельского хозяйства — использованием удобрений и средств защиты растений, нагрузками тяжелой сельскохозяйственной техники, крупнотоннажными отходами животноводческих комплексов. Ныне на первый план выходят проблемы, характерные для отсталых в аграрном отношении стран, связанные с «проеданием» почвенного плодородия, забрасыванием окультуренных пахотных земель, примитивными технологиями земледелия и животноводства.

К настоящему времени около трети земель сельскохозяйственного назначения находится в частной собственности граждан и юридических лиц, 2/3 — в государственной и муниципальной собственности. К сожалению, в российском миропонимании «государственное» — это «ничье», а «частное» понимается как вседозволенность («что хочу, то и ворочу»). И то и другое губительно для природных комплексов. Независимо от форм собственности на землю почвенные ресурсы должны рассматриваться как общенародное достояние. Рынок, даже цивилизованный, не работает в природоохранной сфере (так же, как в сфере борьбы с наркотиками, преступностью) — она требует серьезного регулирования, которое в нашей стране пока не сформировалось.

Деградация почв, их постепенное «умирание», происходит незаметно для общества, не бросается в глаза, как загрязнение воды, воздуха, сведение растительности. А вот восстановление почв требует сроков, превосходящих пределы человеческой жизни. Между тем в России практически отсутству-

* В странах Евросоюза государственные субсидии фермерам достигают почти 50% стоимости товарной продукции сельского хозяйства.

Таблица 2

Потребление некоторых продуктов питания в РФ (на душу населения в год, кг) [5]

Продукты	1990 г.	2000 г.	2014 г.	Норма потребления
Мясо и мясопродукты	75	45	74	81
Молоко и молокопродукты	386	215	244	392
Картофель	106	109	111	118
Сахар	47	35	40	41
Хлебные продукты	119	117	118	110

Таблица 3

Посевные площади подсолнечника в отдельных регионах России в 1990 и 2014 годах [4, 5]

Регион	Посевные площади, тыс. га		Изменение площадей 1990–2014 гг., %	Доля посевной площади, %		Превышение фитосанитарной нормы, раз	
	1990 г.	2014 г.		1990 г.	2014 г.	1990 г.	2014 г.
Россия	2739	6907	252	2.3	8.8	–	–
Саратовская область	355	1068	301	6.4	29.2	–	2.1
Волгоградская область	250	601	240	5.4	20.6	–	1.5
Оренбургская область	207	553	267	3.7	13.0	–	–
Алтайский край	135	536	397	2.1	9.8	–	–
Ростовская область	455	527	116	8.7	12.0	–	–
Самарская область	183	518	283	6.8	25.9	–	1.8
Краснодарский край	309	453	147	7.9	12.4	–	–
Воронежская область	214	450	210	7.2	17.7	–	1.3
Тамбовская область	99	386	390	4.8	23.5	–	1.7

ет государственная политика в области экологизации сельского хозяйства. Ситуация усугубляется все сужающимся потоком информации о состоянии сельскохозяйственных ландшафтов: практически развалена почвенная служба страны, очень редко проводятся геоботанические обследования земель.

Система мониторинга и контроля качества сельскохозяйственных земель требует скорейшего восстановления. Реформирование аграрного сектора экономики должно базироваться не на институциональных изменениях, как ныне, а на экологических приоритетах. Помимо жестких административных мер (крупных штрафов) целесообразно и косвенное рыночное регулирование сельскохозяйственного природопользования. Как крупные предприятия, так и фермеры должны иметь доступ к льготным кредитам, субсидиям, подлежать льготному налогообложению. Однако при нарушении экологических норм и правил сельскохозяйственные производители должны лишаться таких льгот.

Особого внимания агрономов, зоотехников, сельскохозяйственных экологов и аграрной науки требуют личные подсобные хозяйства населения, на землях которых развиваются многие неблагоприятные экологические процессы. Необходимо экономически стимулировать и дачников, которые используют щадящие режимы эксплуатации своих садово-огородных участков.

Сельское хозяйство базируется на возобновимых природных ресурсах, его всемерное развитие позволяет двигаться в экологически правильном направлении. Однако это справедливо лишь при рациональном использовании агроландшафтов. Исследование показывает, что в отечественной аграрной сфере налицо эколого-ресурсный диссонанс — прирост производства в существенной степени обеспечивается чрезмерной эксплуатацией почвенных ресурсов, угрожающей их деградацией. Тем самым ставится под угрозу экологическая и продовольственная безопасность страны.■

Работа выполнена в рамках Госзадания Института географии РАН по теме «Актуальные тенденции природопользования в российских регионах и их геоэкологическая оценка».

Литература

1. Регионы России: Стат. сб. Т.2. М., 1998.
2. Регионы России. Социально-экономические показатели — 2015 г. (www.gks.ru).
3. Россия в цифрах, 2016 г. (www.gks.ru).
4. Сельское хозяйство России: Стат. сб. М., 1995.
5. Сельское хозяйство, охота и охотничье хозяйство, лесоводство в России — 2015 г. (www.gks.ru).
6. Изменения окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М., 2007.
7. *Клюев Н.Н.* Природно-ресурсная сфера России и тенденции ее изменения // Вестник Российской академии наук. 2015. Т.85. №7. С.579–592.
8. Государственный (национальный) доклад «О состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2014 году». М., 2016.
9. *Клюев Н.Н.* Новые тенденции природопользования в российских регионах и их экологические последствия // Природопользование в территориальном развитии современной России / Под ред. И.Н.Волковой, Н.Н.Клюева. М., 2014. С.222–239.
10. *Нефедова Т.Г.* Сельская Россия на перепутье. М., 2003.
11. *Кренке А.Н.* Антропогенные изменения географической зональности и их влияние на соотношение тепла и влаги в климатической системе // Известия РАН. Серия географическая. 1989. №3. С.43–50.
12. *Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П.* Агроландшафты Центрального Черноземья. М., 2015.

Научные сообщения

Столбчатые базальты и конвекция Рэлея—Бенара

С.В.Чудов
Москва

В самых разных уголках нашей планеты встречаются удивительно красивые геологические образования — вертикально стоящие базальтовые столбы в форме плотно прилегающих друг к другу правильных призм, чаще всего шестигранных. Все они в пределах одного базальтового массива имеют одинаковую толщину, обычно от нескольких десятков сантиметров до 2 м, но в разных местонахождениях разную. Наиболее известные столбчатые базальты находятся на севере Ирландии. Это так называемая Тропа гигантов, или Лестница гигантов, — структура, которая образовалась из излившейся лавы в рифтовой зоне при

© Чудов С.В., 2017

Ключевые слова: базальты, столбчатая отдельность, конвекция Рэлея—Бенара, кольцевые вихри.
Key words: basalts, columnar separation, Rayleigh-Benard convection, vortex rings.

Обзорная фотография столбчатых базальтов на северном побережье Ирландии. Лестница гигантов и деталь ее обзорной фотографии.

Стопки базальтовых плиток, образующих вертикальные столбы рядом с пещерой Фингала. На верхнем снимке отчетливо прослеживаются три горизонтальных пласта базальтового массива: сплошной нерасчлененный массив внизу, столбчатые базальты в среднем слое и хаотическое нагромождение бесформенных базальтовых глыб в верхнем слое.

раскрытии Атлантического океана и отделении Ирландии от Британских о-вов, прежде составлявших единое целое. Похожие образования есть и во многих других местах на Земле, например в Исландии, в ущелье Гарни в Армении, на вулканическом острове вблизи побережья Шотландии (знаменитая пещера Фингала), в Неваде и наконец в России (мыс Столбчатый на о.Кунашир).

Рождение формы: пробелы в понимании

Геологов давно занимала загадка происхождения таких правильных форм, но удовлетворительной теории их образования до сих пор предложено не было. Высказывались предположения о генетической связи шестигранных базальтовых столбов с шестиугольными ячейками конвекции Рэлея—Бенара. Эта форма конвекции была открыта в начале прошлого столетия французским физиком Анри Бенаром в эксперименте с тонким горизонтальным слоем вязкой жидкости, подогреваемым снизу (английский физик лорд Рэлей провел теоретический анализ явления). При достижении критического значения температурного градиента весь слой разбивался на одинаковые по размеру шестигранные ячейки, в центре которых жидкость поднималась к свободной поверхности, а по их периферии опускалась вниз. Применительно к базальтам в работе Д.Е.Трапезникова и др. [1] выдвинута контракционно-конвективная модель возникновения столбчатой отдельности, согласно которой в слое жидкой излившейся лавы по мере ее остывания создаются условия для конвекции Рэлея—Бенара. Затем при затвердевании и дальнейшем охлаждении слоя объем массива уменьшается и термические напряжения разрывают его на шестигранные столбы по границам бенаровских ячеек.

Однако эту модель также нельзя признать состоятельной: для наблюдаемой в экспериментах бенаровской конвекции характерны горизонтальные размеры ячеек, примерно равные удвоенной толщине слоя жидкости, тогда как в столбчатых базальтах толщина массива превышает размеры ячеек в десятки раз. Кроме того, неясен механизм связи между конвективными ячейками в базальтовом расплаве и инициацией растрескивания. Если же допустить, что охваченный конвекцией слой намного тоньше излившегося слоя базальта, то непонятно, почему инициированные в нем трещины пронизывают весь массив строго вертикально и столбы до самой подошвы имеют плоские вертикальные грани.

При обзоре чрезвычайно обширной литературы по бенаровской конвекции (см., например, [2]) с удивлением обнаруживаешь, что сама эта теория также полна путаницы и нерешенных проблем. Так, во многих источниках указывается на возможность получения простого точного решения уравнений гидродинамики в приближении Буссинеска (т.е. принимая зависимость плотности от температуры линейной и учитывая изменения плотности только при массовых силах), однако лишь в совершенно абстрактной, физически нереализуемой постановке, когда и верхняя, и нижняя границы являются свободными. Часто упоминается также решение в виде чередующихся цилиндрических валов, вращающихся в противоположных направлениях, однако анализ устойчивости такого решения отсутствует. Но, как справедливо указано в «Гидродинамике» Ландау и Лифшица [3], «осуществляющиеся в природе течения должны не только удовлетворять гидродинамическим уравнениям, но должны еще быть устойчивыми: малые возмущения, раз возникнув, должны затухать со временем». В настоящей статье нас совершенно не интересуют нефизические постановки, нереализуемые граничные или начальные условия, а также нефизические моды потери устойчивости, теоретические мыслимые, но реально не наблюдаемые: и исходные состояния, и способы их модификации должны быть естественными и физически наблюдаемыми.

Конвективные валы в облачном слое. Вид с самолета.

Невозможно также считать удовлетворительным предложенное И.Пригожиным [4] объяснение геометрии наблюдаемой в экспериментах с тонкими слоями жидкости в прямоугольных кюветах валиковой конвекции трансляцией граничных условий, когда прямолинейная вертикальная стенка как бы распространяется далее по кювете от предыдущего цилиндрического вала к последующему. Ведь валиковая конвекция наблюдается также в чашке Петри или другой круглой посуде, где никаких прямолинейных бортиков нет, причем валы, как правило, подходят к краю кюветы под прямым углом. При этом характерный пространственный период валиковой конвекции может быть в десятки раз меньше диаметра круглой кюветы, так что влиянием боковых границ вдали от них можно смело пренебречь. Валиковая конвекция происходит также в облачном слое атмосферы, порождая часто наблюдаемые протяженные облачные гряды, разделенные равными промежутками (их хорошо видно на фотографии с борта самолета), — а в этом случае никаких твердых границ нет вообще. Наконец, странно было бы для объяснения линейных цилиндрических валов искать одно объяснение, а для шестигранных ячеек Бенара — совсем другое, ни с какими граничными условиями на бортиках не связанное.

Поэтому попробуем рассмотреть бенаровскую ячеистую конвекцию, исходя непосредственно из соображений устойчивости покоя и устойчивости движения, чтобы понять, какие формы конвекции в этой задаче можно действительно встретить в природе. Начнем с рассмотрения устойчивости тонкого горизонтального слоя вязкой несжимаемой жидкости со свободной верхней границей, с условием прилипания (фиксации) на нижней горизонтальной границе и в приближении отсутствия боковых границ (горизонтальная протяженность слоя настолько больше его толщины, что влиянием боковых границ можно пренебречь). Пусть этот слой покоится, равномерно подогревается снизу, и в нем за счет теплопроводности устанавливается линейный вертикальный градиент температуры и плотности. Теплая, менее плотная жидкость находится ниже более плотной, так что потенциальная неустойчивость налицо. Но сможет ли она реализоваться при любых значениях градиента плотности?

Вихрь из капли

И эксперимент, и теоретический анализ устойчивости позволяют однозначно ответить на этот вопрос отрицательно. Действительно, пусть где-то в объеме жидкости возникла флуктуация плотности/температуры, т.е. некий малый по сравнению с толщиной слоя сферический объем оказался перегретым относительно окружающей его жидкости. (Мы считаем этот объем сферическим, так как

уравнение теплопроводности исключает устойчивость иных геометрий возмущений температуры.) Что произойдет с этой теплой каплей дальше? Она начнет всплывать вверх под действием архимедовых сил, подобно аэростату-монгольфьеру. Двигаясь вверх, она попадет в еще более холодный слой жидкости, так что при отсутствии диссипации тепла архимедова сила только увеличится. Но, как мы предположили, жидкость вязкая и теплопроводная, так что всплытию капли будут противодействовать вязкие напряжения, а сама капля начнет остывать и терять плавучесть. И если вертикальный градиент плотности/температуры мал, диссипативные эффекты погасят флуктуацию, она просто рассосется. Итак, существует некое пороговое значение температурного градиента, такое, что малые флуктуации разрастаются, если градиент больше этого значения, и угасают, если он меньше. При этом мы рассматриваем лишь малые флуктуации, порожденные молекулярным хаосом, так как пороговое значение градиента очевидно зависит от масштаба флуктуаций: оно больше для меньших флуктуаций и меньше для бóльших.

Пороговое значение температурного градиента рассмотрено в [3] и дается формулой

$$-\frac{dT}{dz} < \frac{g\beta T}{c},$$

где T — температура, z — вертикальная координата, g — ускорение силы тяжести, β — температурный коэффициент расширения, c — теплоемкость.

Попробуем грубо оценить значение этого порогового градиента, подставив в приведенную формулу следующие значения: $g = 9.8$ м/с^2, $\beta = 0.00002$ К$^{-1}$, $c = 0.84$ Дж/кг К$^{-1}$ ≈ 0.84 м^2/с^2 К$^{-1}$. Получим критическое значение градиента $|dT/dz| = 0.00023$ К/м.

Теперь рассмотрим эволюцию возмущения в случае, когда градиент достаточно велик для разрастания этого возмущения. Силы вязкости жидкости, обтекающей всплывающую каплю, создадут внутри капли нисходящие течения (на ее боковых границах) в системе отсчета, связанной с центром капли, и компенсирующие их восходящие противотечения в ее центре и по оси подъема. Получится тороидальный вихрь.

В результате действия аэродинамических сил капля будет деформироваться: растягиваться в горизонтальной плоскости и сплющиваться по вертикальной оси (по теореме Жуковского аэродинамическая сила ориентирована перпендикулярно направлению движения профиля и пропорциональна циркуляции вектора скорости вокруг профиля). В некоторый момент раскручивающийся тороидальный вихрь создаст гидродинамические силы, достаточные для разрыва сплошности капли, и сплющенная сфера превратится в тор. При этом описанная выше аэродинамическая сила будет продолжать растягивать вращающийся тор по горизонтали и, соответственно, уменьшится малый радиус тора. Окружающая первоначальную каплю жидкость будет силами вязкости вовлечена в оба эти процесса: тороидального вращения относительно кольцевой вихревой линии и вертикального подъема.

Теперь вся эта масса жидкости окажется подверженной действию конвективных сил — подъему по центру и опусканию по периферии возникающей конвективной ячейки. Относительно теплая жидкость будет подсасываться внизу ячейки и подниматься вверх по ее центру, а относительно более холодная опускаться по ее периферии. Архимедовы силы будут способствовать и тому и другому. В тонких слоях рост ячейки будет продолжаться до тех пор, пока ячейка при своем разрастании не коснется дна, где действуют условия прилипания, и некоторое время после этого, пока диссипация энергии вязкими силами у дна не уравновесит ее выигрыш за счет конвекции. На этом дальнейшее разрастание ячейки закончится, и течение внутри ячейки станет стационарным.

Танец в ансамбле

Приведенное рассмотрение, однако, неполно, так как мы пока считали всю окружающую ячейку жидкость покоящейся. Однако на самом деле это не так, и окружающая жидкость также будет вовлекаться в движение вязкими силами. Распространение возмущений приведет к раскрутке рядом с первоначальной ячейкой соседних ячеек, движение жидкости в которых будет согласовано с ее движением в исходной ячейке вследствие условия непрерывности вектора скорости в вязкой жидкости. В принципе возможна (и в некоторых экспериментах действительно наблюдалась) картина течения в виде концентрических кольцевых валов с чередующимся направлением вращения, однако такая конфигурация неустойчива при тех значениях градиента температуры, при которых молекулярных флуктуаций достаточно для инициации конвекции. По-видимому, концентрические конвективные валы можно получить лишь при субкритических для бенаровской конвекции значениях градиента, инициировав конвекцию искусственным созданием сверхкритического возмущения в центре круглой кюветы.

В более реалистичном случае при достижении порогового для ячеистой конвекции значения градиента возникнет множество ячеек, причем раскрутка жидкости по соседству с уже раскрученными ячейками будет облегчена уже наличествующим возмущением. Образуются сначала пары соседних ячеек, которые будут способствовать возникновению третьей и четвертой ячеек рядом с первыми двумя, и так фронт конвекции быстро распространится по всему объему горизонтального слоя. Движение жидкости в каждой такой

ячейке можно описать как порожденное находящимся в ее центре вихревым кольцом, а упорядоченный ансамбль таких ячеек — как результат «кристаллизации» вихревых колец, притягивающихся друг к другу, если расстояние между ними слишком велико, и отталкивающихся, если оно слишком мало. В результате достигается наиболее устойчивая структура: гексагональная плотнейшая упаковка, как в монослое одинаковых сферических бусинок на плоскости.

Однако мы пока рассмотрели лишь случай тонкого слоя, когда толщина сопоставима с максимальным размером ячейки, при котором силы вязкости начинают препятствовать дальнейшему разрастанию, или же меньше этого размера. Что произойдет, если этот слой существенно толще? В этом случае мы получим *многоярусную ячеистую конвекцию*, где над нижним слоем ячеек появится следующий слой, раскрученный в противоположном направлении, т.е. с ячейками, в которых опускание происходит по центру, а подъем — по периферии. В принципе вся описанная выше для монослоя конвективных ячеек картина сохраняется с точностью до обращения векторов скорости, если мы рассмотрим не всплытие горячей капли, а опускание холодной, т.е. начальное возмущение противоположного знака.

В тонких слоях такая обратная ориентация ячеек обычно не наблюдается, так как распределение температуры на дне, создаваемое подобной схемой, термодинамически неустойчиво: оно состоит из холодных точек на горячем фоне. Уравнение теплопроводности требует обратной картины неоднородностей температуры, т.е. горячих точек на холодном фоне. Ведь пара расположенных рядом восходящих потоков — неустойчивое образование, эти потоки конкурируют друг с другом, стремясь расширить свою область питания. Более сильный поток при этом поглощает более слабый, отбирая у него область питания. В гипотетической картине с монослоем бенаровских ячеек обратной ориентации, т.е. с подъемом по периферии, наиболее горячими точками будут стыки трех соседних ячеек. Эти потоки в углах ячеек перетянут на себя восходящие потоки на их границах и станут центрами ячеек с нормальной ориентацией, т.е. произойдет фазовый переход к дуальной гексагональной решетке. Однако в случае многоярусной конвекции, где по вертикали чередуются слои ячеек с опусканием по центру и подъемом по периферии и слои ячеек с противоположным направлением вращения кольцевых вихрей, указанная конфигурация является единственно кинематически возможной и потому устойчивой.

Что же случится, если слой жидкости, напротив, окажется слишком тонким, т.е. тоньше минимального вертикального размера шестигранной бенаровской ячейки, при котором (при заданных значениях теплового потока) диссипация энергии движения силами вязкого трения и теплопроводности еще компенсируется подкачкой энергии силами плавучести? В этом случае ячейка не сможет расти сразу во всех направлениях, но сможет удлиняться, образуя пару конвективных валов с противоположными направлениями вращения, и раскручивать аналогичные валы по обе стороны от первоначальной пары. Это означает разрыв вихревого кольца и продолжение (рост) кинематически спаренных вихревых линий далее от точки разрыва. Шестигранные ячейки станут в этом случае неустойчивыми, а валы, напротив, устойчивыми.

Если теперь увеличить подвод тепла, кинематически возможен процесс, обратный только что описанному: возникновение поперечной неустойчивости пар конвективных валов, пересоединение вихревых линий соседних валов с их замыканием друг на друга и возникновением замкнутых, хотя и сплющенных (точнее, горизонтально вытянутых) вихревых колец. В этом случае конвективный слой распадается на продолговатые вытянутые ячейки — ламели. Их дальнейшему округлению будет препятствовать взаимное притяжение протяженных частей спаренных вихревых линий, подобное тому, что наблюдается у пар смерчей, движущихся как единое целое и вращающихся в противоположных направлениях. Характерное расстояние между ними поддерживается равновесием сил притяжения вихревых линий и сил отталкивания, которые связаны с упругостью линий тока, определяемых инерцией жидкости. При дальнейшем усилении подогрева получившиеся ламели распадаются на нормальные круглые вихревые кольца, т.е. возникает типичная бенаровская конвекция.

Застывшее движение

Возвращаясь к геологическим структурам, видим, что многоярусная ячеистая конвекция — не просто допустимое уравнениями гидродинамики решение, но и реально наблюдаемое явление, если не в процессе, то по своему итогу. Именно окаменевшие результаты этого явления мы и наблюдаем в столбчатых базальтах, например в виде Лестницы гигантов на севере Ирландии. Еще одно название данной формации — Мостовая гигантов. На приведенной в начале статьи фотографии видно, откуда оно взялось. Обширные площади словно вымощены базальтовыми плитками примерно одинакового размера и правильной формы, в основном шестиугольными. Поперечный размер плитки около 1.5 м. На фотографии детали этой «мостовой» при большем увеличении видно, что боковые вертикальные грани плиток — почти правильные плоскости. Верхние горизонтальные грани могут быть плоскими, но порой они выпуклые или вогнутые.

На обзорной фотографии заметны вертикальные плоские грани конвективных колонн, их почти одинаковый поперечный размер и членение каждой колонны по вертикали на горизонтальные плитки почти одинаковой толщины. Горизонтальные границы плиток соседних столбов находятся на одном уровне. Если рассмотреть детали снимка при большем увеличении, то можно увидеть некоторые другие интересные особенности членения данного базальтового массива. Это сколы на угловых вертикальных ребрах ячеек, преимущественно в донных частях ячеек, но иногда и у их верхних горизонтальных граней; округлые трещины на боковых гранях, особенно на узких гранях у ячеек неправильной формы; видно также, что упомянутые выше сколы происходят именно по этим трещинам, а у наиболее правильных ячеек сколоты и углы, и горизонтальные ребра, так что базальтовая плитка больше всего напоминает по форме традиционную шестигранную гайку со снятыми фасками по верхним и нижним ребрам и со скругленными углами, примыкающими к шестиугольным поверхностям.

Все эти особенности нуждаются в объяснении, которое и будет предложено ниже. Для начала отметим, что минеральный и гранулометрический состав базальта варьирует в зависимости от местонахождения образца в пределах ячейки. Это указывает на два сопряженных процесса: механическую сортировку материала конвективными движениями застывающей лавы и минералогическую сортировку по кривой солидуса из-за различной температуры в пределах ячейки. Зерна минералов разной плотности обладают разной плавучестью и в результате оседают вниз или всплывают вверх, а кроме того, увлекаются конвективными движениями по-разному в зависимости от их формы — округлой, пластинчатой или игольчатой. Пластинки и иглы в сдвиговом течении при этом будут преимущественно ориентированы по наибольшим измерениям вдоль линий тока и плоскостей сдвига.

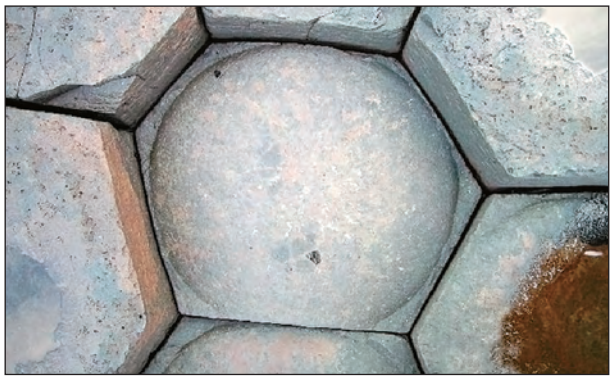
Затвердевание начинается на углах и ребрах ячеек и лишь затем распространяется в центральные области, где температура всегда выше, чем на периферии ячеек. После затвердевания начинается объемное сжатие материала по мере охлаждения и растрескивание массива, причем трещины проходят по спайности, а спайность на границах ячеек идет по поверхностям скольжения в сдвиговом течении. Вот так отдельность наследует спайности, а спайность, в свою очередь, наследует поверхностям скольжения в сдвиговом ламинарном течении многоярусной бенаровской конвекции.

Заметим также, что вязкость базальтовой или андезитовой лавы сильно зависит от температуры расплава, поэтому еще до начала затвердевания конвекция вдали от центральной оси конвективных колонн прекращается и поддерживается лишь в их центральных частях, а периферия (более холодная, а следовательно, более вязкая) превращается в застойные зоны. Именно в них и будут откладываться минералы, первыми выпадающие из расплава. Так образуются вторичные внутренние границы, вдоль которых преобладают ориентированные по поверхностям скольжения в ламинарном потоке пластинчатые и игольчатые минералы и по которым впоследствии идет растрескивание. Отсюда сколотые под 45° к горизонтали углы ячеек и их горизонтальные ребра. В проекции на вертикальные грани ячеек эти внутренние трещины образуют овальные трещины, видные на фрагменте обзорной панорамы при большем увеличении.

Возвращаясь к вопросу о возможных формах конвективной неустойчивости, альтернативных многоярусной бенаровской конвекции, следует упомянуть о встречающемся в литературе термине «конвективные колонны». Имеются в виду бенаровские ячейки с вертикальными размерами, существенно превышающими горизонтальные. Безусловно, такая форма конвекции возможна как кинематически, так и динамически, но она не удовлетворяет третьему, самому важному критерию, а именно устойчивости этой формы движения жидкости (или газа).

Такие колонны окажутся подверженными поперечной (горизонтальной) неустойчивости восходящих и нисходящих потоков: соседние линии тока с противоположным направлением движения будут легко разрываться и замыкаться друг на друга, что приведет к перестройке картины движения к описанной выше многоярусной бенаровской конвекции, которая окажется уже устойчивой. Тем самым конвективные колонны будут в лучшем случае переходной неустойчивой стадией развития конвекции, если вообще смогут возникнуть. Поэтому как по горизонтали, так и по вертикали в толстом слое подогреваемой снизу жидкости ячейки не смогут неограниченно разрастаться, а произойдет «квантование» течения на ячейки, размер которых определится соотношением сил инерции и вязкости, т.е. числом Рейнольдса для данной жидкости, зависящим от характерного масштаба течения. При усилении нагрева упорядоченная ячеистая конвекция просто разрушится и перейдет в неустойчивую хаотическую конвекцию.

Такой переход хорошо виден на фотографии пещеры Фингала, где базальтовый массив четко делится по вертикали на три слоя: сплошной скальный массив без всяких трещин внизу, столбчатая отдельность в промежуточном среднем слое и хаотическое нагромождение базальтовых глыб поверх слоя столбчатых базальтов, причем границы между этими тремя слоями строго горизонтальны. Согласно нашей интерпретации этой геоморфологии, в нижнем слое излившейся базальтовой лавы температурный градиент был недостаточен для возникновения конвективной неустой-



Горизонтальный участок Лестницы гигантов, называемый Мостовой гигантов, и его деталь при большем увеличении.

чивости, в среднем слое он обеспечивал многоярусную бенаровскую конвекцию, в свою очередь поддерживавшую этот линейный температурный градиент, и, наконец, в верхнем слое градиент был слишком велик и приводил к хаотической конвекции, порождающей нагромождение базальтовых глыб, которые образуются при их быстром остывании и растрескивании.

Отметим также, что растрескиванию базальтового массива при затвердевании (кристаллизации) способствует значительное сокращение его объема при этом процессе (примерно на 12%). Это означает коэффициент линейного сжатия около 4%, что согласуется с величиной вертикального зазора между плитками около 3 см при диаметре плиток примерно 1.5 м (как на фотографиях Мостовой гигантов). Вогнутость в центре горизонтальных поверхностей верхнего слоя плиток так же связана с их объемным сжатием при кристаллизации, как и выпуклость верхних горизонтальных поверхностей нижележащего слоя плиток, остающихся в полужидком состоянии после затвердевания верхнего слоя и наследующих форму выпуклой вверх горизонтальной границы между верхним и нижележащим слоем. Форма этой границы в виде сферического сегмента, четко видная на снимках, легко объяснима выдавливанием полужидкого содержимого ячейки в результате сокращения горизонтального размера боковых граней в процессе их затвердевания. Верхняя граница ячейки затвердевает раньше нижней, и объемное сокращение оставшегося расплава осуществляется деформацией нижней границы.

* * *

Разумеется, приведенные рассуждения носят качественный характер, они не позволяют количественно сопоставить различные физические и гидродинамические факторы, от роли и взаимодействия которых зависит ход процесса и в конечном счете форма и размеры наблюдаемых образований. Строгое исследование процессов, приведших к образованию базальтовых столбов, должно быть основано на анализе моделей, адекватных той расплавленной среде, из которых они образовались, что пока трудно реализовать, поскольку нет достаточной информации о свойствах расплавленного базальта и соответствующих числовых значениях параметров. ■

Литература

1. *Трапезников Д.Е., Сунцов А.С., Рыбальченко Т.М.* К вопросу о происхождении столбчатой отдельности в базальтах и ее аналогов // Вестник Пермского университета. Геология. 2012. Вып. 2(15). С.8–15.
2. *Гетвиг А.В.* Конвекция Рэлея—Бенара. Структуры и динамика. М., 1999.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Гидродинамика. Т.VI. М., 1986.
4. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. М., 1990.

Содружество модулей: структура роймиллерита — нового минерала из Намибии

Р.К.Расцветаева,
доктор геолого-минералогических наук
С.М.Аксенов,
кандидат геолого-минералогических наук
Институт кристаллографии и фотоники имени А.В.Шубникова РАН
Москва

Месторождения минералов с халькофильными элементами (Pb, Sb, Bi, Zn и др.) относительно редки. Они известны в Македонии, Намибии (близ г.Цумеба), США (штат Нью-Джерси) и в Швеции. Эти месторождения отличаются чрезвычайно широким разнообразием минералов. Многие из них — «эндемики» (т.е. не известны в других местах). В частности, на медно-свинцовом месторождении Комбат в Намибии открыто 13 минеральных видов [1]. А недавно с нашим участием открыт еще один минерал — роймиллерит $Pb_{24}Mg_9(Si_9AlO_{28})(SiO_4)(BO_3)(CO_3)_{10}(OH)_{14}O_4$, названный в честь геолога и минералога Р.Миллера, за его вклад в изучение геологии Намибии [2]. Минерал и его название утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (IMA №2015-093). Образец роймиллерита под номером 20080176 хранится в Музее естествознания в Стокгольме.

Роймиллерит найден Э.Йонссоном в гидротермальных породах месторождения Комбат, в долине Отави (Северная Намибия). Его прозрачные, бесцветные (иногда светло-розовые) пластинчатые кристаллы размером до 1.2 мм в поперечнике и 0.3 мм толщиной (рис.1) встречаются в ассоциации с якобситом, церусситом, гаусманнитом, салинитом, родохрозитом и баритом.

Мы выполнили семь химических анализов этого минерала с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA-II XMU, которые укладываются в эмпирическую формулу (Z=1): $Pb_{24.12}Mg_{8.74}Mn_{1.25}Fe_{0.94}B_{1.03}Al_{1.04}C_{9.46}Si_{9.39}H_{14.27}O_{83}$. Содержания воды и CO_2 определены газовой хроматографией по продуктам сгорания при 1200°С. Количество B_2O_3 определено по структурным данным и подтверждено ИК-спектроскопией.

Кристаллическая структура роймиллерита найдена методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на основе эксперимента, полученного от бесцветного монокристалла размером 0.11×0.12×0.14 мм с использованием дифрактометра Bruker Kappa Apex Duo, который оснащен CCD-детектором. Новый минерал оказался триклинным с параметрами ячейки: a = 9.315(1), b = 9.316(1), c = 26.463(4) Å, α = 83.295(3)°, β = 83.308(3)°, γ = 60.023(2)°, V = = 1971.2(6) Å^3, пространственная группа $P\bar{1}$. Модель структуры получена методом charge flipping по программе SuperFlip [3], а ее уточнение выполнено по программе Jana 2006 [4] до R-фактора достоверности 5.7% с использованием 9306 $I > 3\sigma(I)$.

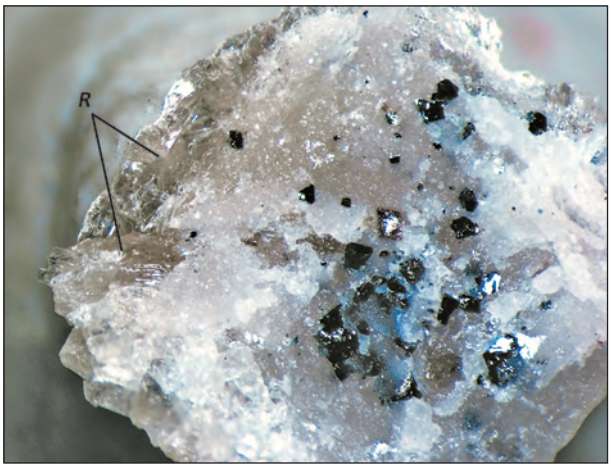


Рис.1. Кристаллы роймиллерита (R) с церусситом (белые) и якобситом (черные). Ширина поля 2.9 мм.

В основе кристаллической структуры роймиллерита лежит чередование пирофиллитоподобного TOT-модуля $Mg_9(OH)_8[(Si,Al)_{10}O_{28}]$ с I-блоком (I — interstitial — промежуточный, или межмодулярный) $Pb_{24}(OH)_6O_4(CO_3)_{10}(BO_3,SiO_4)$, который со-

Ключевые слова: новый минерал, роймиллерит, бритвинит, молибдофиллит, кристаллическая структура, месторождение Комбат, Намибия.
Key words: new mineral, roymillerite, britvinite, molybdophyllite, crystal structure, Kombat Mine, Namibia.

© Расцветаева Р.К., Аксенов С.М., 2017

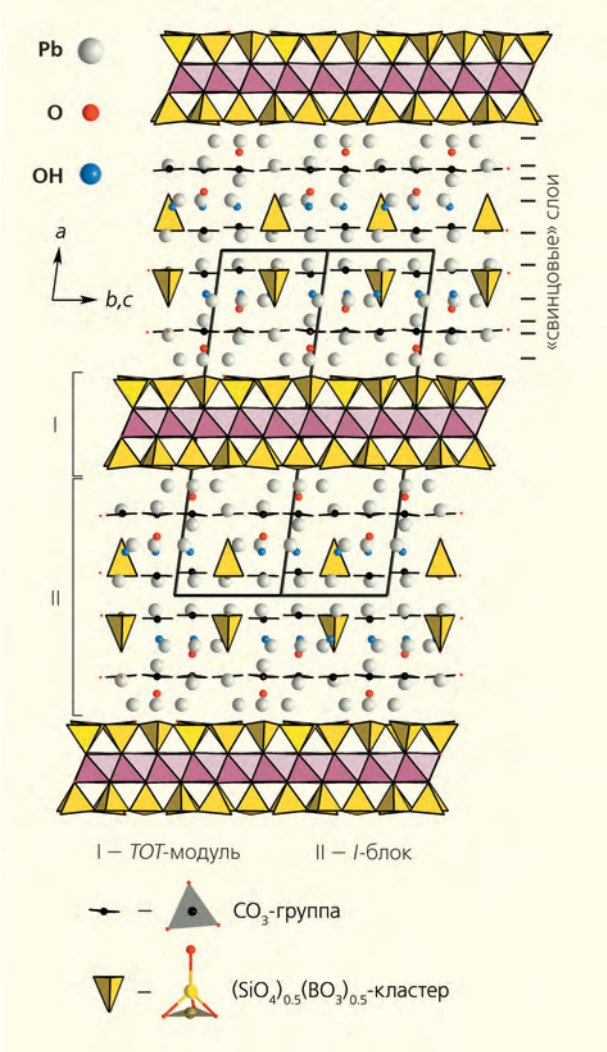


Рис.2. Общий вид кристаллической структуры роймиллерита.

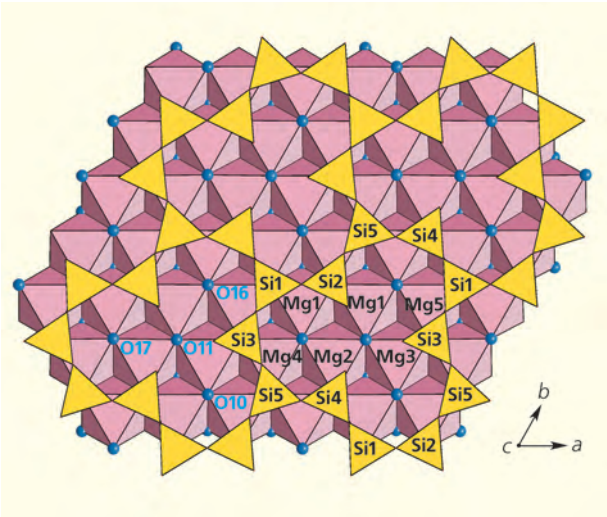


Рис.3. *TOT*-модуль в структуре роймиллерита. Второй тетраэдрический слой находится под октаэдрическим.

держит свинец, карбонатные, боро- и кремнекислородные группы. Конечно, идеализированная формула выглядит значительно проще:

$Pb_{24}Mg_9(Si_9AlO_{28})(SiO_4)(BO_3)(CO_3)_{10}(OH)_{14}O_4$.

Тем не менее, как видно из рисунка структуры, разделение формулы на две части с разным составом оправданно (рис.2).

***TOT*-модуль** в роймиллерите содержит центральный *O* (октаэдрический) слой реберносвязанных $MgØ_6$-октаэдров (Ø = O, OH), соединяющий два слоя $(Si,Al)O_4$-тетраэдров (*T*-слои). Тетраэдрический слой в слюдах (и в частности, в пирофиллите) построен из шестичленных колец, а в слое роймиллерита одного тетраэдра, общего для трех колец, не хватает. Благодаря этому они образуют одно большое гофрированное кольцо (рис.3). Ранее такую оригинальную сетку (Si_5O_{14}) с крупными 12-членными петлями нашли в структурах бритвинита и молибдофиллита [5, 6].

***I*-блок** в структуре роймиллерита содержит 10 «свинцовых» слоев. Соседние пары свинцовых слоев разделены «карбонатным», состоящим из изолированных CO_3-групп. Два центральных карбонатных слоя включают также гетерополиэдрический $[(SiO_4)_{0.5}(BO_3)_{0.5}]$-кластер, сходный с кластером в структуре бритвинита [5]. Полиэдры свинца характеризуются координационными числами от 5 до 7 и средними расстояниями <Pb–O> от 2.47 до 2.68 Å (более длинные, слабые связи Pb–O > 3 Å). Все эти разномастные полиэдры, соединяясь вершинами, ребрами и гранями, образуют сплошную массу, внутри которой утоплены CO_3- и BO_3-треугольники и дополнительные SiO_4-тетраэдры. Изображение и описание таких структур чрезвычайно громоздкое, а сравнение их с родственными структурами лишено простоты и ясности. И тут на выручку приходит «антикристаллохимия», т.е. кристаллохимия анионоцентрированных комплексов, обратных по знаку заряда. Рассказ об этих соединениях был ранее опубликован в «Природе»*.

Если в классической кристаллохимии рассматриваются тетраэдры (или иные полиэдры) из атомов кислорода вокруг катиона, то «нетрадиционная» кристаллохимия строится на катионных тетраэдрах, в которых центральным атомом служит анион, а в вершинах располагаются атомы металла. Такой подход, разработанный российскими кристаллохимиками С.В.Кривовичевым и С.К.Филатовым [7], успешно применяется к соединениям, которые образуются в специфических условиях и содержат «дополнительные» атомы кислорода, не входящие в классические тетраэдры и треугольники (или в какие-либо другие анионные группы) и занимающие в структуре обособленное положение. В роймиллерите в *I*-блоке содержатся два «дополнительных» атома

* См. *Расцветаева Р.К.* Антимиры // Природа. 2009. №4. С.51–56.

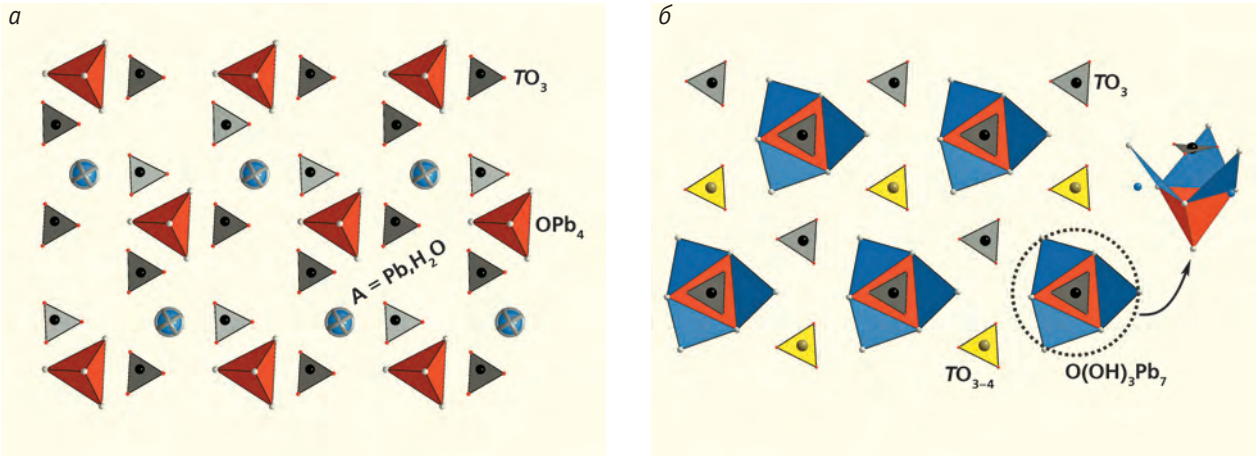


Рис.4. Молибдофиллитовый (*а*) и плюмбонакритовый (*б*) модули в структуре роймиллерита.

кислорода и три гидроксильные группы. Атомы кислорода окружены четырьмя атомами свинца с образованием $[OPb_4]$-тетраэдров со средними расстояниями <O–Pb> = 2.257 и 2.335 Å, в то время как OH-группы координированы по треугольнику и образуют искаженные анионоцентрированные $[(OH)Pb_3]$-треугольники.

Особенность анионоцентрированных полиэдров состоит в их способности объединяться не только вершинами, но и ребрами [7]. В структуре роймиллерита $[(OH)Pb_3]$-треугольники соединяются через общие Pb–Pb-ребра с одним из двух $[OPb_4]$-тетраэдров, образуя гетерополиэдрический $[O(OH)_3Pb_7]$-кластер.

Тетраэдры $[OPb_4]$ и кластеры $[O(OH)_3Pb_7]$ не заслоняют собой классические фрагменты структуры (CO_3- и BO_3-треугольники и SiO_4-тетраэдры), а сосуществуют с ними, ведь у каждого свое место и своя роль.

Однако такое представление структуры роймиллерита не оригинально. В молибдофиллите, который содержит четыре свинцовых и один карбонатный слой, уже выделяли тетраэдры $[OPb_4]$ [6], а в плюмбонакрите ($Pb_5(CO_3)_3O(OH)_2$) — кластеры $[O(OH)_3Pb_7]$ [8]. Роймиллерит включил в свою структуру и те, и другие фрагменты в виде модулей — молибдофиллитового (рис.4,*а*) и плюмбонакритового (рис.4,*б*).

Таким образом, в структуре роймиллерита реализуются одновременно два кристаллохимических подхода, которые приводят к содружеству модулей и антимодулей (рис.5).

Модулярная серия. Не только в структуре роймиллерита сосуществуют два типа модулей. Подобные фрагменты присутствуют еще в двух минералах, содержащих свинец, — молибдофиллите $Pb_8Mg_9[Si_{10}O_{30}(OH)_8(CO_3)_3]\cdot H_2O$ [6] и бритвините $[Pb_7(OH)_3F(BO_3)_2(CO_3)][Mg_{4.5}(OH)_3(Si_5O_{14})]$ [5, 9]. Оба минерала найдены в месторождении Вармланд (Швеция). Имя молибдофиллита происходит от греческого μολυβδος (свинец) и φυλλο (лист), а бритвинит назван в честь российского минералога и кристаллографа С.Н.Бритвина. Составы этих минералов схожи, но различаются количественно. Если в структуре роймиллерита содержатся 10 свинцовых слоев и четыре карбонатных, то, как сказано выше, в структурах бритвинита и молибдофиллита — семь свинцовых и два карбонатных и четыре свинцовых и один карбонатный соответственно.

Связь модулей молибдофиллита и бритвинита впервые заметили и описали У.Колитч с коллегами [6]. Они считали, что, согласно модулярной кри-

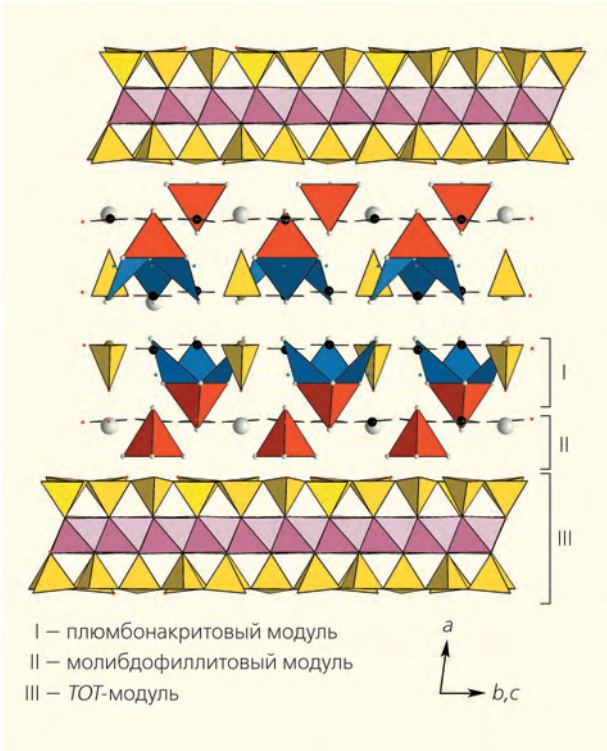


Рис.5. Модулярная структура роймиллерита.

Таблица 2

Сравнительные данные для роймиллерита и родственных минералов

Минерал	Роймиллерит	Бритвинит	Молибдофиллит
формула	$Pb_{24}Mg_9(Si_{10}O_{28})(CO_3)_{10}(BO_3)(SiO_4)(OH)_{13}O_5$	$Pb_{14-15}Mg_9(Si_{10}O_{28})(CO_3)_2(BO_3)_4(OH)_{12}(O,F)_2$	$Pb_8Mg_9(Si_{10}O_{28})(CO_3)_3(OH)_8O_2{\cdot}H_2O$
симметрия	триклинная	триклинная	моноклинная
пространственная группа	$P\bar{1}$	$P\bar{1}$	$C2$
a, Å	9.1955	9.3409	16.232
b, Å	9.2019	9.3597	9.373
c, Å	26.1095	18.8333	14.060
α,°	90.024	80.365	90
β,°	96.720	75.816	97.36
γ,°	119.912	59.870	90
V, Å^3	1897.4	1378.74	2121.5
Z	1	1	2
плотность, г/см^3	6.2	5.4	4.6
ссылки	[данная работа]	[5, 9]	[6]

Таблица 2

Состав модулей в минералах серии молибдофиллит-бритвинит-роймиллерит

Минерал	*TOT*-модуль	*I*-блок
молибдофиллит [6]	$\{Mg_9[Si_{10}O_{28}(OH)_8]\}$	$2{\cdot}\{(OPb_4)(H_2O)_{0.5}(TO_3)_{1.5}\}$
бритвинит [5, 6]	$\{Mg_9[Si_{10}O_{28}(OH)_8]\}$	$2{\cdot}\{[((O,F)Pb_4)Pb(TO_3)_3]{\cdot}[(O,OH)_2Pb_2]\}$ или $2{\cdot}\{[(OPb_4)Pb(TO_3)_3]{\cdot}[(O,OH)_2Pb_{2.5}]\}$
роймиллерит	$\{Mg_9[Si_{10}O_{28}(OH)_8]\}$	$2{\cdot}\{[(OPb_4)Pb(TO_3)_3]{\cdot}[(O(OH)_3Pb_7)(TO_3)_3]\}$

сталлографии [10], эти минералы относятся к *меротипной* серии и характеризуются присутствием пятислойного модуля $\{Mg_9[Si_{10}O_{28}(OH)_8](OPb_4)\}$, который чередуется с *I*-блоком $[(CO_3)_3{\cdot}H_2O]$ в молибдофиллите и с блоком $\{[(OH)_3OPb_7][(BO_3)_3|(CO_3)_3]\}$ в бритвините. В обоих случаях пятислойный блок включает как трехслойный полиэдрический фрагмент *TOT*, так и два слоя из $[OPb_4]$-тетраэдров.

Открытие роймиллерита позволило нам по-новому взглянуть на модулярность серии молибдофиллит—бритвинит—роймиллерит. Сравнительные данные для этих минералов собраны в табл.1, из которой кроме сходства составов, видны преемственность ячеек и симметрии.

Мы выделили трехслойный *TOT*-пакет в самостоятельный модуль как в роймиллерите, так и в молибдофиллите и бритвините, рассматривая его в качестве стабильной части структуры с точки зрения не только кристаллохимической интерпретации, но и химических связей. Вся межмодульная часть структуры, которая содержит чередующиеся простые свинцово-оксокарбонатные слои, представляется как *I*-блок. Его состав в трех минералах различается (табл.2), хотя и включает несколько одинаковых фрагментов, присущих отдельным структурам.

В кристаллической структуре молиблофиллита в *I*-блоке $[(OPb_4)_2(H_2O)(CO_3)_3(BO_3)_3]$ можно выделить два молибдофиллитовых модуля (рис.6). Каждый из них содержит анионоцентрированные (OPb_4)-тетраэдры и карбонатные слои. Несмотря на то, что в самой структуре молибдофиллита формально присутствует только один карбонатный слой (общий для двух соседних молибдофиллитовых модулей), его включение в каждый такой модуль имеет принципиальное значение.

Карбонатный слой, как часть молибдофиллитового модуля, присутствует также в структурах

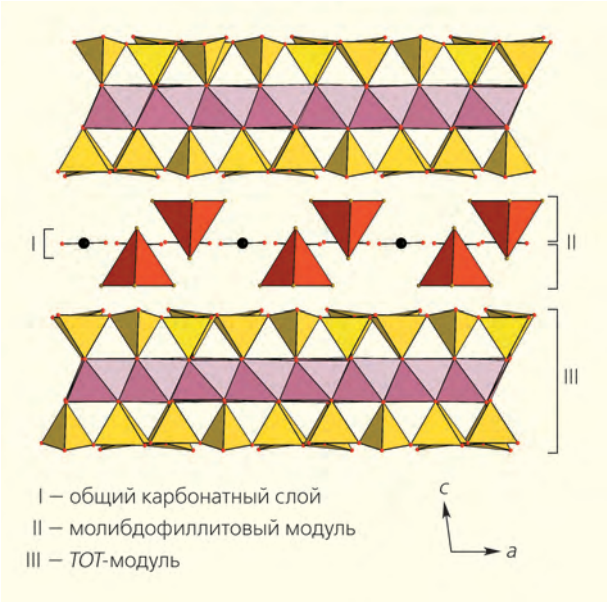


Рис.6. Модулярная структура молибдофиллита.

бритвинита (рис.7) и роймиллерита (см. рис.5). Наряду с (OPb_4)-тетраэдрами и (TO_3)-треугольниками, каждый молибдофиллитовый модуль содержит дополнительную *A*-позицию (см. рис.4,*a*), которая занята молекулой воды (в молибдофиллите) или Pb (в бритвините и роймиллерите). Таким образом, идеализированную формулу молибдофиллитового модуля можно записать как $\{(OPb_4)A(TO_3)_3\}$. Наличие молибдофиллитовых модулей в трех структурах не исключает присутствия дополнительных слоев. Так, в *I*-блоке бритвинита [5] молибдофиллитовые модули чередуются с фрагментом $\{(O,OH)_4Pb_4\}$, в котором присутствуют сильно разупорядоченные атомы свинца и кислорода (см. рис.7). Колитч уточнил структуру бритвинита и установил состав центрального блока как $\{O(OH)_3Pb_5\}$, в котором нет двух атомов Pb в *A* позиции [6].

В случае роймиллерита к молибдофиллитовым модулям добавляются чередующиеся с ними плюмбонакритовые $[(O(OH)_3Pb_7)(TO_3)_3]$, которые содержат гетерополиэдрические кластеры и (TO_3)-группы (см. рис.5).

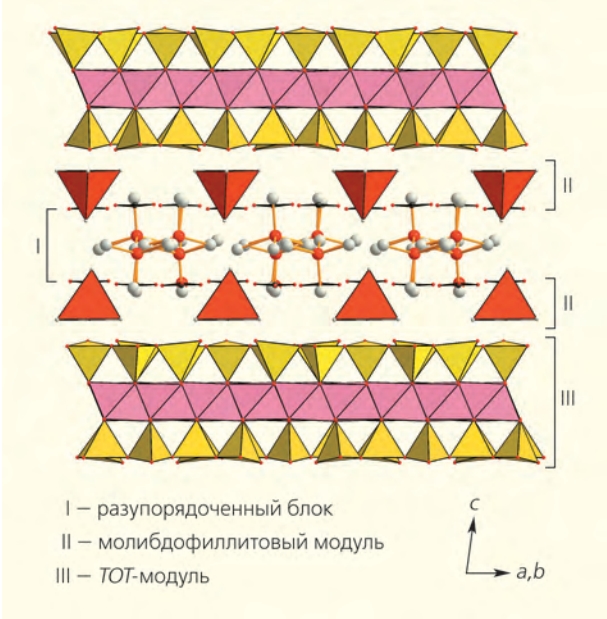


Рис.7. Модулярная структура бритвинита.

* * *

Открытие роймиллерита позволило по-новому взглянуть на структурно-химические модули в свинец-содержащих минералах. И хотя сейчас серия молибдофиллит—бритвинит—роймиллерит содержит всего три члена, можно ожидать находки новых представителей этой серии с иным количеством свинца и карбоната и другими типами модулей. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект МК-8033.2016.5).

Литература

1. *Innes J., Chaplin R.C.* Ore bodies of the Kombat mine, South West Africa/Namibia // Mineral deposits of southern Africa / Eds. C.R.Anheusser, S.Maske. Johannesburg, 1986. P.1789–1805.
2. *Chukanov N.V., Johnsson E., Aksenov S.M., Britvin S.N., Rastsvetaeva R.K. et al.* A new mineral roymillerite, $Pb_{24}Mg_9(Si_{10}O_{28})(CO_3)_{10}(BO_3)(SiO_4)(OH)_{13}O_5$: mineralogical characterization, crystal chemistry and physical properties // Phys. Chem. Minerals. 2017. Doi:10.1007/s00269-017-0893-2.
3. *Palatinus L., Chapuis G.* SuperFlip — a computer program for the solution of crystal structures by charge flipping in arbitrary dimensions // J. Appl. Crystallog. 2007. V.40. P.786–790.
4. *Petříček V., Dušek M., Palatinus L.* Jana 2006. Structure determination software programs. Praha, 2006.
5. *Якубович О.В., Масса М., Чуканов Н.В.* Кристаллическая структура бритвинита $[Pb_7(OH)_3F(BO_3)_2(CO_3)][Mg_{4.5}(OH)_3(Si_5O_{14})]$ — нового слоистого силиката с оригинальным типом кремнекислородных сеток // Кристаллография. 2008. Т.53. №2. С.233.
6. *Kolitsch U., Merlino S., Holtstam D.* Molybdophyllite: crystal chemistry, crystal structure, OD character and modular relationships with britvinite // Mineral. Mag. 2012. V.76. P.493–516.
7. *Krivovichev S.V., Mentré O., Siidra O.I. et al.* Anion-Centered Tetrahedra in Inorganic Compounds // Chem. Revs. 2013. V.113. P.6459–6535.
8. *Krivovichev S.V., Burns P.C.* Crystal chemistry of basic lead carbonates. II. Crystal structure of synthetic plumbonacrite // Mineral. Mag. 2000. V.64. P.1069–1075.
9. *Чуканов Н.В., Якубович О.В., Пеков И.В. и др.* Бритвинит, $Pb_{15}Mg_9(Si_{10}O_{28})(BO_3)_4(CO_3)_2(OH)_{12}O_2$ — новый минерал из Лонгбана, Швеция // Записки РМО. 2008. Т.136. №6. С.18.
10. *Makovicky E.* Modularity — different types and approaches // Modular aspects of minerals / Ed. S.Merlino. Budapest, 1997. P.315–343.

ЭВОЛЮЦИЯ, НАПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА

К 100-летию со дня рождения Д.К.Беляева

Дмитрий Константинович Беляев (1917–1985)

Много лет назад Дмитрий Константинович Беляев был членом редколлегии «Природы» (с 1975 по 1985 г.) и писал для нас замечательные статьи и рецензии. И вот теперь в нашем журнале публикуется посвященная его юбилею подборка, а мне, одному из учеников ДК (как называли Дмитрия Константиновича в кругу коллег), выпала честь написать к ней предисловие.

В название подборки вынесены слова Н.И.Вавилова, которыми он определял понятие селекции — самого главного дела ДК. Открывается подборка статьей Анатолия Овсеевича Рувинского, верного и последовательного ученика ДК. В ней рассказано об основных событиях жизни, о наиболее важных научных достижениях и, конечно, о любимом проекте ДК — уникальном эксперименте по одомашниванию лисиц, который был начат вместе с самой преданной его ученицей и последовательницей Людмилой Николаевной Трут. Из статьи Рувинского читатель узнает о подробностях этого эксперимента: о том, как и зачем он был начат, как проходил, к каким ожидаемым и совершенно неожиданным результатам привел.

Мы с Рувинским пришли работать под руководство ДК в лабораторию эволюционной генетики Института цитологии и генетики (ИЦиГ) в самом конце 1960-х гг. К тому времени первые результаты селекционного эксперимента были уже получены. В ручной линии лисиц, как и предполагалось, рождалось все больше животных со все более собачьим типом поведения — таких, которые не только не боялись человека, но активно стремились к контакту с ним. Однако самыми интересными оказались результаты, которых не ожидал никто. У одомашниваемых лисиц стали с высокой частотой появляться и нестабильно наследоваться в ряду поколений новые признаки окраски, морфологии и поведения, характерные для других домашних животных. Анализ этих новых форм, особенностей их проявления и наследования ДК поручил Рувинскому. Это было около 50 лет назад. Что из этого получилось, как дальше развивались эти исследования,

как их результаты можно интерпретировать, исходя из сегодняшних научных знаний, тоже описывается в статье Рувинского.

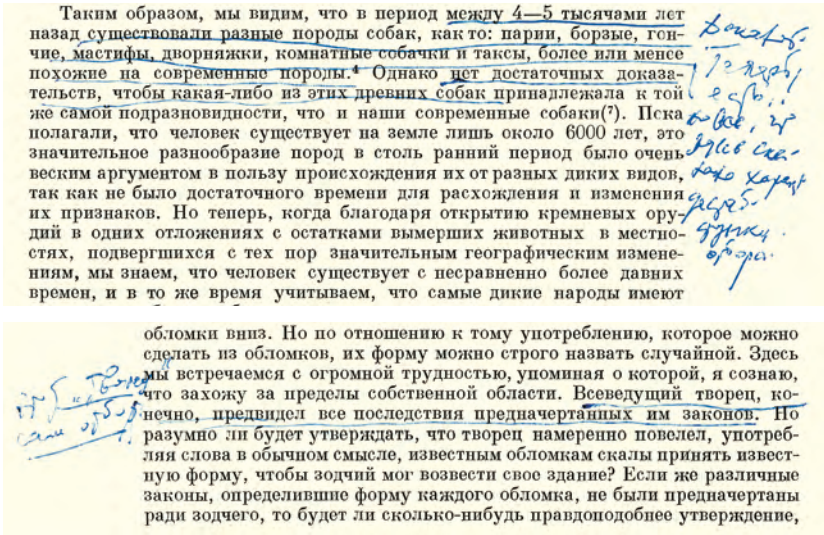
Уже тогда ДК ясно понимал, что результаты его эксперимента выходят далеко за рамки первоначальной задачи, и решил воспроизвести его на других видах. Доместикация американской норки была доверена Олегу Васильевичу Трапезову*. Доместикацию диких серых крыс ДК и Трут поручили мне. Я наловил крыс по свинарникам и прочим любопытным местам Новосибирска и начал их селекционировать на уменьшение либо усиление агрессии. Результаты вошли в мою дипломную работу. О том, как дальше проходил этот эксперимент и к чему он привел, читатель узнает из статьи Риммы Кожемякиной, публикуемой в этой подборке.

Из трех селекционных экспериментов лисий, конечно, впечатлял больше всего. Каждое поколение одомашниваемых животных приносило все новые сюрпризы. ДК пытался понять, в частности, почему отбор по одной из особенностей поведения приводит к каскаду изменений не только всего поведения, но и репродуктивной функции животных, их физиологии, эндокринологии и морфологии. Осмысление комплекса этих изменений привело ДК к идее дестабилизирующего отбора.

Впервые он изложил ее на семинаре в нашем институте в 1971 г. По мере обсуждения с коллегами, накопления и обдумывания материала идея менялась. Статья ДК, которую мы тоже воспроизводим в подборке, была впервые опубликована в «Природе» в 1979 г. Судя по всему, она представляет собой адаптированный текст пленарной лекции, которую ДК прочитал в августе 1978 г. на заключительном заседании XIV Международного генетического конгресса, генеральным секретарем которого он был. Я присутствовал на этой лекции в Кремлевском дворце съездов и хорошо помню вызванный ею шквал аплодисментов.

Не буду пересказывать суть идеи дестабилизирующего отбора, все прекрасно изложено в статье самого ДК. Скажу только два слова о том интеллектуальном климате, в котором она возникла и обсуждалась, и о том, как она развивается сейчас. Климат в отечественной эволюционной биологии 1970-х гг. был очень своеобразным. В свете новых открытий, в том числе выявления фантастического размаха нейтральной генетической изменчивости, открытия мобильных генетических элементов и обратной транскрипции, в очередной раз возникло острое желание сбросить Дарвина с корабля современности. Вполне заслуженные ученые объявляли, что если естественный отбор и играет какую-то роль, то лишь в микроэволюционных событиях — худо-бедно обеспечивая локальные адаптации. Что же касается макроэволюции, т.е. происхождения видов и более крупных таксонов, и возникновения новых признаков, то к этим явлениям унылый и медленный дарвиновский отбор мелких случайных отклонений будто бы никакого отношения не имеет. Все, мол, происходит скачками, быстро и целесообразно, по Л.С.Бергу и А.А.Любищеву, за счет дупликаций генов и хромосом, за счет прыгающих генов и наследования приобретенных признаков путем обратной транскрипции. Одним словом, птицы вылетают из яиц динозавров. Самые «смелые» ученые прозрачно намекали, что все это не обходится без руководящей и направляющей роли сами знаете кого.

И вот на таком фоне прозвучал твердый и ясный голос ДК, провозглашающий могущество естественного отбора. Вместо деления на формы ДК предложил выделять функции (или роли) отбора. В одних ситуациях он выполняет движущую функцию, используя явную, проявившуюся в фенотипах, генетическую изменчивость. В этой роли отбор меняет средние значения и частоты отбираемых признаков в популяциях. Благодаря Дарвину и его последователям мы знаем, как это происходит. (У меня на полке стоит полное собрание сочинений Дарвина из личной библиотеки ДК. Я бесконечно дорожу этим подарком семьи Беляева. На полях этих томов рассыпаны замечания и комментарии ДК, где он восхищается мыслями Дарвина, по-своему интерпретирует его наблюдения, спорит с ним.)



Таким образом, мы видим, что в период между 4—5 тысячами лет назад существовали разные породы собак, как то: парии, борзые, гончие, мастифы, дворняжки, комнатные собачки и таксы, более или менее похожие на современные породы.* Однако нет достаточных доказательств, чтобы какая-либо из этих древних собак принадлежала к той же самой подразновидности, что и наши современные собаки(?). Пока полагали, что человек существует на земле лишь около 6000 лет, это значительное разнообразие пород в столь ранний период было очень веским аргументом в пользу происхождения их от разных диких видов, так как не было достаточного времени для расхождения и изменения их признаков. Но теперь, когда благодаря открытию кремневых орудий в одних отложениях с остатками вымерших животных в местностях, подвергшихся с тех пор значительным географическим изменениям, мы знаем, что человек существует с несравненно более давних времен, и в то же время учитываем, что самые дикие народы имеют

обломки вниз. Но по отношению к тому употреблению, которое можно сделать из обломков, их форму можно строго назвать случайной. Здесь мы встречаемся с огромной трудностью, упоминая о которой, я сознаю, что захожу за пределы собственной области. Всеведущий творец, конечно, предвидел все последствия предначертанных им законов. Но разумно ли будет утверждать, что творец намеренно повелел, употребляя слова в обычном смысле, известным обломкам скалы принять известную форму, чтобы зодчий мог возвести свое здание? Если же различные законы, определившие форму каждого обломка, не были предначертаны ради зодчего, то будет ли сколько-нибудь правдоподобнее утверждение,

Комментарии ДК на полях сочинений Дарвина. Вверху: «Доказат[ельства] теперь есть! Но все, что здесь сказано, характ[еризует] дестаб[илизирующую] функц[ию] отбора»; внизу: «Этот “творец” — сам отбор».

* *Трапезов О.В.* Доместикация как самое раннее интеллектуальное достижение человечества // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2013. Т.17. №4/2. С.872–883.

Д.К.Беляев и его сотрудники. Слева направо: Л.Н.Трут, В.Г.Колпаков, П.М.Бородин, А.О.Рувинский. 1983 г.

Фото профессора Обри Мэннинга

Отбор также может выполнять стабилизирующую функцию, скрывая генетическую изменчивость под покровом нормального фенотипа, формируя механизмы сложных физиологических адаптаций. Эта функция отбора была открыта Иваном Ивановичем Шмальгаузеном, к личности и трудам которого ДК питал безграничное уважение. И наконец, есть ситуации, когда отбор вскрывает запасы генетической изменчивости, выявляя в фенотипах прежде невидимую, недоступную для наблюдения и отбора генетическую изменчивость. Именно эту функцию отбора ДК назвал дестабилизирующей.

Долгое время представления о том, что отбор не только сортирует изменчивость, но способен и сам ее вскрывать, казались фантастическими. Сейчас появляется все больше свидетельств того, что это действительно происходит. И постепенно мы начинаем понимать как — каковы молекулярные механизмы выявления в фенотипах скрытой генетической изменчивости (cryptic genetic variation)*.

Для ДК было вполне очевидно, что отбор может играть дестабилизирующую роль не только при доместикации, но и в эволюции природных популяций, в том числе и популяций человека. Он организовал и всячески поддерживал исследования в области генетики человека. Особенно его интересовала генетика человеческого поведения.

ДК вообще интересовали люди. Ему было интересно разговаривать с коллегами, партийными начальниками, студентами, вахтерами, генералами, электриками, актерами, писателями. О том, что ДК думал о человеке и человечестве, очень ясно рассказано в его интервью, которым мы завершаем подборку. Оно было опубликовано в 1986 г. в журнале «Вопросы философии» и называлось «Я верю в добрые начала человека». И я точно знаю, что это не просто красивые слова. ДК в них верил, в эти добрые начала. А ведь это было нелегко, учитывая число и поразительные способности негодяев и дураков, с которыми ему по долгу службы приходилось встречаться и иметь дело. Я бы на его месте давно разочаровался в человечестве. Самое смешное (а может, самое грустное), что некоторые из этих представителей рода человеческого потом, когда мы со Светланой Владимировной Аргутинской, вдовой ДК, готовили книгу воспоминаний о нем, приносили нам бесстыдные панегирики в честь ДК и, конечно, себя любимых. Но долго подобные люди рядом с ДК не задерживались. Близкий круг его друзей составляли очень хорошие, честные, добрые и интересные люди. Кроме всего прочего, я бесконечно благодарен ДК за друзей, с которыми он свел меня на всю жизнь.

В этой подборке мы также приводим короткие отрывки, написанные женой ДК и несколькими настоящими друзьями. Они были опубликованы в книге воспоминаний**, изданной ничтожным тиражом и немедленно ставшей редкостью. Сейчас ее по частям выкладывают в интернете***. Тем, кого интересует жизнь ДК и история его великого эксперимента, я рекомендую замечательную книгу Ли Дугаткина и Людмилы Николаевны Трут, которая только что вышла на английском языке и когда-нибудь выйдет на русском****.

В августе этого года в нашем институте, для создания, сохранения и развития которого ДК так много сделал и которому к тому времени, надеюсь, присвоят его имя, состоится международная конференция «Беляевские чтения», посвященная столетию выдающегося академика АН СССР. На ней соберутся друзья, ученики и последователи ДК, вспомнят о нем и поговорят о том, как живут и развиваются его дела и мысли.

П.М.Бородин,
профессор, доктор биологических наук,
сотрудник ИЦиГ с 1971 г.,
член редколлегии журнала «Природа»

* *Gibson G., Dworkin I.* Uncovering cryptic genetic variation // Nat. Rev. Genet. 2004. V.5. №9. P.681–690; *Schneider R.F., Meyer A.* How plasticity, genetic assimilation and cryptic genetic variation may contribute to adaptive radiations // Mol. Ecol. 2017. V.26. P.330–350.

** Академик Дмитрий Константинович Беляев: книга воспоминаний / Отв. ред. Шумный В.К., Бородин П.М., Маркель А.Л., Аргутинская С.В. Новосибирск, 2002.

*** http://conf.bionet.nsc.ru/belyaev100/aboutdkb

**** *Dugatkin L.A., Trut L.* How to tame a fox (and build a dog): Visionary scientists and a siberian tale of jump-started evolution. Chicago, 2017.

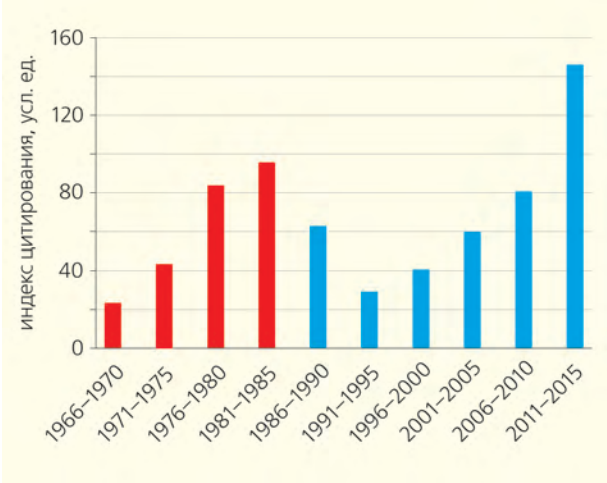
Доместикация

А.О.Рувинский,
профессор, доктор биологических наук,
сотрудник Института цитологии и генетики с 1969 по 1993 г.

Время стирает из индивидуальной и общественной памяти события, имена, названия исчезнувших городов и даже стран. Этот процесс неумолим. Только уникальные явления и люди способны противостоять забвению — именно они и создают каркас истории, в том числе истории науки. Нередко случается так, что чей-то вклад в науку или искусство оценивают по достоинству лишь спустя длительное время. Яркий пример — Грегор Мендель. Основоположник генетики не был понят своими современниками, и переоткрытие его работ началось через 35 лет после публикации ключевых результатов. Теперь каждый школьник обязан знать о фундаментальном вкладе Менделя в науку. Иногда работа ученого становится широко известной уже вскоре после публикации и получает заслуженное признание, однако только много позднее, вследствие развития науки, возникает понимание дополнительных аспектов выдающегося открытия и распространение базовых идей на другие сферы. Например, так произошло с идеей Чарльза Дарвина о естественном отборе, которая в наше время распространилась далеко за пределы эволюционной биологии. Таким образом, ценность научной идеи часто определяется позднее или получает неожиданное развитие. Многие представления не выдерживают проверки и постепенно отмирают, тогда как другие получают твердую поддержку и активно распространяются.

«Загадка» Беляева

В этой статье я расскажу о замечательном генетике и его идеях — о Дмитрии Константиновиче Беляеве, 100-летие со дня рождения которого отмечается в этом году. Однако прежде давайте посмотрим на динамику цитирования его работ. Индекс Беляева в Google Scholar (системе, осуществляющей поиск научных публикаций) постепенно рос вплоть до последнего года его жизни (1985), затем, после кратковременного снижения, снова продолжил расти и достиг к 2015 г. значений, превосходящих лучшие за полвека. В интернете существует около полумиллиона упоминаний Беляева, включая ссылки на его труды по доместикации животных. Любопытно, что в Google поисковая комбинация «Д.К. Беляев доместикация» встречается 9510 раз, а комбинация «D.K. Belyaev domestication» — 13700 раз (по состоянию на 10.05.2017). В чем же причина такого значительного интереса к этому ученому и к доместикации в России и других странах?



Цитирование работ Д.К.Беляева в англоязычной литературе согласно данным Google Scholar.

Разные люди, возможно, неодинаково ответили бы на этот совсем не праздный вопрос. Я вижу по крайней мере три основных причины. Во-первых, беляевское понимание процесса доместикации успешно прошло экспериментальное испытание и проверку временем. Неслучайно профессор Раймонд Коппингер, признанный специалист в этой области, назвал доместикационный проект, осуществляемый в новосибирском Академгородке, одним из самых значительных в эволюционной биологии XX в. А я бы добавил, что и XXI в. тоже, поскольку этот проект до сих пор развивается и привлекает новых участников из разных стран мира. Во-вторых, сотрудники, продолжившие работу Беляева, в первую очередь, Людмила Николаевна Трут, которая посвятила развитию этой уникальной работы без малого 60 лет,

© Рувинский А.О., 2017

С учениками — Людмилой Николаевной Трут и Анатолием Овсеевичем Рувинским. Начало 1970-х гг.

Все фотографии в подборке (за исключением отмеченных особо) предоставлены Институтом цитологии и генетики СО РАН

продемонстрировали самоотверженное служение науке. В результате эта замечательная работа не только успешно продолжилась, но в ней возникли новые направления и сотрудничества. Наконец, в-третьих, за десятилетия, прошедшие с начала доместикационного проекта, биология и ее методические возможности радикально трансформировались. То, о чем невозможно было даже мечтать в 1970-е гг., стало вполне достижимым. Все перечисленные обстоятельства в совокупности создали этому проекту великолепную репутацию не только в России, но и далеко за ее пределами.

Начало долгого пути

Дмитрий Константинович Беляев родился в небольшом селе Протасово Костромской губернии в семье священника. Его родители хорошо понимали важность образования, и чтение вслух было традиционным. Они собрали хорошую библиотеку, в которую помимо большого количества книг входили подшивки журналов и газет. Любовь к чтению, возникшая в родительском доме, никогда не покидала Беляева. Старший брат Николай содействовал его интересу к живой природе и биологии. Во второй половине 1920-х гг. для семьи Беляевых настали трудные времена — и родители с болью в сердце вынуждены были отправить десятилетнего подростка в Москву к старшему брату, на тот момент уже молодому генетику Николаю Константиновичу. Он работал в лаборатории С.С.Четверикова в Институте экспериментальной биологии, директором которого был Н.К.Кольцов. Теперь каждому, кто хоть немного знаком с историей отечественной и мировой генетики, ясно, что то был совершенно уникальный центр генетической мысли, оказавший значительное влияние на развитие этой науки.

Четвериков — бесспорно, один из основоположников популяционной генетики. Глубина его научного анализа и понимание принципиальных задач генетики сплотили вокруг него группу выдающихся молодых исследователей, в которую кроме Н.К.Беляева входили Б.Л.Астауров, Е.И.Балкашина, С.М.Гершензон, А.Н.Промптов, П.Ф.Рокицкий, Д.Д.Ромашов, Е.А.Тимофеева-Ресовская (Фидлер), Н.В.Тимофеев-Ресовский и др. Юному Дмитрию Беляеву нужно было еще долго учиться, прежде чем он смог бы постичь генетические премудрости, о которых шла речь на семинарах сотрудников Четверикова. Однако обстановка, царившая на этих СООРах (СОвместное ОРание), куда он попал несколько раз за компанию с братом, запечатлелась в его памяти. К большому сожалению, невероятный всплеск талантов в четвериковской лабора-

Родители — Константин Павлович и Евстолия Александровна. 1900 г.

тории был недолговечен, как и сама лаборатория. После командирования Тимофеевых-Ресовских в Берлин, а позднее ссылки Четверикова на Урал лаборатория исчезла. В конце 1928 г. Н.К.Беляев был направлен в исследовательский институт в Ташкент, а потом в Тбилиси, где был репрессирован и расстрелян в 1937 г. Астауров тоже был направлен в Ташкент, Гершензон — в Киев, Рокицкий — в Минск. После отъезда брата из Москвы Дмитрий Беляев жил у сестры Ольги. Интерес к биологии не ослабевал, и он читал все интересное, что удавалось добыть. В 1934 г. поступил в Ивановский сельскохозяйственный институт, так как высшее образование в Москве сыну священника было недоступно. По завершении учебы был распределен в Центральную научно-исследовательскую лабораторию (ЦНИЛ) пушного звероводства, где начал работать над кандидатской диссертацией.

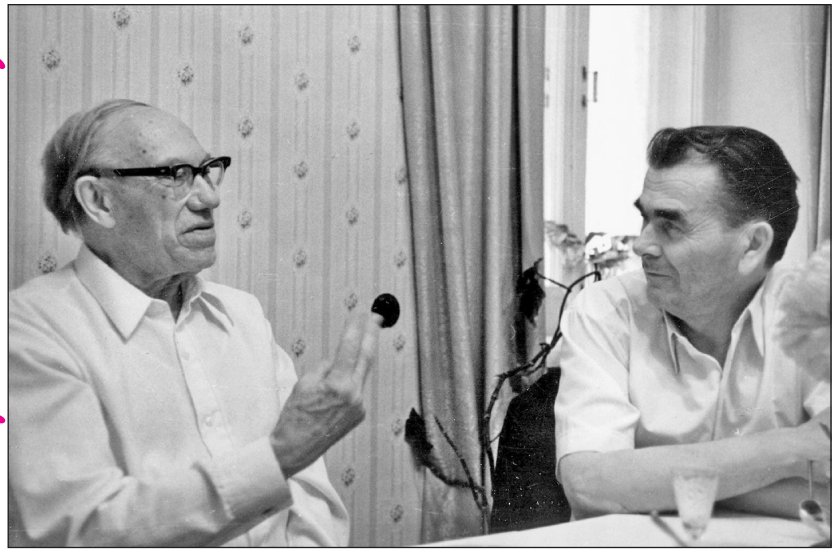
На фронте. 1942 г.

Первый день войны застал Беляева в Тобольске, где он собирал материалы для своего исследования. Не раздумывая, он отправился в Москву и через несколько дней добровольцем ушел на фронт. Рядовым он вместе с сотнями тысяч солдат и офицеров узнал, что такое война: ее страшные тяготы не обходили никого стороной. Менее чем через год его назначили начальником химической разведки полка. Последовали многочисленные бои, контузия, ранения, два ордена Красной Звезды и другие составляющие тяжелого военного бытия. Незаурядные организационные способности Беляева, храбрость, умение работать с людьми были замечены — и он закончил войну майором. Вскоре его дивизию передислоцировали в Алма-Ату, где он прослужил до конца 1945 г. и был демобилизован по запросу А.И.Микояна, возглавлявшего в то время Минвнешторг. Стране срочно требовались знающие кадры, способные за короткий срок поднять клеточное пушное звероводство. Без генетики сделать это было невозможно. Беляев вернулся в ЦНИЛ пушного звероводства и уже в 1946 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Изменчивость и наследование серебристости меха серебристо-черных лисиц», а также закончил работу над монографией «Основы генетики и селекции пушных зверей». Без промедления Беляева назначили заведующим отделом ЦНИЛ пушного звероводства. Будущее сулило новые интересные возможности. Однако все, что удалось сделать за два года, оказалось не только ненужным, но и весьма опасным. В августе 1948 г., сразу после печально знаменитой сессии ВАСХНИЛ, Беляева отстранили от занимаемой должности. Формулировка гласила: «Снять с работы за менделизм-морганизм. Оставить в должности старшего научного сотрудника» [1]. Позднее ее изменили на «Назначить на должность старшего научного сотрудника отдела селекции и разведения». Спасительным обстоятельством послужила подчиненность ЦНИЛ Минвнешторгу, который был важным источником валюты для страны и иногда следовал собственным законам.

Вопреки

Характер Дмитрия Константиновича и трудный опыт, приобретенный за первые тридцать лет жизни, не позволяли расслабиться, поникнуть или тем более покаяться за пристрастие к генетике. Конечно, возможности открыто вести научную генетиче-

С сотрудниками отдела селекции и разведения животных Центральной научно-исследовательской лаборатории пушного звероводства. 1948 г.



С Михаилом Алексеевичем Лаврентьевым. 1978 г.

скую работу и публиковать результаты были жестко ограничены. В последующие годы ДК (как его называли в кругу учеников и сотрудников) внес значительный вклад в развитие пушного звероводства в стране, что в конечном счете способствовало резкому росту экспорта пушнины. Тогда же, в конце 1940-х — начале 1950-х гг., он выполнил цикл работ по изучению фотопериодических условий (продолжительности светового дня, соотношения между темным и светлым временем суток и т.п.) как фактора, который регулирует гормональный статус, влияет на размножение животных и снижает эмбриональную смертность. Спустя 20–25 лет Беляеву и его сотрудникам в Институте цитологии и генетики (ИЦиГ) СО АН СССР удалось получить отличные результаты, опираясь на этот ранний опыт. В эти же годы в стране началось стремительное развитие так называемого цветного норководства, основанного на использовании рецессивных аллелей нескольких генов, влияющих на окраску меха.

Вскоре разумным руководителям отрасли стало ясно, что без генетических знаний невозможно успешно решать задачи, поставленные партией и правительством. Локальные отступления от решительной борьбы с «вредоносной» генетикой после 1953 г. стали происходить то тут, то там. Некоторые ведущие физические институты не могли обойтись без точного понимания радиационной биологии и генетики и, по существу, прятали небольшие группы этих исследователей в своих структурах. Другой способ скрывать генетические исследования — институты и конструкторские бюро тюремного типа, или шарашки (в одной из которых до 1956 г. работал выдающийся генетик Тимофеев-Ресовский).

Иногда пропаганда генетики прикрывалась замечательной коллекцией шкурок норки различных цветов. Одна из подобных лекций была прочитана ДК в середине 1950-х гг. в переполненном зале Политехнического музея в Москве. Первые скромные победы в борьбе с мракобесием вдохновляли, однако до весны было еще далеко. Поддержка генетики крупными отечественными физиками и учеными других специальностей обнадеживала. Среди них были И.В.Курчатов, А.Ф.Иоффе, Н.Н.Семёнов, А.А.Ляпунов, В.Н.Сукачёв, В.А.Энгельгардт и др.

В это непростое время постепенно формировался главный научный интерес Беляева, связанный с изучением сути эволюционных преобразований. Процесс доместикации лисиц проходил прямо у него на глазах, поэтому, острый наблюдатель и аналитик, он не мог не понять, что по скорости и глубине преобразований трудно найти нечто подобное в природе. Дарвин первым уделил этой теме серьезное внимание. Достаточно сказать, что первая глава его главной книги «Происхождение видов» целиком посвящена изменчивости, возникающей при доместикации. Позднее Дарвин опубликовал даже отдельную монографию на эту тему.

Представление о том, что отбор по поведению, воздействуя на нейрогормональные компоненты, служит ведущим фактором доместикации животных, начало формироваться у Беляева в конце 1940-х гг. В 1950 г. он познакомился с академиком Л.А.Орбели, прославленным физиологом, который одобрил идею и очень сожалел, что они встретились уже после съезда Физиологического общества имени И.П.Павлова того года [1]. Именно на том съезде физиологию постигла та же участь, что и генетику двумя годами ранее. В результате этих событий Орбели утратил многие полномочия и не мог оказать реальную помощь в проведении эксперимента, который обдумывал Беляев. Однако одобрение Орбели буквально окрылило ДК. Он активно стал организовывать экспериментальную проверку своих идей. В итоге производственно-технический совет Главзверопрома, организации, занимающейся практическими вопросами звероводства, дал разрешение на проведение экспериментов в эстонском зверосовхозе. Такая бесценная для ДК помощь в трудные послевоенные годы отражала доверие и уважение большинства членов совета.

Не успел Беляев развернуть экспериментальную работу, как его пригласил к себе Н.П.Дубинин, который в 1957 г. активно занялся организацией Института цитологии и генетики в формирующемся Сибирском отделении Академии наук

СССР, и предложил создать и возглавить отдел генетики животных. ДК без колебаний согласился и так навсегда связал свою жизнь и творчество с новосибирским Академгородком, который уже через 10 лет стал всемирно известным научным центром. В 1957–1958 гг. в отделе генетики появились первые сотрудники. Среди них — выпускница Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова Людмила Николаевна Трут, которая восприняла научные идеи своего учителя и начала один из самых необычных и впечатляющих биологических экспериментов XX в. Конечно, в далеком 1958 г. даже большим оптимистам подобное определение показалось бы очень странным.

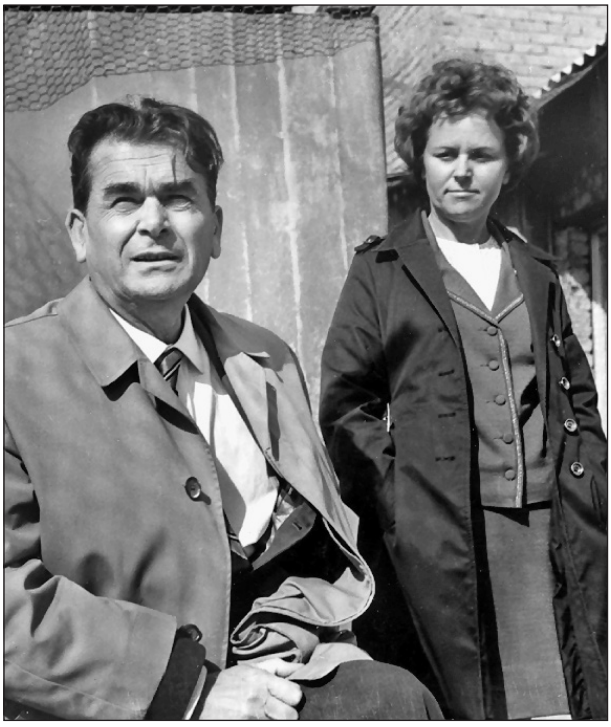
На звероферме экспериментального хозяйства СО АН СССР с доместицированными лисицами. Середина 1970-х гг.

Между тем Т.Д.Лысенко и его сторонники стремились удушить Институт цитологии и генетики. Твердость и поразительная находчивость, проявленные первым президентом Сибирского отделения АН СССР М.А.Лаврентьевым, буквально спасли институт. Однако спасти директора Дубинина оказалось невозможным, так как его смещением занялся лично Н.С.Хрущёв во время краткосрочного посещения Академгородка в 1959 г. Трудная задача руководства институтом легла на плечи Беляева. Впоследствии стремительное развитие ИЦиГ и бесконечные нападки на него продолжались. Только в конце 1964 г., когда Хрущёв был смещен и пришел конец влиянию Лысенко, в институте почувствовали, что его существованию ничто более не угрожает.

Первые результаты

Цель эксперимента по доместикации состояла в том, чтобы отбирать лисиц, демонстрирующих спокойное по отношению к человеку поведение, и в итоге получить животных, похожих по поведению на домашнюю собаку. Поэтому главным критерием селекции служила спокойная реакция лисиц на контакт с человеком. Трусливые и агрессивные особи из эксперимента исключались.

В начале 1960-х гг. рядом с Академгородком выросла большая ферма, и с тех пор доместикационный эксперимент проводится в непрерывном режиме. Уже первые 5–6 поколений отбора привели к значительному росту количества лисиц с ранее невиданным типом поведения. Эти животные не только не обладали сколько-нибудь выраженной агрессивностью по отношению к человеку, но уже вскоре после рождения проявляли позитивную реакцию, подобно щенкам многих пород собак. Никакая дрессировка не производилась: происходил активный отбор генетических вариантов, вызывавших столь необычное поведение. В экспериментальной попу-



С Людмилой Николаевной Трут. Середина 1970-х гг.

Слева — гетерозиготная лисица с фенотипом «звездочка» (Ss), справа — гомозиготная лисица (SS).

ляции существовало генетическое разнообразие, способное обеспечить эффективность отбора по поведению. Хотя этот результат весьма впечатлял всех посетителей фермы, для организаторов эксперимента он был вполне ожидаем. Следует отметить, что селекция в противоположном направлении быстро вела к появлению агрессивных животных, а в контрольной популяции, где отсутствовал какой-либо сознательный отбор лисиц по поведению, никаких заметных изменений не наблюдалось.

Но вскоре стали появляться менее ожидаемые результаты, причем с удивительной скоростью. Строгая сезонность линьки и размножения лисиц, как и многих других млекопитающих средних и высоких широт, — чрезвычайно важная адаптация. Ее потеря или даже изменение с неизбежностью поставили бы такие виды в природных условиях на грань выживания. Основной фактор, определяющий такую жесткую сезонность, — фотопериодические изменения, которые происходят в течение года. Отметим, что связи между меняющимися фотопериодическими условиями и многочисленными молекулярными и физиологическими процессами достаточно хорошо изучены, в том числе связь этих условий с динамикой функции половых желез, которые играют решающее значение в формировании цикличности и моноэстричности (размножения один раз за год). Несмотря на то, что у лисиц в природе и в условиях клеточного содержания не обнаружено генетическое разнообразие по реакции на фотопериод (соотношение светлого и темного времени суток) и все они следуют одному и тому же природному ритму, уже к 8-10 поколению животных, подвергнутых отбору по поведению, стали появляться самки, готовые к размножению на границах репродуктивного сезона и даже за ними [2, 3]. Постепенно были обнаружены и исследованы сотни таких лисиц. Среди наиболее доместицированных особей отчетливо проявилась тенденция к потере сезонности размножения. Это не что иное, как постепенный слом жестко стабилизированной и принципиально важной для вида адаптации. Нечто подобное произошло у собак, многие породы которых тоже утратили строгую сезонность размножения. Эти и связанные с ними фундаментальные изменения затронули развитие, настройку и функционирование гормональных и нейротрансмиттерных систем. Форму отбора, вызывающую столь широкий спектр преобразований, Беляев назвал дестабилизирующей.

Появление фенотипических новшеств, ранее не характерных для лисиц, но типичных для собак и других одомашненных млекопитающих, стало регулярным примерно к десятому поколению. Среди них — появление «звездочек», т.е. белых пятен на голове; рыжих пятен на шее и боках; повисших кончиков ушей; резко укороченного и закрученного хвоста; изменений в пропорциях черепа, челюстей и других частей скелета [2, 3]. Гомозиготизация рецессивных мутаций в ряде таких случаев была исключена в качестве возможного объяснения, поскольку наследование имело доминантный аутосомный характер. Удивительным образом у некоторых наиболее доместицированных лисиц изменилась вокализация — и очень специфичное для этого вида тявканье стало напоминать лай собак. По мере продолжения доместикационного проекта в ручном поведении лисиц появились новые признаки, например способность отзываться на кличку и стремление защищать хозяина. Преобразование волка в собаку «современного» типа потребовало, по разным оценкам, многие тысячи лет, а в случае доместицируемых лисиц все происходило в течение последних шести десятилетий. В процессе интенсивного отбора сменилось более 50 поколений животных, около 55 тыс. потомков были тестированы на соответствие установленным критериям поведения и другим доместикацион-

ным параметрам. Всего более 17 тыс. лисиц были использованы в качестве родителей следующих поколений [2]. По крайней мере два вывода, вытекающих из результатов этого ставшего классическим эксперимента, не вызывают вопросов. Во-первых, направленный отбор по поведению безусловно вызывает многочисленные изменения в различных характеристиках животных. И во-вторых, особенности, приобретаемые лисицами в ходе эксперимента, очень похожи на типичные для собак и других одомашненных животных.

Исследование механизмов доместикационных преобразований

Дмитрий Константинович не мог не понимать, что есть два серьезных препятствия, мешающих познанию процессов доместикации животных. Одно из них — время, необходимое для достижения глубокой степени одомашнивания. Используя термин «доместикация», мы в действительности имеем в виду особый случай эволюционного преобразования вида, что в природе обычно требует длительного времени. Другое обстоятельство состоит в том, что молекулярная генетика, в особенности млекопитающих, только начинала развиваться в конце 1970-х — начале 1980-х гг. О строении и функционировании геномов практически ничего не было известно. Умножая два упомянутых обстоятельства на чрезвычайную сложность биологических процессов, легко представить себе неизбежные трудности и вызовы, которым приходилось противостоять. В наши дни ситуация изменилась: доместикационный эксперимент продолжается уже довольно долго, а стремительное развитие молекулярной генетики и геномики за последние 30 лет превзошло самые смелые ожидания. Контуры некоторых ответов на вопросы, порождаемые в рамках доместикационного эксперимента, начинают формироваться, и мы затронем их далее.

Два критически важных феномена в процессах развития организмов были открыты генетикой уже без малого столетие назад. Один из них получил название «плейотропия», т.е. множественное действие гена. Это означает, что один ген может влиять на развитие нескольких признаков, пусть и кажущихся не связанными друг с другом. Современная генетика значительно приблизила нас к пониманию молекулярной и клеточной основ плейотропии. Огромное количество генных и белковых взаимодействий можно описать как сеть, в которой каждый ген или белок представлен узлом, связанным с другими генами или белками. Некоторые узлы имеют небольшой набор связей, тогда как другие обладают обширными связями и могут влиять на многочисленные молекулярные и клеточные процессы. Выявление таких крупных узлов взаимодействий поможет выяснить, какие молекулярные механизмы лежат в основе столь комплексного эволюционного события, как доместикация. Один из подобных «влиятельных» узлов рассмотрен далее. Другой феномен — полигения, т.е. формирование практически любого фенотипического признака под действием многих генов.

Оба эти феномена, плейотропия и полигения, вносят заметный вклад в случайность процессов развития. Такая случайность, казалось бы, генетически строго детерминированных событий свойственна не только индивидуальному развитию, но и эволюционным процессам [4]. Хорошо известно, что отбор в природе и отбор по поведению в ходе доместикационного эксперимента происходят по фенотипу. Поскольку его связь с генотипом не жесткая, за схожими фенотипами совсем не обязательно стоят одинаковые генотипы. Поэтому не стоит удивляться, что наборы признаков, приобретенных разными видами доместицированных млекопитающих, совпадают не полностью. Скорее следует поражаться многочисленным совпадениям. Есть нечто, что вводит разные доместицируемые виды в некий общий канал эволюционных преобразований, как нередко выражал эту мысль сам ДК.

Поведение, будучи исключительно комплексным признаком, формируется как результирующая взаимодействий различных компонент нейрогормональной системы и сигналов, поступающих из внешней среды. Беляев понимал это и активно приглашал к сотрудничеству эндокринологов и нейроэндокринологов. Благодаря ему три лаборатории такого профиля присоединились к растущему ИЦиГ. Интересные результаты, демонстрирующие у доместицируемых животных значительные изменения в гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системе, серотониновой, норадреналиновой и допаминовой нейротрансмиттерных и в других нейрогормональных системах, начали публиковаться с 1970-х гг. В ряде случаев прослежено нарастание различий между доместицируемыми и контрольными животными в ходе эксперимента. Существует обширная литература, в которой детально анализируются происходящие гормональные изменения [5, 6]. Среди многих изученных компонент этих систем следует отметить возникновение в процессе доместикации убедительных преобразований в уровне активности разных гормонов и биологически активных молекул, включая кортизол, серотонин, адреналин, норадреналин, проопиомеланокортин, β-эндорфин, адренокортикотропный гормон и др. [2].

Чрезвычайная сложность системы, вовлекаемой в отбор по поведению, осложняет обнаружение компонент, генетическое разнообразие которых могло играть наиболее важную роль на самых ранних этапах доместикации. На помощь ученым пришли методы геномного анализа, ко-

торые были успешно использованы при исследованиях собаки и других млекопитающих. Трут с коллегами активно сотрудничает с ведущими лабораториями мира. Были построены генетические карты лисицы и выровнены относительно подобных карт собаки, что способствовало значительному расширению аналитических возможностей [7]. Одна из задач состоит в картировании так называемых локусов количественных признаков (ЛКП), или QTL (Quantitative Trait Loci), которые вносят значимый вклад в формирование сложных признаков, например кумулятивных, т.е. представляющих собой корреляты нескольких количественных признаков, или особенностей поведения. Первичная цель такого картирования — обнаружение хромосомных участков, оказывающих статистически достоверное влияние на формирование изучаемых признаков. В рамках обсуждаемой работы имеются в виду признаки, играющие центральную роль в ходе одомашнивания. Два таких локуса были идентифицированы на 12-й хромосоме лисиц (которая соответствует 5-й хромосоме собаки), и оба связаны с доместикационным поведением. Один из них оказался ортологичным соответствующему локусу у собаки, который также вовлечен в процесс одомашнивания [8].

Понятно, что лисицы, изначально отобранные для эксперимента, невзирая на соответствие критериям отбора по поведению, могли иметь не всегда совпадающие генотипы. Возможно, поэтому различные селекционные линии в пределах доместицируемой популяции отличались по поведенческим признакам. Детальное исследование такого этологического доместикационного разнообразия и генетическое картирование влияющих на него ЛКП показали, что многие изучаемые поведенческие признаки, а также их коррелированные группы картируются в одни и те же геномные районы. Всего было выявлено восемь достоверных или вероятных ЛКП, расположенных на нескольких хромосомах [9]. Два ЛКП, обнаруженные у лисиц, совпадают с хромосомными участками, вовлеченными в доместикацию у собак, что следует рассматривать как показатель сходства доместикационных процессов у этих двух видов. Обнаружение геномных районов, оказывающих существенное влияние на изучаемые признаки, открывает возможности для следующих циклов работ, включая секвенирование определенных последовательностей ДНК, их сравнительный анализ, поиск изменений в структуре ДНК и выяснение их функционального значения, интегрирование вновь полученных знаний в существующую систему представлений о молекулярных и клеточных взаимодействиях и т.д. Все это дает надежду на успешное продолжение доместикационных исследований, а значит, на продолжение работ, инициированных Беляевым.

Комплекс окситоцин — рецептор окситоцина

Отбирая животное по одному признаку, мы автоматически отбираем разнообразие по всем остальным генам. Этот незыблемый факт был подтвержден анализом транскрипционной активности генов, работающих в префронтальной коре головного мозга лисиц. Активность около 100 из них у животных с ручным и агрессивным поведением отличалась вдвое и больше [10]. Понятно, что далеко не все гены, которые демонстрируют функциональные изменения, имеют непосредственное отношение к поискам одного или нескольких генов, наиболее существенных для преобразования поведения и трансформации онтогенеза. Накопление молекулярных данных, касающихся доместикации собаки, весьма полезно для поисков генов, которые играют особую роль в доместикации лисиц, так что обе модели содействуют друг другу. Особенно целесообразным представляется поиск генов или белков, имеющих большое количество различных связей, критически важных для многих процессов развития и жизнедеятельности.

Рассмотрим в качестве яркого примера недавнее исследование гена *OXTR* у собак [11, 12]. Он кодирует белок, функционирующий в качестве рецептора для гормона и нейропептида окситоцина (OXT). Окситоцин, состоящий всего из девяти аминокислотных остатков, связывается с рецептором окситоцина (OXTR) — крупной белковой молекулой (389 аминокислот), встроенной в клеточную мембрану, — и активирует его. Это, в свою очередь, ведет к активации так называемого G-белка, который запускает цепь молекулярных реакций внутри клетки. Изучение молекулярного полиморфизма гена *OXTR* выявило не только значительные различия между породами собак и волком, но и привело к обнаружению аллелей, которые найдены только у собак. Исходя из того, что одна из важных характеристик комплекса OXT-OXTR — модуляция поведения животных, включая социальное поведение, устойчивость к стрессу, привязанность и когнитивные функции, было высказано предположение о его существенной роли в доместикационном процессе и особенно в отборе на предпочтительные для человека темперамент и социальное поведение. Эта гипотеза подкреплена данными об экспрессии *OXTR* в различных структурах головного мозга [12]. Полиморфизм по гену окситоцина (*OXT*) в человеческих популяциях коррелирует с различиями в склонности к сопереживанию и в реакции на стресс, что представляет потенциальный объект для исследования у доместицируемых лисиц. Внимание к комплексу OXT-OXTR применительно к проблеме одомашнивания растет по мере расширения знаний о его полифункциональности [13]. Хотя экспериментальные данные по комплексу

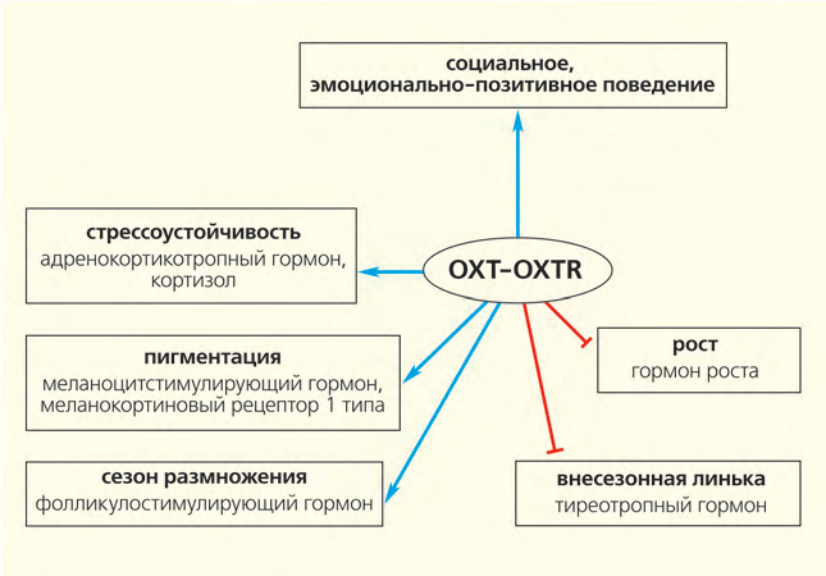
OXT-OXTR в процессе отбора лисиц по поведению пока отсутствуют, наличие обильной информации для других видов млекопитающих, в том числе для человека и собаки, делают предположение о существенной роли этого комплекса в доместикации лисиц вполне вероятным.

Как уже было отмечено, изменения в сезонности размножения у лисиц с ручным поведением достаточно быстро стали проявляться в ходе селекционного процесса. Другое типичное изменение — преждевременные внесезонные линьки. Похоже, у этих животных некоторым образом изменилась реакция на сезонные фотопериодические условия. Эволюция большинства видов проходила при регулярной смене дневной и ночной фаз. Вследствие таких воздействий сформировалась сложная циркадная система, которая у млекопитающих состоит из центрального регулятора, находящегося в супрахиазматическом ядре гипоталамуса, и локальных осцилляторов («часов»), расположенных во многих клетках тела и обладающих значительной автономностью. Супрахиазматическое ядро постоянно адаптируется к сезонно меняющемуся фотопериоду и синхронизирует периферические часы, используя многочисленные стимулы.

Подстройка ритма репродуктивной активности у самок млекопитающих к меняющимся условиям зависит от многих факторов, два из которых имеют особое значение. Первый — эстрогенная система с отрицательной обратной связью, сопряженная с созреванием ооцитов и последующими стадиями репродуктивного процесса. Второй — центральные циркадные часы, которые оказывают влияние на все периферические, локализованные в разных компонентах репродуктивной системы. Здесь необходимо отметить, что существуют прямые молекулярные взаимодействия OXTR с эстрогенами и α-рецепторами эстрогенов. Значительные изменения уровня эстрогенов у доместицируемых лисиц позволили предположить, что так создается эндокринная основа для внесезонной активации репродуктивной функции у самок [14]. Если у доместицируемых лисиц, подобно собакам, действительно возникли и были отобраны необычные аллельные варианты гена *OXTR*, допущение об их возможной синергии с измененным уровнем эстрогенов и, следовательно, об усилении внесезонной активации репродуктивной функции у самок кажется вполне правдоподобным.

Представление, согласно которому комплекс окситоцина и его рецептора мог оказаться важным узлом молекулярных взаимодействий в рассматриваемом процессе, не лишено оснований [15, 16]. Совершенно очевидно, что в мощном преобразовании целого ряда базовых систем развития и функционирования организмов, происходящем при экспериментальной доместикации, задействовано множество других генов и белков. Однако привлекательность комплекса OXT-OXTR заключается в том, что генетические изменения в нем могли воздействовать на набор признаков, преобразование которых началось на самых ранних этапах отбора по поведению. Этот набор включает в себя социальные формы поведения, устойчивость к эмоциональному стрессу, внесезонную активацию репродуктивной функции и линьки, изменения пигментации и ростовых характеристик. Огромное количество информации, накопленной в доместикационных исследованиях, позволит со временем критически проанализировать роль комплекса OXT-OXTR и его возможной генетической изменчивости в процессе доместикации.

Хорошо известно, что OXTR активно синтезируется в тканях матки и плаценты. Меньше данных опубликовано о синтезе этого рецептора в ходе эмбрионального развития млекопитающих. Тем не менее присутствие OXTR обнаружено на всех ранних стадиях вплоть до имплантации, а также у новорожденных млекопитающих. Так, окситоцин, производимый в стенке матки, играет важную роль при имплантации эмбрионов. Среди других особенностей следует упомянуть метилирование некоторых фрагментов ДНК



Комплекс окситоцин — рецептор окситоцина (OXT-OXTR) оказывает разнообразное влияние на многие процессы у млекопитающих, в том числе и на те, которые особенно подвержены изменениям в ходе доместикации [15, 16]. Синими линиями показано стимулирующее действие, красными — подавляющее.

гена *OXTR*, обнаруженных в клетках головного мозга. Такие эпигенетические модификации влияют на синтез белка OXTR, что критически важно для эффективного действия окситоцина. Высокий уровень метилирования *OXTR* ассоциируется с повышенной нейронной реакцией и соответствующими изменениями в социальном восприятии и процессировании эмоций [17].

Фенотипические новшества

Ранее было упомянуто, что в ходе доместикации у лисиц начали появляться различные фенотипические новшества. Среди них особое место занимает специфическая пегость, получившая название «звездочка», яркое проявление которой не встречается у диких лисиц [18]. Однако похожие пегости очень характерны для многих доместицированных видов. Этот фенотип определяется доминантным аутосомным аллелем *S*. Частота появления *de novo* лисиц с таким фенотипом в доместицируемой популяции превысила 10^{-2}, в то время как в контрольных популяциях она была в 10–100 раз ниже, а интенсивность выражения этого фенотипа (экспрессивность) была минимальной. Сравнение нескольких независимо возникших генеалогических линий с этим признаком показало, что они существенно различаются. У части таких линий наследование осуществлялось достаточно близко к менделевским ожиданиям, в других наблюдалась резкая нехватка потомков со «звездочкой». Частота фенотипического проявления аллеля *S* была достоверно повышена в потомстве матерей с хорошо развитым доместикационным поведением; противоположные результаты обнаружены у самок, не подвергавшихся селекции по поведению. Гомозиготы (*SS*) обладали ранее не известным фенотипом, причем это касается не только окраски, но и многих других признаков, включая глухоту и другие повреждения внутреннего уха, крипторхизм (неопущение семенника в мошонку) у самцов, гетерохромию радужной оболочки глаз. При скрещивании гетерозигот в потомстве наблюдалась достоверно более низкая, чем ожидаемая, частота гомозигот. Это не может быть объяснено ни избирательной гибелью гамет, зигот или эмбрионов, ни трансгрессией фенотипов гомо- и гетерозигот. Вся совокупность обнаруженных фактов вызывала немало вопросов и была описана в терминах активации и инактивации гена *S* [18].

За прошедшие десятилетия молекулярная генетика окраски млекопитающих накопила большой объем данных, которые имеют непосредственное отношение к рассматриваемому случаю. Среди многих генов, оказывающих влияние на формирование окраски млекопитающих, можно указать на два хорошо изученных, изменения в которых могли бы вызвать появление фенотипов, характерных для генотипов *Ss* и *SS*. Это гены *KIT* (рецептора тирозинкиназы) и *MITF* (транскрипционного фактора, ассоциированного с меланогенезом). Беляев с коллегами, имея в своем распоряжении лисиц с мутациями гена *KIT*, продемонстрировали, что эти мутации не аллельны гену *S*. Следовательно, ген *KIT* должен быть исключен из числа возможных кандидатов. В таком случае с достаточно высокой вероятностью именно доминантный аллель гена *MITF* определяет фенотип «звездочка». Совершенно очевидно, что необходимо экспериментальное подтверждение такого предположения.

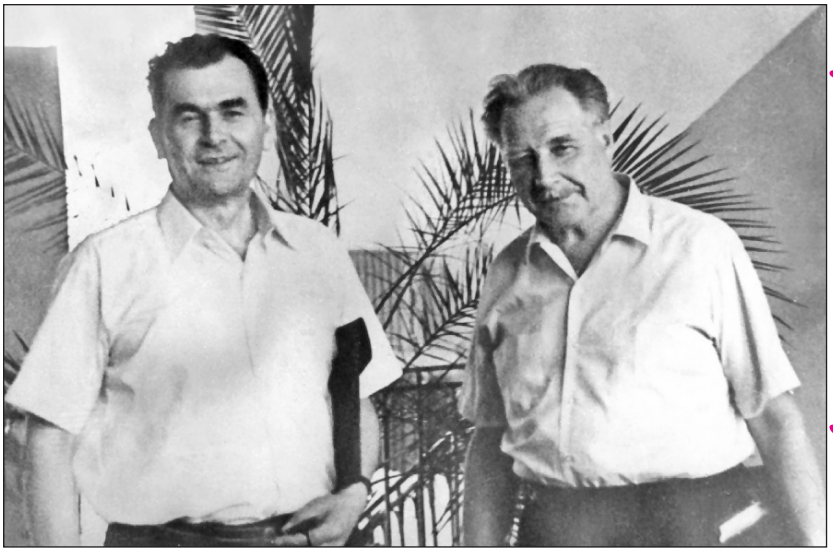
Исходя из частот возникновения фенотипа «звездочка» в доместицируемой популяции и из особенностей наследования, Беляев с сотрудниками пришли к выводу, что обнаруженные факты слабо соответствуют стандартным представлениям о мутационном процессе и что доместикационные изменения играют существенную, но еще не познанную роль. В этой связи особый интерес приобретает недавнее изучение полиморфизма промотора гена *MITF* у собак, имеющих пегости [19]. Несколько различных полиморфизмов в промоторной зоне *MITF*, способных влиять на активность этого гена, включают возможную инсерцию мобильного элемента SINE и разные варианты повторов — как отдельных нуклеотидов, так и их блоков. Кроме того, в одном из экзонов *MITF* обнаружена делеция длиной в 12 нуклеотидов. Полученные данные позволяют рассматривать изменчивость блочной организации нуклеотидных повторов как одну из существенных точек приложения селекции в ходе доместикации и породообразования у собак, благодаря которой активность данного промотора претерпевает изменения. У собак, имеющих специфические пегости, активность промотора *MITF* снижена. Некоторые комбинации упомянутых элементов, по-видимому, оказывают кооперативный эффект на активность промотора.

Таким образом, в процессе доместикации происходит «сборка» новых аллелей, а точнее, гаплотипов. Именно поэтому описание таких событий в рамках классического мутационного подхода неадекватно. Не исключено, что нечто подобное происходит и с образованием «звездочек» у лисиц, и только эксперимент способен проверить такую возможность.

Теперь самое время снова вернуться к гену *OXTR*. Оказывается, у собак, кошек, мышей, человека и других изученных млекопитающих гены *OXTR* и *MITF* находятся на одной хромосоме. У собак это 20-я хромосома, а расстояние между этими генами сравнительно небольшое. Очевидно, что такая синтения сформировалась в далеком эволюционном прошлом, поэтому предположение о локализации этих генов на одной хромосоме у лисиц выглядит вполне правдоподобно.

Комплекс OXT-OXTR обнаружен на разных стадиях развития и во многих тканях, включая кожу, поэтому предположение о его вероятном влиянии на белок MITF в формировании окраски не кажется

беспочвенным. Если каждый из двух генов (*OXTR* и *MITF*) обладает только двумя аллелями, то в результате рекомбинационных событий ожидается появление четырех гаплотипов, имеющих неравную вероятность проявления признака «звездочка». Так как он проявляется гораздо чаще и интенсивнее у доместицированных лисиц, по-видимому, гаплотипы, которые содержат аллели *OXTR*, типичные для доместицированных животных, и мутантный аллель *MITF*, резко повышают вероятность фенотипического проявления этого признака. В случае рекомбинационного исчезновения гаплотипов, наиболее способствующих образованию «звездочки», следует ожидать и исчезновения мутантного фенотипа. Такая простейшая генетическая модель способна описать ранее необъяснимые странности наследования этого признака в доместицируемой популяции, отмеченные еще в работах Беляева и сотрудников [18]. Будущие исследования покажут, так ли действительно обстоят дела, и, возможно, подтвердят сборку «доместикационных» гаплотипов и их последующее эволюционное закрепление и гомозиготизацию.



С Борисом Львовичем Астауровым. 1969 г.

Формирование неокрашенных пятен на шерсти млекопитающих происходит из-за того, что вследствие сниженной активности определенных генов, в частности *MITF*, запаздывает либо прекращается миграция меланоцитов (клеток, производящих пигмент меланин). Хорошо известно, что активность многих генов находится под влиянием остального генома и функциональной среды. В этой связи интересно отметить пониженную концентрацию прогестерона и кортизола в крови у гетерозигот *Ss*, носителей фенотипа «звездочка», а также пониженное содержание прогестерона в яичниках беременных самок. Наиболее выраженные изменения такого типа обнаружены у доместицируемых животных [20].

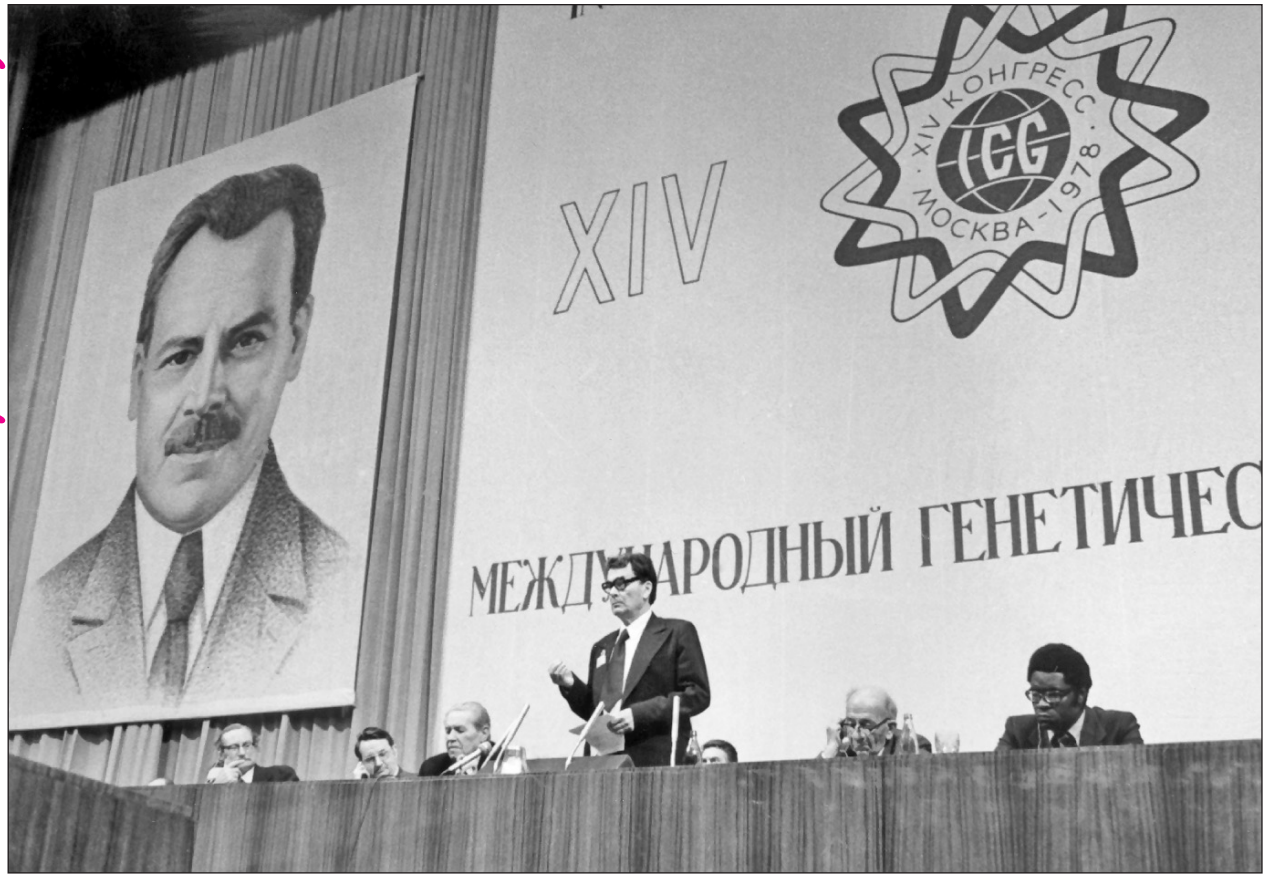
Интересную попытку объяснить комплекс доместикационных изменений в рамках единой гипотезы недавно предпринял А.Уилкинс [21]. Согласно его гипотезе, так называемый доместикационный синдром связан с нарушениями миграции клеток из нервного валика, ранней стадии развития эмбриона млекопитающих, что обусловлено генетическими преобразованиями, возникающими при отборе животных на спокойное поведение по отношению к человеку. Многие доместикационные феномены получают достаточно простое и правдоподобное объяснение в рамках предлагаемого подхода. Однако неясно, охватывает ли эта гипотеза все принципиально важные процессы в ходе доместикационных преобразований.

Ускоряющееся накопление молекулярно-генетических, онтогенетических, нейроэндокринологических и этологических данных в ходе исследования доместикационного процесса у лисиц, собак и других видов приближает науку к более глубокому пониманию этого интереснейшего вмешательства человека в эволюцию, т.е. к познанию того, к чему так целенаправленно стремился Дмитрий Константинович Беляев.

Вместо эпилога

В этой короткой статье мы коснулись только одного аспекта научной деятельности Д.К.Беляева. Однако при всей значимости проблемы доместикации в его творчестве следует понимать, что его вклад в развитие отечественной генетики был гораздо больше. В 1959 г. Институт цитологии и генетики размещался в небольшом количестве арендуемых помещений и насчитывал всего несколько десятков сотрудников. Несмотря на их энтузиазм, возможности для экспериментальной работы были весьма ограниченны, а вероятность закрытия и расформирования, по существу, единственного официального генетического учреждения Академии наук СССР не исчезала с повестки дня еще долгих пять лет. За четверть века, в течение которых Беляев возглавлял институт, он превратился в мощную научную организацию, способную работать в широком диапазоне генетических исследований.

Возрождение генетики в стране происходило по разным направлениям, и Беляев внес свою лепту во многие из них. Важнейшей проблемой была подготовка нового поколения генетиков. Создание



На пленарном заседании XIV Международного генетического конгресса. 1978 г.

в 1961 г. кафедры общей биологии, а затем на ее основе кафедры генетики и цитологии в недавно организованном Новосибирском государственном университете было важным событием. Без этого прогресс ИЦиГ, как и развитие генетики во многих других вузах, особенно востока страны, был бы затруднен. Беляев возглавил кафедру и приложил много усилий для ее успешной работы.

В 1965 г. был организован первый и тогда единственный в стране тематический научный журнал «Генетика», и заместителем главного редактора назначили Беляева. В том же году по инициативе Астаурова было создано Всесоюзное общество генетиков и селекционеров (ВОГиС), которому, к огромной радости многих, присвоили имя великого генетика Н.И.Вавилова. Беляев был избран вице-президентом ВОГиС. В 1968 г. был создан Научный совет по проблемам генетики и селекции при АН СССР, бессменным председателем которого Беляев оставался до самой смерти. Огромное количество задач, стоящих перед генетикой, требовало постоянного внимания. Научная и научно-организационная работа Беляева была высоко оценена, когда в 1972 г. его избрали академиком. Прогресс в развитии генетики в стране был очевиден.

В 1973 г. на XIII Международном генетическом конгрессе было принято предложение советской делегации провести следующий конгресс в Москве. Для отечественных генетиков это замечательное событие, по сути, завершало трагический период в истории советской генетики, начавшийся с ареста Вавилова. Генеральным секретарем XIV Международного генетического конгресса был утвержден Беляев — на него возложили ответственность за подготовку и проведение самого масштабного научного мероприятия по генетике. Невозможно перечислить все трудности, которые пришлось преодолеть. Главное, что открытие конгресса состоялось точно по расписанию в Кремлевском дворце съездов в присутствии огромного числа делегатов, из которых более тысячи представляли генетические общества из десятков стран мира. Гостям конгресса все казалось великолепным и безоблачным: Кремль, МГУ, участие выдающихся генетиков, прекрасная подготовка всех научных и официальных сессий, широкое освещение в прессе и т.д. Многим, особенно молодым, генетикам тот конгресс запомнился как яркое и крайне интересное научное событие. Для Беляева и узкого круга посвященных все было намного сложнее, но тем радостнее воспринимался успех мероприятия. Научный доклад ДК на пленарной сессии, посвященный генетическим аспектам доместикации животных, стал одним из самых запо-

минающихся событий конгресса. Представитель Американской генетической ассоциации, замечательный ученый и человек, профессор Клемент Маркерт объявил, что ассоциация приняла решение считать доклад Д.К.Беляева XV мемориальной лекцией имени Вильгельмины Кей. Впервые такую высокую честь оказали не американскому ученому. Президентом следующего конгресса, который состоялся в Дели, избрали Беляева.

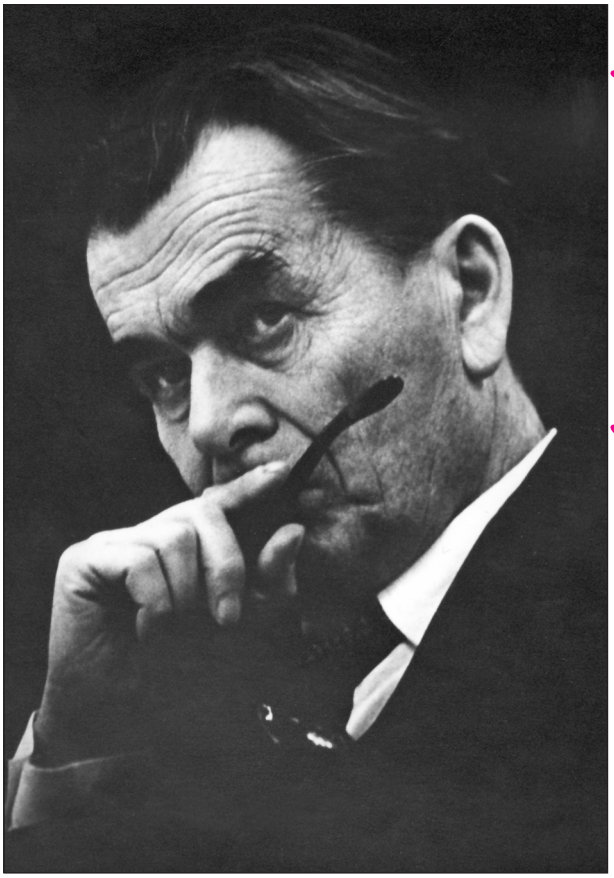
В последние годы жизни Дмитрий Константинович был чрезвычайно деятелен в самых разных областях. Понятно, что кроме собственных весьма разнообразных генетических интересов он, как всегда, много внимания уделял ИЦиГ, что придавало дополнительный импульс развитию новых направлений, например молекулярной генетике и тому, что в настоящее время называют биоинформатикой. Много усилий было направлено на содействие развитию биологических институтов в рамках Сибирского отделения АН СССР и работам по созданию новых высокопродуктивных сортов растений.

После публикации журналом «Природа» статей Эрнста Майра*, патриарха эволюционной биологии, завязалась довольно острая дискуссия о роли генетической компоненты в поведении человека. Кроме сугубо биологического, в этой дискуссии неизбежно всплыл идеологический аспект. Кому, как не Беляеву, было абсолютно ясно, что между рифами идеологии существовал очень узкий фарватер, единственный способ пройти который состоял в том, чтобы честно и смело говорить правду. К счастью, времена уже изменились — и многие поддержали позицию ДК, так что дискуссия завершилась моральной победой тех, кто не набрасывал покровы идеологии на научный спор.

Беляев прилагал огромные усилия, чтобы способствовать решению острых вопросов экологии, поскольку был серьезно обеспокоен негативными тенденциями. Благодаря его авторитету многим положительным начинаниям в этой сфере суждено было развиться. Безусловно, это включало и создание сибирской «Аскании-Нова» в горах Алтая. Не все из того, что было задумано и сделано при жизни Дмитрия Константиновича, пережило 1990-е гг., но, как известно, идея — самая несгораемая субстанция.

Еще с конца 1960-х гг. Беляев предпринимал небезуспешные попытки обеспечить учителей и школьников современными учебными пособиями по биологии. Преодолев немало преград и трудностей, он радовался публикации под его редакцией пробного учебника по общей биологии для средней школы в октябре 1985 г., всего за несколько недель до своей смерти. Он, конечно, не мог знать, что этот учебник будет нести в школы базовые знания по биологии и 30 лет спустя.

* *Майр Э.* Человек как биологический вид // Природа. 1973. №12. С.36–44; 1974. №2. С.36–43.



Размышление. Дмитрий Константинович в 1976 г.

Дмитрий Константинович Беляев, как и многие из его сверстников, прошел через трудные испытания, которые закалили его характер. Он был спокойным, рассудительным и очень волевым. Люди, ничего не знавшие о ДК и случайно вступившие с ним в контакт, быстро осознавали, что перед ними необычный человек. Его способность понимать существо биологических проблем и настойчиво двигаться к цели поражала. В то же время он был открыт для общения, любил хорошую компанию и терпеть не мог чванства. Неудивительно, что тот редкий набор интеллектуальных и эмоциональных характеристик, которыми обладал ДК, сделали его одним из наиболее влиятельных лидеров отечественной генетики 1960–1980-х гг. Его идеи и научные достижения не потускнели от времени, но продолжают оставаться в центре внимания и привлекают к себе последующие поколения генетиков. Достаточно повторить, что начатый Беляевым эксперимент по одомашниванию лисиц длится вот уже более 60 лет. В статье «Дестабилизирующий отбор», написанной ДК для «Природы» в 1979 г.**, отражено состояние этого эксперимен-

** *Беляев Д.К.* Дестабилизирующий отбор как фактор изменчивости при доместикации животных // Природа. 1979. №2. С.36–45.

та и общее понимание проблемы, сложившееся к тому времени. Несколько измененный и усиленный вариант статьи был опубликован в The Journal of Heredity [2], и с тех пор подавляющее большинство публикаций, связанных с доместикацией животных, не обходится без ссылки на эту ставшую классической работу. Развитие представлений о сути доместикации у Беляева и его сподвижников упрощенно можно сравнить с процессом химического проявления фотографии, когда сначала появляются общие контуры, а затем возникают многочисленные важные детали. Дальнейшие исследования доместикации подтверждают правильность представлений, впервые сформулированных Д.К.Беляевым. Способность ясно обозначить проблему, организация уникального эксперимента и умелое использование ресурсов генетики, физиологии и этологии — три решающих фактора, придавших мощный импульс исследованиям доместикации. ■

Литература

1. *Аргутинская С.В.* Дима // Академик Дмитрий Константинович Беляев: книга воспоминаний / Отв. ред. Шумный В.К., Бородин П.М., Маркель А.Л., Аргутинская С.В. Новосибирск, 2002.
2. *Belyaev D.K.* Destabilizing selection as a factor in domestication // J. Hered. 1979. V.70. P.301–308.
3. *Trut L.N., Oskina I.N., Kharlamova A.V.* Experimental studies of early canid domestication // The genetics of the dog / Ed. by Ostrander E.A., Ruvinsky A. 2nd ed. UK, 2012. P.12–37.
4. *Ruvinsky A.* Genetics and randomness. Florida, 2009.
5. *Naumenko E.V., Belyaev D.K.* Neuroendocrine mechanisms in animal domestication // Problems in general genetics / Ed. by Belyaev D.K. Proceedings XIV Int. Cong. Genet. Moscow, 1980. Book 2. V.2. P.12–24.
6. *Popova N.K.* Brain serotonin in genetically defined defensive behavior // Complex brain functions: conceptual advances in Russian neuroscience / Ed. by Millar R., Ivanitsky A.M., Balaban P.M. Harwood Press, 1999. P.317–329.
7. *Kukekova A.V., Trut L.N., Oskina I.N. et al.* A meiotic linkage map of the silver fox, aligned and compared to the canine genome // Genome Res. 2007. V.17. P.387–399. Doi:10.1101/gr.5893307.
8. *Kukekova A.V., Trut L.N., Chase K. et al.* Mapping loci for fox domestication: deconstruction/reconstruction of a behavioral phenotype // Behav. Genet. 2011. V.41. P.593–606. Doi:10.1007/s10519-010-9418-1.
9. *Nelson R.M., Temnykh S.V., Johnson J.L. et al.* Genetics of interactive behavior in silver foxes (*Vulpes vulpes*) // Behav. Genet. 2017. V.47. P.88–101. Doi:10.1007/s10519-016-9815-1.
10. *Kukekova A.V., Johnson J.L., Teiling C. et al.* Sequence comparison of prefrontal cortical brain transcriptome from a tame and an aggressive silver fox (*Vulpes vulpes*) // BMC Genomics. 2011. V.12. P.482. Doi:10.1186/1471-2164-12-482.
11. *Kis A., Bence M., Lakatos G. et al.* Oxytocin receptor gene polymorphisms are associated with human directed social behavior in dogs (*Canis familiaris*) // PLoS One. 2014. V.9. e83993. Doi:10.1371/journal.pone.0083993.
12. *Bence M., Marx P., Szantai E. et al.* Lessons from the canine *Oxtr* gene: populations, variants and functional aspects // Genes Brain Behav. 2017. V.16. P.427–438. Doi:10.1111/gbb.12356.
13. *Гербек Ю.Э., Гулевич Р.Г., Шепелева Д.В., Гриневич В.В.* Окситоцин: коэволюция человека и доместицированных животных // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016. Т.20. С.220–227.
14. *Осадчук Л.В., Трут Л.Н.* Эндокринная функция гонад у самок серебристо-черных лисиц при селекции на доместикационное поведение // Ж. общ. биол. 1989. Т.50. С.189–198.
15. *Yang H.-P., Wang L., Han L., Wang S.C.* Nonsocial functions of hypothalamic oxytocin // Neuroscience. 2013. Article ID 179272. Doi:/10.1155/2013/179272.
16. *Vaidyanathan R., Hammock E.A.* Oxytocin receptor dynamics in the brain across development and species // Dev. Neurobiol. 2017. V.77. P.143–157. Doi:10.1002/dneu.22403.
17. *Puglia M.H., Lillard T.S., Morris J.P., Connely J.J.* Epigenetic modification of the oxytocin receptor gene influences the perception of anger and fear in the human brain // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2015. V.112. P.3308–3313. Doi:10.1073/pnas.1422096112.
18. *Belyaev D.K., Ruvinsky A.O., Trut L.N.* Inherited activation-inactivation of the star gene in foxes: its bearing on the problem of domestication // J. Hered. 1981. V.72. P.267–274.
19. *Baranowska Körberg I., Sundström E., Meadows J.R. et al.* A simple repeat polymorphism in the *MITF-M* promoter is a key regulator of white spotting in dogs // PLoS One. 2014. V.12. e104363. Doi:10.1371/journal.pone.0104363.
20. *Osadchuk L.V.* Endocrine effects of a coat-color mutation Star in farm-bred silver foxes *Vulpes vulpes* // Endocrine Abstracts. 2008. V.16. P169.
21. *Wilkins A.S., Wrangham R.W., Fitch W.T.* The «domestication syndrome» in mammals: a unified explanation based on neural crest cell behavior and genetics // Genetics. 2014. V.197. P.795–808. Doi:10.1534/genetics.114.165423.

Дестабилизирующий отбор как фактор изменчивости при доместикации животных*

Академик Д.К.Беляев

Одомашнивание животных, или доместикация, история которой не превышает 15 тыс. лет, представляет собой величайший биологический эксперимент. Его главный результат состоит в огромном повышении темпа и размаха изменчивости организмов, вовлеченных в сферу доместикации. Домашние животные отличаются от своих диких предков и друг от друга значительно больше, чем отдельные виды и даже роды. Аналогов такой изменчивости в столь короткие промежутки в эволюционной истории не известно. Эти факты вызывают у некоторых исследователей сомнение в приложимости закономерностей дарвиновской эволюции к процессу доместикации.

Хотя виды одомашненных животных относятся к далеко отстоящим систематическим группам (не только родам и семействам, но даже отрядам), их изменчивость в отношении многих признаков носит характер гомологичной изменчивости. Все домашние животные утратили строгую сезонность размножения и линьки и практически размножаются в любое время года. Это явление трудно-объяснимо, так как наследственное разнообразие свойств, характеризующих сезонную жизнедеятельность у диких животных, практически равно нулю. В условиях доместикации сильно повысилась плодовитость, возникло большое количество разнообразных, в том числе доминантно-наследуемых морфологических и физиологических признаков, сходных в разных систематических группах.

Анализируя различные аспекты этой проблемы, я уже более 20 лет тому назад пришел к гипотезе, что утрата строгой сезонности размножения и моноэстричности (способности давать потомство только раз в год), свойственных диким животным, явилась следствием селекции этих животных на доместикационный тип поведения на самых первых этапах одомашнивания.

Что же мы понимаем под доместикационным поведением? Главным критерием здесь можно считать способность животных непосредственно контактировать с человеком, не бояться человека, подчиняться ему и размножаться в условиях, создаваемых человеком, что составляет необходимое условие любой формы хозяйственного использования животных. Совершенно очевидно, что селекция на поведение животных бессознательно проводилась человеком уже на самых первых этапах одомашнивания всех животных.

В попытке проверить эту гипотезу мною более 20 лет назад был организован эксперимент по доместикации серебристо-черных лисиц, разводимых на специальных фермах ради получения шкурок. Этот эксперимент продолжается до сих пор совместно с Л.Н.Трут**. Хотя лисиц разводят уже более 80 лет, они сохранили все черты сезонной биологии, свойственные дикому виду: моноэстричность, строгую сезонность размножения и смены мехового покрова.

Специальное исследование [1], проведенное нами совместно с Л.Н.Трут на первых этапах работы, показало, что в популяциях лисиц, разводимых на фермах и никогда не подвергавшихся специальной селекции по поведению, поддерживается определенный полиморфизм в отношении этого признака; около 30% лисиц имели резко выраженное агрессивное поведение по отношению к человеку, 20% — трусливое, 40% — агрессивно-трусливое и лишь около 10% обнаруживало спокойно-исследовательскую реакцию, не проявляя к человеку ни злобности, ни трусости. Однако даже этих животных, так же как и лисиц других поведенческих типов, без специальных

* Первая публикация: Природа. 1979. №2. С.36–45.

© Беляев Д.К., наследники, 2017

** Людмила Николаевна Трут, доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории эволюционной генетики ИЦиГ СО РАН, основной исполнитель эксперимента по доместикации лисиц с 1958 г. по настоящее время. Подробнее о продолжении этого эксперимента в наши дни см.: *Трут Л.Н.* Обретет ли человек нового друга? // Природа. 2007. №6. С.11–17. — *Примеч. ред.*

Типичная агрессивная серебристо-черная лисица.
Здесь и далее фото В.А.Прасолова

предосторожностей от укусов нельзя взять в руки, так что и они являются, по существу, дикими животными. Каждая из этих реакций проявляется по-разному.

В этом исследовании были вскрыты факты, косвенно свидетельствовавшие в пользу сформулированной гипотезы:

— было показано, что характер оборонительного по отношению к человеку поведения, сформировавшегося в течение первых 2–2.5 мес жизни, сохраняется у подавляющего большинства животных как устойчивый признак особи;

— выяснилось, что разнообразие оборонительного поведения имеет наследственную основу, благодаря этому возможна эффективная селекция по тому или иному характеру поведения;

— была обнаружена фенотипическая и генетическая корреляция между характером оборонительного поведения самок и временем их воспроизводительной активности в пределах сезона размножения, а именно: у самок со спокойным поведением активации воспроизводительной функции осуществлялись в сезоне размножения (конец января — конец марта), т.е. раньше, чем у самок других типов поведения. Предполагалось, что благодаря этой корреляции селекция на усиление спокойного поведения может сдвинуть время размножения селектируемых животных за границу обычного сезона и, возможно, сформировать способность к двукратному размножению, т.е. диэстричность.

Главная задача эксперимента состояла в том, чтобы путем селекции лисиц на усиление спокойного по отношению к человеку поведения, получить животных, в какой-то степени приближающихся по поведению к домашней собаке. Естественно поэтому, что главным критерием отбора животных в селекционном опыте служила реакция лисиц на попытку человека контактировать с ними.

Реакция лисиц на контакт с человеком оценивалась в разном возрасте. Первое тестирование проводили не позднее чем в 2–2.5-месячном возрасте в условиях группового содержания молодняка в клетках. При этом оценивалась реакция на попытку экспериментатора прикоснуться к животному или предложить ему приманку (кусочек хлеба, печенья и т.д.). Для дальнейшего наблюдения и изучения отбирались животные, которые проявляли относительно спокойное и заинтересованное отношение к этой процедуре, и безусловно исключались агрессивные и трусливые животные. В более старшем возрасте (4–5 мес) изучение и тестирование поведения велось в условиях свободного передвижения животных в специальных загонах; здесь также оценивалась реакция лисиц на человека, их склонность подойти к находившемуся в загоне экспериментатору.

Для размножения в пределах селектируемой экспериментальной популяции отбирали лисиц, устойчиво проявлявших спокойное поведение по отношению к человеку, а затем — по мере усиления эффекта селекции — и активное желание контактировать с ним. Отбор был довольно жестким: в экспериментальную популяцию вовлекалось не более 15–20% тестированных животных. В эксперименте использовалась гомогенная в отношении поведения система отбора (скрещиваний). Инбридинг (близкородственное скрещивание), за исключением специально предусмотренных случаев, не допускался. Всего за время эксперимента протестировано с целью оценки поведения около 10 тыс. животных.

В настоящее время на нашей экспериментальной ферме живет около 500 взрослых самок и 150 самцов лисиц и более 2 тыс. молодняка от них, полученных в результате такой селекции. По поведению экспериментальные животные резко отличаются от лисиц, разводимых на обычных фермах, и исходной популяции, в которой началась селекция. Лисицы селектируемой популяции не только не боятся человека, но проявляют активно положительную реакцию по отношению к нему, реагируя на свои клички. Таких лисиц вполне можно считать ручными, хотя надо помнить, что такое поведение сформировалось у них не в результате какой-либо тренировки или дрессировки, а в процессе селекции, т.е. как результат изменения их генотипа. У наиболее ручных лисиц возникли новые этологические признаки, не свойственные лисицам, разводимым на обычных фермах: подобно собаке, они ищут контакта со знакомым им человеком и стремятся быть около него, лижут ему руки и лицо. У отдельных животных возникла сторожевая форма поведения, даже го-

лос в моменты эмоционального возбуждения у некоторых, наиболее ручных лисиц, сходен с собачьим.

Весь комплекс изменений поведения возник у лисиц не сразу, но в рамках краткого сообщения невозможно охарактеризовать динамику изменения поведения лисиц под влиянием отбора. Существенно то, что принятая нами система отбора привела не просто к увеличению числа особей спокойного поведения, но к формированию животных совершенно нового типа, приближающегося к домашним собакам. Этот результат достигнут исключительно на генетической основе.

В генеалогических группах лисиц, наиболее продвинутых в отношении поведенческой доместикации, рождаются потомки (не проходящие тестирование), которые в условиях содержания в клетках проявляют все признаки поведения, характерного для доместицированных животных.

Есть нечто трогательное в эмоциях этих лисиц, которые при виде даже незнакомого им человека активно стараются привлечь его внимание своими жалобно скулящими звуками, взмахами хвоста, специфическими движениями — словом, всеми своими силами как бы зовущего человека к общению с ними.

Селекция по поведению не ограничилась изменением самого поведения. Как и предполагалось, изменение поведения сказалось на изменении воспроизводительной функции лисиц. Так, у наиболее ручных самок время спаривания сместилось за границы сезона размножения. Если в обычных популяциях сезон размножения начинается, как правило, не ранее 20 января и лишь у отдельных животных 10–12 января (период уже удлиняющегося в средних широтах светового дня), то у ручных самок наиболее ранние спаривания были отмечены уже 20 декабря, т.е. в период самого короткого дня. Некоторые из этих самок давали приплод и затем вновь спаривались в нормальный сезон размножения — в марте. Хотя число таких самок в нашей экспериментальной популяции пока еще невелико, однако сам факт реорганизации системы размножения и получение потомства в результате внесезонного размножения — уникален. Он свидетельствует, что перестройка функции размножения у строго моноэстричных животных в сторону диэстричности и утрата прежнего, свойственного им строго сезонного размножения, осуществляется как коррелированный ответ на селекцию по поведению. Таким образом, полученные данные говорят, что исходная гипотеза о механизмах перестройки характера размножения животных в процессе доместикации верна.

В пользу ее говорят и другие факты. Так, за последние два–три года примерно у 40% ручных самок нашей экспериментальной популяции четкие признаки половой активности проявляются задолго до начала сезона размножения — в октябре–ноябре. Однако к этому времени самцы пока еще не готовы к спариванию. Вместе с тем для многих самок с внесезонной активацией воспроизведения характерны значительные аномалии в размножении в течение естественного сезона спаривания. От 30 до 40% таких самок в нормальный сезон размножения по разным причинам не дает приплода либо проявляют каннибализм, т.е. поедают его.

Ручные серебристо-черные лисицы экспериментальной популяции с Людмилой Николаевной Трут.

Таким образом, мы наблюдаем несомненную перестройку системы размножения животных — возникновение сложнейшего доместикационного изменения — диэстричности *in statu nascendi**. Эта перестройка означает не что иное, как дестабилизацию нормальной функции размножения, эволюционно сформировавшейся как важнейшее свойство вида в ходе предшествующей эволюции под давлением стабилизирующего отбора.

Анализ показал, что внесезонные явления воспроизведения возникали в разных, не родственных между собой генеалогических группах животных и что эти изменения носят наследственный характер. Существенно, что явления внесезонной активации воспроизведения возникали у самок с наивысшим проявлением доместикационного поведения. Корреляция между способностью животных к внесезонной активации воспроизведения и их доместикационным поведением проявляется очень четко. Селекция на этот тип поведения сказалась и на плодовитости лисиц. У ручных, нормально размножающихся самок она значительно выше, чем у обычных лисиц [1].

* В переводе с латыни: in statu nascendi — в состоянии зарождения, в самом начале, в момент образования. — *Примеч. ред.*

Помимо изменения поведения и воспроизводительной функции, селекция по поведению вызвала и некоторые другие физиологические и морфологические изменения животных. Прежде всего, это сдвиги в сроках линьки: у ручных лисиц она более растянута во времени, чем у неселектируемых. Но особенно заметны изменения времени линьки у самок с внесезонной, т.е. осенней (октябрьско-ноябрьской) активацией воспроизведения. У них линька в отчетливой форме начинается уже в январе–феврале, тогда как в норме — не ранее апреля. Здесь мы вновь наблюдаем дестабилизацию важнейшей приспособительной функции животных.

У ручных лисиц появились совершенно новые, не свойственные им морфологические признаки, но характерные для некоторых пород собак: положение хвоста, бурые пятна в области ушей, на шее и в области лопаток и, наконец, обычное для собачьих щенков положение ушей. Интересным доместикационным изменением представляется многократно возникавшая в экспериментальной популяции специфическая пегость, названная нами «звездочкой». Она наследуется как неполнодоминантный признак с разной степенью фенотипического выражения и с разной частотой проявления гена. Однако гетерозиготные формы хорошо отличаются от гомозиготных. Пегость подобного рода характерна для всех домашних животных, относящихся к разным отрядам.

Известно, что явления гомологичной изменчивости Н.И.Вавилов объяснял мутированием гомологичных генов в пределах систематически близких филогенетических групп. Правомерность подобного объяснения не приходится отрицать, поскольку она подтверждена многочисленными фактами, в том числе полученными в исследованиях закономерностей экспериментально индуцированного мутагенеза у растений [2].

Однако частота возникновения описанных выше аберрантных форм селектируемой по поведению популяции равна 10^{-2}—10^{-3}, т.е. она не менее чем на два-три порядка выше частоты спонтанного мутирования, что заставляет сомневаться в мутационной природе этих аберраций. Против мутационной интерпретации говорит тот факт, что у некоторых животных одновременно проявляются разные аберрации: собачий тип ушей и бурые пятна, собачий тип хвоста и такие же уши, что не укладывается в статистику мутационной природы этих изменений. Тем более невозможно объяснить с позиций теории мутирования изменения в системе воспроизведения и смены волосяного покрова животных. Данные нашей работы показывают, что гомологичная изменчивость в отношении ряда признаков и функций, в том числе таких сложных, как воспроизведение, возникла в процессе отбора животных по характеру оборонительного поведения, т.е. в той эволюционной ситуации, которая, несомненно, была характерна для всех без исключения видов животных, вовлекаемых человеком в сферу доместикации. Приходится думать поэтому, что в самой природе такого отбора содержится нечто такое, что порождает темп изменчивости, в частности гомологичной изменчивости в том смысле, как ее понимал Н.И.Вавилов.

Основу понимания причин, темпа и характера наблюдаемой нами изменчивости надо искать, очевидно, в специфике той функциональной системы, которая непосредственно стала объектом отбора и состояние которой служило главным критерием селекции животных на самых первых этапах их доместикации.

Естественно думать, что в силу весьма сложной морфо-функциональной связи между нервной и эндокринной системой отбор животных по поведению может автоматически изменить их гормональный статус либо затронуть рецепторную систему тех или иных клеток, а следовательно и специфику их биохимической, прежде всего ферментативной, активности со всеми вытекающими отсюда последствиями для процессов онтогенеза. Надо иметь в виду, что нейрогормональная система у всех высших позвоночных, у млекопитающих в особенности, играет ключевую роль в регуляции онтогенеза, и это связано с тем, что гормоны служат важнейшими регуляторами функции генетического аппарата — индукторами биохимической активности генов и синтеза ферментов. Эти соображения послужили основой для целой серии проведенных в нашем Институте исследований гормональной системы у лисиц, селектируемых на доместикационный эффект поведения и не селектируемых по этому признаку.

Здесь невозможно осветить все результаты этих работ. Отметим только основные факты. Было установлено, что у селектируемых по поведению животных — как самок, так и самцов — уровень гормонов надпочечников (11-оксикортикостероидов) в периферической крови достоверно отличается от неселектируемых — контрольных. При этом выяснилось, что селекция на доместикационный эффект поведения серьезно затронула не только собственно секреторную активность надпочечников, что было продемонстрировано в исследованиях *in vivo* и *in vitro*, но и его морфологическую структуру [3].

В целом эти факты свидетельствуют о том, что процесс поведенческой селекции привел к серьезным изменениям всей гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы у доместицированных лисиц. В результате селекции по поведению изменилось и содержание секретируемых яичниками половых стероидных гормонов: эстрадиола и прогестерона [4]. Существенно, что уровень обоих гормонов у ручных самок в первые дни беременности выше, чем у контрольных. Поскольку эти гормоны играют важнейшую роль в процессах имплантации и в эмбриональной смертности,

то этим хорошо объясняется повышенная плодовитость ручных самок по сравнению с обычными.

Может быть, наиболее значительным в этой серии исследований оказался тот факт, что у ручных лисиц обнаружены статистически достоверные изменения в некоторых нейрохимических характеристиках мозга, в частности в таких его отделах, как гипоталамус, средний мозг и гиппокамп [5]. Содержание медиатора мозга — серотонина и его метаболита 5-оксииндолуксусной кислоты у ручных лисиц оказалось выше, чем у обычных. Этот факт хорошо согласуется с характером поведения доместицированных лисиц, так как известно ингибирующее влияние серотонина на некоторые виды агрессивности; с другой стороны, он указывает на причины изменения центрально-нервной регуляции гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой и гипоталамо-гипофизарно-половой систем, поскольку именно серотонин играет важную роль в этом процессе. Таким образом, исследования показали, что селекция на доместикационный тип поведения серьезно перестраивает как центральные, так и периферические звенья нейроэндокринной регуляции онтогенеза.

Эта перестройка у лисиц идет, конечно, в том же направлении, что и у давно одомашненных видов животных, поскольку и у них под давлением такого же отбора на первых этапах доместикации оказалась та же самая регуляционная система онтогенеза. Эти факты хорошо объясняют, с моей

Новые морфологически признаки у лисиц экспериментальной популяции: *а* — загнутый хвост, *б* — опущенные уши, *в* — специфическая пегость «звездочка», *г* — загнутый хвост и «звездочка».

точки зрения, возникновение у доместицированных лисиц гомологичных изменении в системе воспроизведения и линьки.

С позиций изменения гормонального баланса в процессе доместикации представляется возможным объяснить и появление описанных морфологических изменений, возникающих с высокой частотой у ручных лисиц. Поскольку гормоны участвуют в регуляции функциональной активности гена, то можно представить, как измененный гормональный баланс привел к активации ранее функционально неактивных, так называемых молчащих, или спящих, гомологичных генов, что вызвало целый комплекс гомологичных же морфологических изменений у доместицируемых лисиц.

Факт функциональной экспрессии или репрессии генов в онтогенезе под влиянием различных метаболитов, в том числе и гормонов, по-видимому, можно считать вполне установленным. Эволюционное значение этого явления значительно менее ясно. Хотя идея о возможной роли активации и инактивации генов в эволюции высказывалась в общей форме разными авторами (например, еще Г.Меллером, а затем Э.Цукеркандлем и Л.Полингом [6, 7]), однако хороших фактических доказательств этого пока нет, и вся проблема ждет экспериментальной разработки.

В этой связи представляет интерес характер наследования уже упоминавшейся пегости «звездочка». Анализ расщепления при скрещивании гетерозигот по этому гену ясно демонстрирует недостаток гомозиготного класса при точном соблюдении расщепления 3:1. Специальное исследование показало, что этот факт нельзя объяснить смертностью эмбрионов гомозиготного класса. Полученные данные дают основание допустить, что у части гомозигот один из двух гомологичных мутантных генов, детерминирующих этот признак, функционально неактивен, и это ведет к тому, что генетически гомозиготные формы проявляют себя как гетерозиготные.

Конечно, мы не можем сказать, наблюдается ли в подобных случаях функциональная репрессия транскрипции или же все события развертываются на последующих этапах метаболизма генных продуктов, но в данном случае это не меняет существа дела. Принципиально, что под влиянием вызванного отбором изменения гормонального баланса развиваются, выходят в фенотип и испытываются отбором многие новые признаки, до того неведомые виду и выводящие его за границы сформировавшегося полиморфизма.

Таким образом, мы приходим к выводу, что важной причиной гомологичной изменчивости домашних животных является отбор по поведению, вызвавший у всех видов млекопитающих, включенных в сферу доместикации, однонаправленное смещение гормонального баланса и, как результат этого, перестройку корреляционных систем организмов и активацию функционально неактивных — молчащих, или спящих, генов. Этим можно объяснить громадный размах и темп наследственной изменчивости при доместикации.

Конечно, нельзя отрицать вклад мутационного процесса в явление гомологичной изменчивости. Элементарные генетические механизмы, в том числе дрейф генов (изменение частоты генов) со всеми его последствиями, также играют большую роль в возрастании изменчивости при доместикации. Однако ключевым механизмом доместикации и возникновения гомологичной изменчивости у животных все же приходится считать отбор и, очевидно, явления эпигеномного наследования.

Какова же природа и сущность того отбора, который служит основным механизмом доместикации? Какова форма этого отбора или, лучше сказать, его эффект? Современная генетико-эволюционная литература знает много форм отбора. Вслед за Ч.Дарвином, который по формальному признаку выделил естественный и искусственный отбор, целый ряд авторов описали другие его формы (консервирующий, дизруптивный и т.д.). И.И.Шмальгаузен [8] выделил две основные формы отбора: движущий отбор, роль которого как главного фактора эволюции была обоснована Дарвином, и стабилизирующий, теория которого создана была в основном самим Шмальгаузеном.

Движущий отбор, опирающийся на мутации в основном минорного действия, ведет к чрезвычайно медленному сдвигу средней приспособленности популяций и видов к условиям новых экологических ниш в пределах данной среды. Как писал сам Дарвин, он не порождает изменчивости и опирается на ту изменчивость, которую дает ему природа. В сущности, на этом принципе стохастических процессов движения генов в генном пуле популяций построена вся современная популяционная генетика и генетическая теория эволюции и селекции. Стабилизирующий отбор действует всегда в условиях устойчиво освоенной видом (и в этом смысле относительно стабильной) среды. Он приводит к стабилизации онтогенеза ради формирований оптимального в данной среде фенотипа. Стабилизирующий отбор осуществляет свой эффект путем элиминации мутаций, нарушающих онтогенез и нормальный фенотип. Он удерживает изменчивость в пределах оптимальной, эволюционно установившейся нормы, но не порождает новой изменчивости.

Здесь уместно заметить, что понятие о формах отбора, хотя и общепризнано в биологической литературе, фактически является малоудачным, поскольку отбор действует всегда лишь в одной форме, именно в форме элиминации менее приспособленных.

Для характеристики отбора наиболее существен формообразовательный (морфо-физиологический) эффект его действия, т.е. последствия для

эволюционной судьбы популяций и видов. Очень хорошо это понимал Шмальгауэен, который второе (посмертное) издание «Факторов эволюции» закончил следующими словами: «В заключение я хочу отметить, что стабилизирующий отбор в его конкретном проявлении не является обособленной формой отбора. Правильнее было бы говорить о движущем и стабилизирующем **эффекте** (*выделение автора*) единого процесса естественного отбора».

Если оценить исследованный в нашей модели отбор по поведению по его эффекту на онтогенез и изменчивость, то нетрудно видеть, что он, будучи формально движущим отбором, по существу ведет к резкой дестабилизации корреляционных систем развития и к сильнейшему повышению изменчивости. Отбор, обладающий таким эффектом, я назвал дестабилизирующим отбором [9, 10]. Дестабилизирующий отбор в кратчайшие сроки ломает систему онтогенетической регуляции признаков и функций, сложившихся под действием стабилизирующего отбора, и порождает громадный размах изменчивости. Изменчивость, вызванная дестабилизирующим отбором, становится тем материалом, на основе которого в дальнейшем осуществляются другие эффекты отбора — движущий и стабилизирующий. Следовательно, дестабилизирующий отбор — важный фактор эволюции, значительно ускоряющий ее темпы.

Отбор становится дестабилизирующим тогда, когда под его давление попадают непосредственно или опосредованно системы нейроэндокринной регуляции онтогенеза. А это случается, по-видимому, всегда, когда в среде появляются новые, не освоенные видом стрессорные факторы или когда еще большего напряжения и силы достигают уже освоенные видом стрессоры. В условиях доместикации отбор приобрел дестабилизирующий эффект именно потому, что доместицируемые виды столкнулись с целым комплексом принципиально новых стрессирующих (и отбирающих) факторов, главным из которых был, конечно, сам человек.

Дестабилизирующий эффект отбора проявляется, по-видимому, с особенной силой в экстремальных экологических ситуациях, при сильных давлениях стресса, особенно при смене среды, а не просто экологических ниш в пределах среды, т.е. именно в те моменты эволюционной истории, когда наблюдается особенно большое ускорение темпов эволюции.

Таким образом, стресс служит важнейшим модусом эволюции, ее фактором. Но стресс и стрессируемость неотделимы от самой жизни, они — ее условие, а, следовательно, и фактор ускорения эволюции жизни, особенно на высших этажах ее организации, когда система нейрогормональной регуляции онтогенеза достигает большого совершенства. Возможно, в наше время, когда давление стресса на все формы живых существ непрерывно повышается, он может вызвать дестабилизирующие эффекты отбора.

Можно думать, что стресс как фактор наследственной изменчивости может коснуться и самого человека, ибо, как бы мы, люди, ни пытались избавиться или оградить себя от все возрастающих разнообразных стрессирующих факторов, сделать это невозможно. Надо ясно представлять себе, что, будучи важным фактором прогрессивной эволюции, стресс при сверхсильных нагрузках может привести к разнообразным, в том числе и неблагоприятным, последствиям в смысле изменчивости и формирования новых векторов отбора. Объективная диалектика бытия состоит во взаимно противоречивом единстве добра и зла, и эту простую, но неоспоримую истину мы должны ясно видеть, пытаясь оценить перспективы эволюции жизни на нашей прекрасной планете. ■

Литература

1. *Беляев Д.К., Трут Л.Н.* Поведение и воспроизводительная функция животных. Корреляция свойств поведения с временем размножения и плодовитостью // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1964. Т.69. Вып.3. С.5–19.
2. *Енкен В.Б.* Роль генотипа в экспериментальном мутагенезе // Генетика. 1965. Т.1. №2. С.124–136.
3. *Трут Л.Н., Науменко Е.В., Беляев Д.К.* Изменение гипофизарно-надпочечниковой функции серебристо-черных лисиц при селекции по поведению // Генетика. 1972. Т.8. №5. С.35–43.
4. *Осадчук Л.В., Красе П.М., Трут Л.Н. и др.* Изменение эндокринной функции яичников у серебристо-черных лисиц в процессе доместикации // ДАН СССР. 1978. Т.238. С.758–760.
5. *Попова Н.К., Войтенко Н.Н., Трут Л.Н.* Изменение содержания серотонина и 5-оксииндолуксусной кислоты при селекции серебристо-черных лисиц по поведению // ДАН СССР. 1975. Т.223. №6. С.1498–1500.
6. *Muller H.J.* Further studies on the nature and causes of gene mutations // Proc. 6th Int. Congr. Genet. 1932. V.1. P.213–255.
7. *Цукеркандль Э., Полинг Л.* Молекулярные болезни, эволюция и генная разнородность // Горизонты биохимии. М., 1964.
8. *Шмальгаузен И.И.* Факторы эволюции. М., 1968.
9. *Беляев Д.К.* Биологические аспекты доместикации животных // Материалы Всесоюзного совещания по генетике и селекции новых пород сельскохозяйственных животных. Алма-Ата, 1970. С.30–34.
10. *Беляев Д.К.* О некоторых вопросах стабилизирующего и дестабилизирующего отбора // История и теория эволюционного учения. Л., 1974. Вып.2. С.76–84.

Приручение серой крысы

Р.В.Кожемякина,
младший научный сотрудник Института цитологии и генетики СО РАН

У серой крысы, или пасюка (*Rattus norvegicus*), репутация опасного, неприятного и весьма агрессивного создания, везде сопутствующего человеку и постоянно досаждающего ему. С другой стороны, именно серые крысы — родоначальники многочисленных пород и линий лабораторных или одомашненных крыс. Они стали наряду с лабораторными мышами популярными объектами самых разнообразных научных исследований, а также разводятся в качестве домашних питомцев. Это свидетельствует о чрезвычайной пластичности поведения вида *R.norvegicus*, его способности к существенным изменениям под влиянием естественного и искусственного отбора и к сравнительно быстрому одомашниванию. Таким образом, серая крыса считается одним из наиболее подходящих видов для изучения генетико-физиологических механизмов процесса доместикации [1].

Эксперименты по селекции серых крыс начались в 1970–1971 гг. под руководством П.М.Бородина в лаборатории эволюционной генетики нашего института. Диких пасюков ловили в различных районах Новосибирской обл., и к концу 1971 г. собралось 233 особи (117 самок и 116 самцов). Среди них были не только отловленные в природе, но и рожденные в виварии самками, которых поймали беременными. Эти животные послужили основателями трех популяций крыс.

В группы для селекции в двух направлениях отобрали 160 пасюков (по 80 самок и самцов) после оценки их поведения — оборонительной реакции на человека в тесте «на перчатку» по балльной шкале (от –4 до 4), в основу которой легли те же критерии, что при отборе серебристо-черных лисиц в эксперименте Д.К.Беляева [2]. Крысы с наименьшим проявлением агрессивно-трусливых реакций составили исходное поколение для селекции на доместикацию, а животные с выраженной оборонительной реакцией — для отбора в противоположном направлении (на поддержание и усиление агрессивности по отношению к человеку). В результате после нескольких поколений селекции были получены две группы серых крыс: ручные, которые не боятся человека и более толерантно, чем лабораторные, относятся к взятию их в руки, и агрессивные, для которых характерны враждебное отношение к человеку и высокий уровень внутривидовой агрессии самцов (рис.1). Остальные крысы (36 самцов и 37 самок) стали основателями контрольной популяции, в которой отбор по поведению не проводился.

Важно отметить, что при формировании исходных поколений этих популяций учитывалось не только поведение, но и происхождение животных. Крыс, отловленных в одном и том же районе, как и однопометников, рожденных самками, которых поймалиы беременными, по возможности распределяли по всем трем группам, чтобы с самого начала разведения минимизировать вероятность близкородственных спариваний. Популяция, которая разводилась без отбора по поведению, поддерживалась только до 1989 г. [2].

Серая крыса, или пасюк.

Здесь и далее фото М.Ю.Коношенко

© Кожемякина Р.В., 2017

Серая ручная крыса (слева), толерантная к человеку, и агрессивные самцы в тесте по изучению внутривидовой агрессии.

С 1990 по 2012 г. селекцию продолжала вести И.Ф.Плюснина. К настоящему времени получено уже 88 поколений отбора в обоих направлениях, данные популяции разводятся методом неродственных скрещиваний. Поведение крыс ручной линии характеризуется полным отсутствием агрессивности по отношению к человеку и толерантностью при взятии в руки, у крыс агрессивной линии в тесте «на перчатку» отмечается агрессия в 100% случаев, причем средний балл агрессивности близок к максимальному [3].

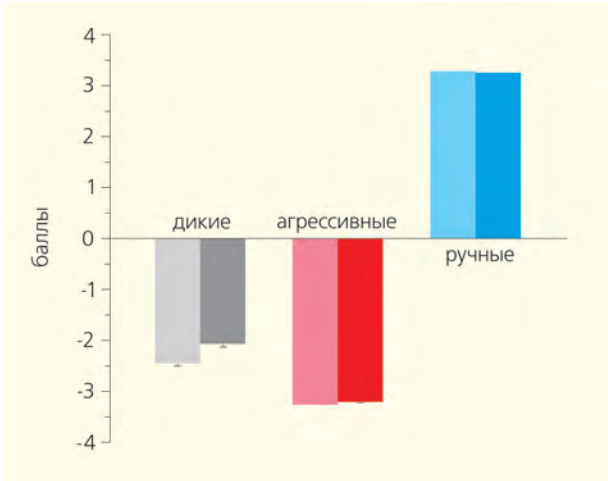


Рис.1. Оценка поведения серых крыс трех популяций в тесте «на перчатку». Левые столбики в каждой паре — самцы, правые — самки.

Вариации окраски

Дикий тип окраски *R.norvegicus* — агути *(agouti)* с осветленным брюшком: волосы имеют серые основания и желтоватые кончики, на животе шерсть светлая. Одно из первых последствий доместикации — появление в шерстном покрове белой пятнистости (пегости) и возникновение новых окрасочных мутаций. Пегость у крыс образуется в результате мутаций, которые нарушают нормальную пигментацию. В числе последствий искусственного отбора на доместикационное поведение отмечено также осветление тона основной окраски волос. У грызунов за ослабляение основной окраски отвечают гены *agouti* и *extinction*, поскольку они определяют количество и распределение пигментов (эумеланина и феомеланина) в волосе.

Отбор диких серых крыс по поведению привел к изменению в селекционируемых популяциях частоты рождаемости мутантных по окраске особей. При отборе на ослабление агрессивно-трусливых реакций на человека (на «ручное» поведение, или на доместикацию) возросла частота появления крысят с белой пятнистостью на брюшной стороне (пегостью). Белая пятнистость у пасюков обусловливается аллелями локуса *hooded* (капюшоном). Название этого главного локуса, детерминирующего белую пятнистость у крыс, происходит от характеристики экспрессии наиболее часто встречающегося мутантного аллеля. Голова крыс полностью окрашена, а на туловище и животе шерсть белая, за исключением полоски на спине, достигающей хвоста (на котором, однако, она может местами прерываться или полностью обрываться). Таким образом, хвост может быть не окрашен либо окрашен целиком, а может быть и пятнистым. Необходимо отметить, что с самого начала по ряду причин строгий учет появления крысят с вентральной пегостью проводился только с 30-го поколения отбора.

Но самое существенное отличие эффектов селекции в двух направлениях состоит в том, что при отборе на агрессивность при скрещивании стандартных по фенотипу серых крыс регулярно появляются гомозиготы по рецессивной мутации *non-*

agouti, которые совсем не регистрировались в популяции ручных пасюков. Мутация *non-agouti* приводит к тому, что мех становится полностью черным из-за утраты способности к образованию в волосе желтого пигмента. В агрессивной же популяции первые черные крысята были потомками 25-го поколения отбора, они также зарегистрированы в 28-м. Начиная с 30-го поколения черные потомки появляются регулярно [2].

Морфометрический анализ параметров волос, влияющих на интенсивность окраски шерсти, показал, что в популяции диких крыс агути существует полиморфизм по основной окраске шерсти, т.е. имеются как светло-серые особи, так и темно-серые агути. Среди агрессивных животных преобладают темноокрашенные, а среди ручных — светлые. Связь эффектов отбора по поведению с модификациями окраски шерсти, вероятно, обусловлена изменениями нейрогормональных механизмов регуляции этих процессов [4].

Поведение серых крыс

Тревожность или страх? Изучение поведения ручных и агрессивных крыс было проведено на различных экспериментальных моделях, с использованием разных поведенческих тестов, таких как реакция на новое окружение, исследовательская активность и реакции страха или тревожности. Были использованы тесты «открытого поля» (open-field), «приподнятый крестообразный лабиринт» (elevated plus maze), «светло-темная камера» (light-dark box), «реакция вздрагивания» (startle response), а также тест на неофобию — поведение, при котором животные избегают новых предметов.

Исследовательская активность у крыс проявляется в осмотре новой среды, обнюхивании, вертикальной двигательной активности (rearing), заглядывании в различные отверстия, перемещении доступных объектов. Тревожность выражается в замирании, поиске убежища, паническом бегстве, дефекации. Стоит отметить, что традиционные подходы к оценке тревожности у животных в стандартных тестах часто не учитывают тип стратегии поведения в незнакомой ситуации, что затрудняет интерпретацию полученных данных.

Многочисленные исследования, проводимые на серых крысах, показали, что селекция на элиминацию и усиление агрессивности по отношению к человеку не только затронула признак, по которому велся отбор, но и изменила поведение крыс в ответ на разные типы стрессоров. С помощью различных тестов для изучения тревожности было показано, что селекция на отсутствие агрессивности по отношению к человеку привела к значительному ослаблению тревожности и усилению исследовательского поведения [5–7]. С использованием крыс четвертого и последующих поколений селекции было продемонстрировано, что доместицированные крысы характеризуются отсутствием неофобии [8].

Достоверные отличия в оценке тревожности между ручной и агрессивной линиями были обнаружены только в тесте «светло-темная камера». Под тревожностью этологи понимают защитный ответ организма на потенциальное присутствие угрозы (в отличие от страха, вызванного реальным угрожающим стимулом). Светло-темная камера состоит из двух частей: темная часть — из винипласта, светлая — из прозрачного оргстекла. Для возможности перехода из светлой части в темную имеется отверстие диаметром 7 см на высоте 5 см от пола. Животное помещали в светлую часть камеры носом к отверстию. Светлую часть дополнительно освещала лампа в 200 Вт. Более тревожные животные предпочитают находиться в темном отсеке (рис.2).

Площадка открытого поля представляет собой круглую белую арену диаметром 1 м, равномерно освещенную и огороженную непрозрачной стенкой высотой 45 см. Каждая крыса переносится из домашней клетки на площадку открытого поля в переносном пенале, который ставится в центр арены. Крысу высаживают на площадку, убирая выдвижной пол пенала. Продолжительность теста 5 мин. В этом тесте ручные крысы отличаются от агрессивных пониженной эмоциональностью (вегетативная реакция дефекации) и преобладанием исследовательского поведения над реакциями избегания и замирания [6, 9]. Агрессивные особи превосходили ручных по числу пересеченных ими отсеков при локомоции. Усиленная двигательная активность агрессивных крыс рассматривается

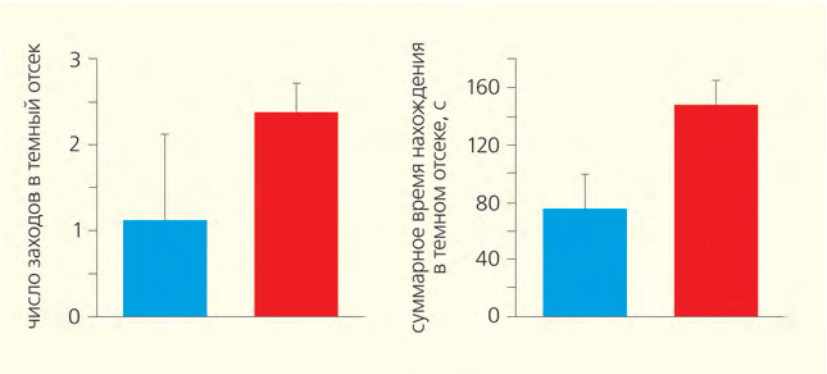


Рис.2. Поведение серых крыс в тесте «светло-темная камера». Ручные крысы (синие столбики) реже, чем агрессивные (красные), заходят в темный отсек и меньше времени там проводят.

как проявление паники, вызванной страхом.

Для исследования уровня испуга определяли выраженность рефлекса вздрагивания (startle-реакции), вызванного акустическим сигналом. Через 3 мин после помещения крысы в аппарат подавалось четыре акустических сигнала с интервалом 30 с. Ручные крысы характеризуются в три раза меньшей амплитудой рефлекторной реакции вздрагивания, чем агрессивные, и большей скоростью угасания этого рефлекса, а значит, меньшей выраженностью эмоционального состояния страха (рис.3) [10].

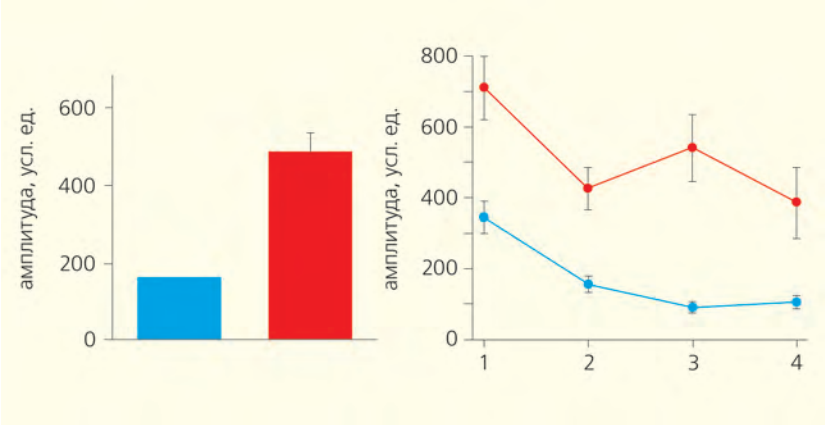


Рис.3. Экспрессия startle-реакции ручных (синий цвет) и агрессивных (красный) крыс [10]. Слева — усредненные значения, справа — динамика при повторных тестированиях.

Особый интерес представляют сдвиги в сроках формирования поведения у ручных и агрессивных крыс. В дикой популяции открытие наружных слуховых проходов и глаз у крысят отмечается на 13-15-й день после рождения. Но в процессе отбора на доместикационное поведение животных многие физиологические и морфологические параметры сдвинуты в развитии. Так, у ручных и агрессивных крысят глаза и уши открываются к 18-дневному возрасту, когда происходит становление локомоторной активности, что позволяет адекватно реагировать на окружающую среду.

Изучение исследовательского поведения проводилось у крысят в возрасте 18, 21, 28 и 45 сут. Крысята до месячного возраста помещались в специальные клетки из непрозрачного материала с двумя рядами отверстий в крышке (по три отверстия в каждом ряду). Тестирование 45-дневных крысят проводили в аналогичных клетках, но большего размера. Уровень исследовательской активности оценивался по количеству обследований отверстий (высовываний носа) в тесте (holeboard test). В возрасте 28 и 45 дней число обследованных отверстий в тесте на исследовательскую активность у ручных крыс резко возрастает по сравнению с более ранним возрастом (рис.4). У агрессивных же наблюдается лишь небольшое усиление этой активности в 28-дневном возрасте [9].

Способность к обучению. Животные, попадая в неволю, становятся менее зависимы от хищников, от наличия воды и пищи, от климата и т.д., что в конечном счете резко обедняет их средовое окружение и снижает адаптивные возможности. Неволя — источник множества стрессовых условий: ослабления физической нагрузки, необходимости сопротивляться новым инфекциям, депривации естественных релизинг-стимулов, изменений в пище и источниках воды, скученности или, наоборот, изоляции и т.д. [11–13].

Несомненно, важную роль при успешной доместикации большинства видов животных играет опыт, приобретенный в ходе обучения. Можно ожидать, что в процессе одомашнивания их способность к обучению будет повышаться. Этому может способствовать и повышение роли поисковой фазы поведенческого акта, которая у домашних животных приобретает большую независимость от завершающей стадии [14]. Однако экологическая ситуация, складывающаяся в каждый конкретный момент для животных природных популяций, сложнее и разнообразнее, чем стандартные условия неволи. Неслучайно поэтому способность к решению задачи на экстраполяцию у некоторых видов доместицированных и лабораторных животных ниже, чем у представителей тех же видов, обитающих в природе. Что же касается способности к обучению, то данные сравнительного анализа более чем скудны. Имеется лишь небольшое число таких исследований: лабораторные крысы оказались более способны к решению задач, чем дикие, у которых отмечались стерео-

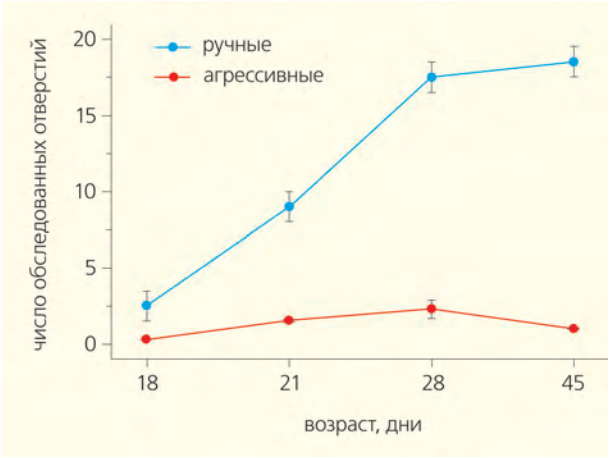


Рис.4. Уровень исследовательских реакций у ручных и агрессивных крыс в разном возрасте [7].

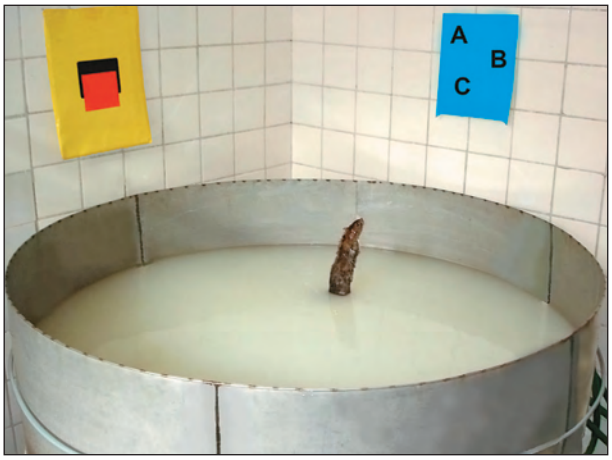
типные двигательные реакции и резко выраженная неофобия [15–17].

Нет сомнений в том, что на первых этапах одомашнивания человек и антропогенная среда были для животных стрессирующими факторами, и отбор на доместикацию по существу своему был отбором на ослабление эмоциональных реакций страха и агрессии на эти факторы. Поэтому логично предположить, что способность к обучению, тестируемая в стрессовых ситуациях, будет выше у домашних животных, чем у исходного дикого типа.

На крысах 64-го поколения отбора проводилось исследование, в котором анализировалась способность к обучению в водном тесте Морриса: животное обучается находить скрытую под водой платформу. Сам аппарат представляет собой круглый плавательный бассейн диаметром 150 см, наполненный водой (забеленной молоком) до высоты 37 см. Условно бассейн был разделен на четыре равных сектора. Невидимая платформа (высотой 34 см и 10 см в диаметре) устанавливалась в центре одного из секторов. Сверху на платформу прикреплялась металлическая сетка, на которой животное находилось, когда добиралось до нее. На ближайших к бассейну стенах были развешаны картинки, которые, также как и находящиеся в комнате оборудование, могли служить пространственными ориентирами.

Обучение каждого животного состояло из четырех попыток ежедневно в течение семи дней. Для этого животное опускали в воду последовательно из четырех равноудаленных точек, изменяя место старта (первое помещение в бассейн) в случайном порядке, и сохраняли последовательность помещения в бассейн для всех животных. Крысе позволялось плавать в течение 70 с. Независимо от того, нашло ли животное платформу само или его туда направили, оно находилось на платформе 20 с. Затем животное вынимали из бассейна, обсушивали и помещали в переносную клетку, а через 10–12 мин повторяли процедуру обучения. На восьмой день проводили тестирование прочности следа пространственной памяти в отсутствие платформы.

С помощью данного теста показано, что ручные и агрессивные крысы способны к пространственному обучению. Ручные самцы успешнее агрессивных справляются с поиском скрытой под водой платформы, и уже со второго дня обучения их плавание начинает приобретать целенаправленный характер, в то время как у агрессивных животных это наблюдается на пятый день обучения (рис.5). Вероятно, в процессе обучения в водном тесте Морриса, процедура которого, несомненно, носит аверсивный характер, агрессивные животные испытывают более сильный испуг. В результате агрессивные крысы, особенно на начальных этапах обучения, существенно превосходят ручных по времени плавания на периферии бассейна, что, видимо, затрудняет у них процесс формирования пространственного представления (о расположении платформы). Подтверждение того, что ручные крысы испытывают меньший страх, чем агрессивные, получены при изучении исследовательской активности животных. Ручные крысы, добравшись до платформы, принимают вертикальные позы, активно исследуя окружающую среду, что практически не наблюдается у агрессивных животных, которые сидят, прижимаясь к платформе. Тем не менее все крысы запомнили положение платформы: результаты теста на прочность следа памяти после окончания обучения, когда платформа была убрана из бассейна, показали, что животные обеих линий достоверно больше времени плавали в том секторе, где она ранее находилась. Однако у агрессивных крыс это время было достоверно меньше, чем у ручных, — возможно, из-за их повышенной реакции на изменившуюся ситуацию. Нельзя исключить и того,



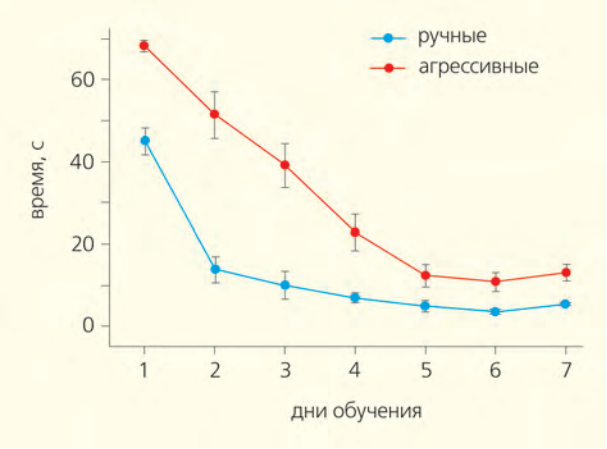


Рис.5. Серая крыса при проведении водного теста Морриса (фото автора). Справа — время поиска платформы ручными и агрессивными крысами в этом тесте.

что ручные крысы благодаря их более успешному обучению, чем у агрессивных, лучше запомнили положение платформы.

Таким образом, отбор на доместикацию существенно повысил исследовательскую мотивацию и снизил реакцию страха в незнакомой обстановке, обеспечив более высокую толерантность ручных крыс по отношению не только к человеку, но и к окружающей незнакомой среде. Усиление роли поведенческой адаптации у крыс ручной линии ярко проявляется в повышенной способности к пространственному обучению в тесте Морриса и к выработке рефлекса пассивного избегания [5].

*Внутривидовая агрессия**. На современном этапе селекции вопрос влияния доместикации на внутривидовое поведение серых крыс представляет особый интерес, но до настоящего времени оставался малоизученным. Среди естественных форм внутривидового агрессивного поведения животных выделяются: агрессия доминанта для установления и поддержания социальной иерархии у социальных видов посредством агрессивных актов, поз и демонстраций; территориальная агрессия для защиты собственной территории; материнская агрессия, направленная на защиту потомства; агрессия, вызванная страхом в ответ на нападение другой особи; агрессия, вызванная раздражением в ответ на неожиданные или неприятные условия.

До 30-х поколений селекции было показано, что отбор на отсутствие защитной агрессии по отношению к человеку не вызвал изменения внутривидовой межсамцовой агрессии и агрессии хищника, однако ослабил агрессию, вызванную электрическим током [8]. И это согласуется с вектором отбора! Известно, что на современном этапе отбора у серых крыс произошло существенное изменение медиаторных и гормональных систем, тесно связанных с агрессивным поведением. Таким образом, созрела необходимость изучить влияние отбора по поведению на различные виды внутривидовой межсамцовой агрессии, а также провести сравнения с природными дикими крысами, не подвергавшимися направленной искусственной селекции. В качестве контроля были использованы крысы дикого типа из неселекционированной популяции 3–7-го поколений содержания в условиях вивария. Эти особи происходили от диких серых крыс, отловленных в окрестностях новосибирского Академгородка в 2005–2007 гг. Были пойманы две самки и три самца, которые дали потомство, послужившее основой для разведения неселекционированной популяции крыс дикого типа, условно называемых дикими, для сравнения с селекционированными линиями крыс на современном этапе отбора.

Для изучения внутривидовой межсамцовой агрессии использовались методики, которые широко применяются при исследовании данного вопроса: тест «резидент—интрудер» (resident—intruder) в домашней клетке и тест на межсамцовую агрессию в незнакомой. За неделю до поведенческого тестирования крыс рассаживали в клетки по одной особи. В качестве «интрудеров» были использованы неагрессивные самцы лабораторных крыс линии Вистар.

Результаты данных работ свидетельствуют, что длительный отбор серых крыс на отсутствие агрессивности по отношению к человеку привел к ослаблению внутривидовой агрессии самцов. При этом ручные самцы характеризовались значительным ослаблением внутривидовой межсамцовой агрессии по сравнению и с агрессивными, и с неселекционированными крысами. Агрессивное межсамцовое взаимодействие включает в себя разные поведенческие реакции, которые либо заканчиваются активными действиями «резидента» с нанесением физических повреждений в виде укусов и ран, либо связаны с демонстрацией агрессивных намерений [18]. К последним часто относят боковые позы угрозы, которые могут наблюдаться без наличия атаки и других элементов агрессивного поведения. Такие элементы поведения, как атака, вертикальная стойка, удар задней лапой, преследование, опрокидывание на спину, агрессивный груминг, тесно связаны между собой и в процессе агрессивного взаимодействия «резидента» и «интрудера» сменяют друг друга.

Агрессивные взаимодействия наблюдались у крыс всех генотипов, но в большей степени были выражены у неселекционированных и агрессивных (рис.6). Более того, территориальная агрессия ручных крыс в тесте «резидент—интрудер» характеризуется в большей степени проявлением боковых поз угрозы. Данный тип поведения сам по себе не наносит физического вреда оппоненту и представляет собой лишь начальный элемент адаптивной агрессии нападения. Демонстрация агрессивных намерений дает оппоненту возможность избежать физической конфронтации путем бегства или проявления субмиссивного (зависимого) поведения [19, 20].

В целом агрессивное поведение ручных, агрессивных и диких самцов при тестировании в незнакомой клетке отличается от территориальной агрессии в тесте «резидент—интрудер» увеличением латентного периода и представлено меньшим спектром поведенческих паттернов, что свидетельствует, по-видимому, о более слабом проявлении межсамцовой агрессии на незнакомой территории, чем при защите своей собственной.

В то же время отбор на отсутствие агрессии по отношению к человеку не сопровождался изменением агонистического репертуара — сложного комплекса действий, наблюдаемого во время конфликтов между особями одного вида и включающего взаимные угрозы, нападения на соперника, бегство от него, преследования и демонстрации

* Автор благодарит М.Ю.Коношенко за предоставленный материал своей диссертации к этому разделу.

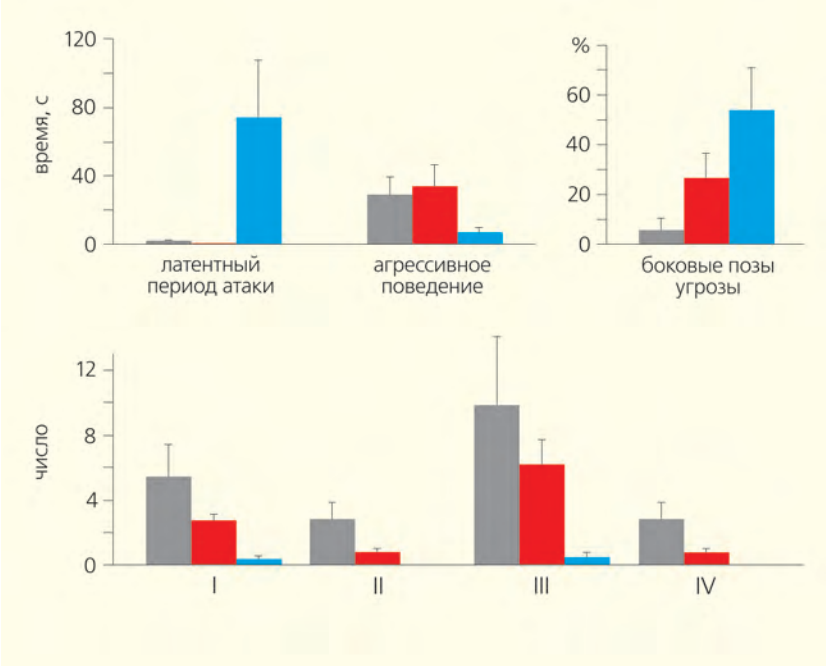


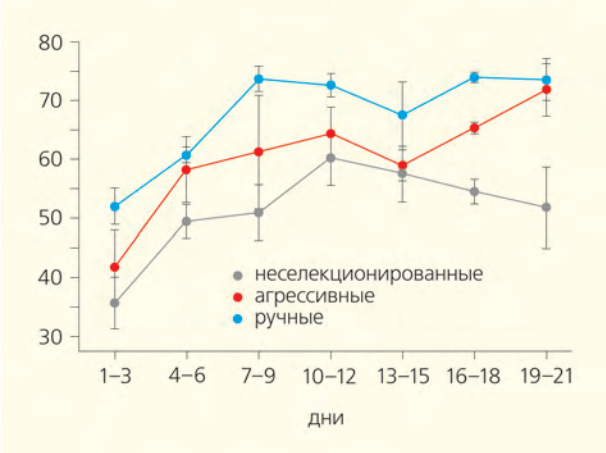
Рис.6. Агрессивное поведение диких (серые столбики), агрессивных (красные) и ручных (синие) крыс в тесте «резидент-интрудер». Выяснилось, что продолжительность конфронтаций и число типов агрессивного поведения (I — атак, II — преследований, III — ударов задними лапами, IV — вертикальных поз) больше, а латентный период первого агрессивного взаимодействия меньше у диких и агрессивных крыс по сравнению с ручными. При этом ручные крысы обычно проявляют агрессию, демонстрируя боковые позы угрозы (указано в % от времени агрессивного поведения).

подчинения. Подтверждением данного факта стали результаты экспериментов с использованием ручных и агрессивных самцов в качестве оппонентов в тесте «резидент—интрудер», а также взаимодействие ручных и агрессивных самцов в тесте на межсамцовую агрессию в незнакомой клетке. Известно, что поведение «интрудера» может оказывать существенное влияние на поведение «резидента» [21, 22]. Например, самец-«резидент», как правило, перестает атаковать, если оппонент замирает или принимает позу подчинения. Был проведен сравнительный анализ территориальной агрессии в тесте «резидент—интрудер» ручных и агрессивных самцов при взаимодействии с «интрудерами» линии Вистар, ручными и агрессивными. Более существенное влияние генотип «интрудера» оказал на поведение «резидентов» ручной линии. Хотя ручные крысы характеризуются ослаблением внутривидовой агрессии, при взаимодействии в различных тестах с агрессивным оппонентом они проявляют такую же сильную агрессию, как крысы агрессивной линии. Полученные результаты хорошо согласуются с известными литературными данными [17, 23, 25]. Так, первые исследования, посвященные сравнению межсамцовой агрессии диких и лабораторных крыс, свидетельствовали, что их агонистический репертуар не различается [17, 25]. Однако агрессия, свойственная диким крысам и сопровождающаяся высоким уровнем агрессивных столкновений (с нанесением ран), у лабораторных крыс может быть вызвана только сильными стрессирующими воздействиями [17, 25] или взаимодействием с высокоагрессивным оппонентом. Усиление агрессии у ручных самцов при взаимодействии с оппонентами агрессивной линии, а также отсутствие достоверных различий в поведении ручных и агрессивных самцов при подсаживании к ним самца агрессивной линии подтверждают и уточняют гипотезу, согласно которой доместикация сопровождается ослаблением межсамцовой агрессии и повышением порога агрессии [17, 26].

Материнское поведение

Вопрос средового программирования фенотипического развития в настоящее время приобретает все большую актуальность. Пионерные работы Левина и Дененберга показали, что даже незначительные изменения средовых условий в ранний период развития крыс могут иметь длительные последствия для формирования оборонительного поведения эмоциональности и стресс-реактивности [27, 28]. В этот период важную роль в развитии адаптивных способностей потомства играет материнская забота. Проблема заключается в том, чтобы определить точную природу взаимосвязи генотипа и раннего материнского поведения для установления причин фенотипических различий у потомства.

При изучении материнского поведения выделяют различные типы поведения, связанные не только со вскармливанием потомства, но и с индивидуальными реакциями вне гнезда [29]. В описание материнского поведения входит также тип вскармливания, от которого зависит уровень молокоотдачи, и наличие контактов матери с крысенком. Тактильная стимуляция со стороны матери посредством вылизывания и чистки регулирует физиологию крысенка и оказывает воздействие на развитие нервной системы [30]. Различия среди самок по интенсивности этой формы материнского поведения (как и по типу вскармливания) оказывают влияние на развитие индивидуальных особенностей поведенческих ответов на стресс у потомства [31, 32].



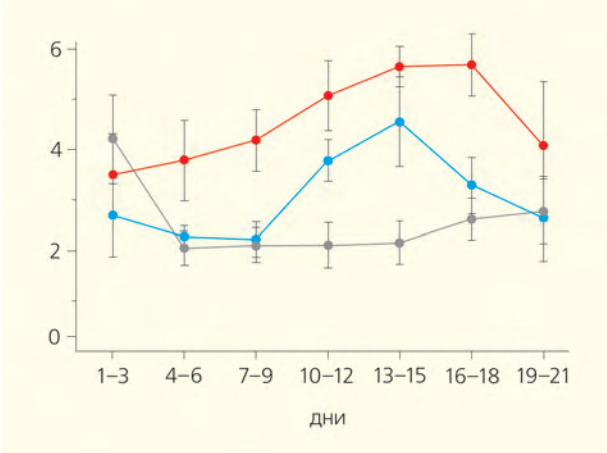


Рис.7. Динамика материнского поведения агрессивных, ручных и неселекционированных крыс в первые три недели вскармливания: слева — частота нахождения самки за пределами гнезда (указано в % от общего числа наблюдений); справа — частота вылизывания/умывания крысят (в % от числа наблюдений, когда самка находилась в гнезде).

В целом самки ручной и агрессивной линий демонстрируют более низкий уровень материнской заботы по сравнению с неселекционируемыми самками. Вероятно, последние сохраняют высокую тревожность в период лактации, что заставляет их больше времени находиться в гнезде за весь период наблюдений и кормить с высокой частотой в позе «арка» (стоить отметить, это самая напряженная поза, требующая наибольших энергетических затрат от самки). Известно, что кормящая крыса выделяет молоко порциями, а не непрерывно, и кормление в такой позе в большинстве случаев свидетельствует о периодах максимального выделения молока. В то же время для неселекционированных самок характерна низкая частота вылизывания крысят, что связано, по-видимому, с тем, что матери реже выходят и, соответственно, реже возвращаются в гнездо (рис.7).

Не менее значимое влияние оказывают различные воздействия в ранний постнатальный период — сразу после рождения. Влияние постнатальной среды главным образом опосредуется через влияние матери. Чтобы изучать влияние постнатальной материнской среды, обычно потомство одной самки передают для вскармливания и воспитания другой (перекрестное воспитание). Перекрестное воспитание широко используется для исследования роли генетических и средовых факторов в формировании поведения и стрессорной реактивности. С помощью этого метода было показано, что при отборе на различные свойства поведения одни поведенческие особенности детерминируются только генотипом, а в другие — существенный вклад вносят материнские факторы. Перекрестное воспитание не оказало существенного влияния на исследуемые в настоящей работе поведенческие реакции (поведение по отношению к человеку, исследовательская реакция и амплитуда startle-реакции) у серых крыс. Эффекты перекрестного воспитания зависят от генотипа крысят.

Вылизывание/умывание крысят матерью.

Фото автора

Таким образом, все полученные на этой модели к настоящему времени результаты ярко свидетельствуют о том, что движущая сила эволюционного преобразования животных в процессе одомашнивания — отбор по поведению, отбор на ослабление и последующую элиминацию агрессивно-оборонительных реакций на человека. Безусловно, в рамках данной статьи невозможно представить все полученные материалы, накопленные разными исследователями. Эксперимент по доместикации серой крысы еще раз подтвердил концепцию Д.К.Беляева: важнейший фактор эволюции — отбор по поведению. ■

Работа поддержана бюджетным финансированием по государственному заданию Минобрнауки России (проект 0324-2016-0002).

Литература

1. *Кожемякина Р.В., Коношенко М.Ю., Сахаров Д.Г. и др.* Сравнительный анализ поведения в тесте открытого поля диких крыс (*Rattus norvegicus*) и серых крыс, прошедших длительный отбор на толерантное и агрессивное поведение // Журн. высш. нервн. деят. им.И.П.Павлова. 2016. Т.66. №1. С.92–102.
2. *Trut L.N., Plyusnina I.Z., Prasolova L.N.* Mutations hooded and nonagouti in the Norway rat *Rattus norvegicus*: Effects of selection for behavior and photoperiod // Rus. J. Genet. 2000. V.36. №6. P.668–676.
3. *Plyusnina I.Z., Oskina I.N., Tibeikina M.A. et al.* Cross-fostering effects on weight, exploratory activity, acoustic startle reflex and corticosterone stress response in Norway gray rats selected for elimination and for enhancement of aggressiveness towards human // Behav. Genet. 2009. V.39. P.202–212.
4. *Прасолова Л.А., Оськина И.Н., Плюснина И.З.* Плейотропный эффект отбора по поведению на окраску шерсти серых крыс (*Rattus norvegicus*) // Генетика. 2013. Т.49. №2. С.244–250
5. *Лоскутова Л.В., Дубровина Н.И., Плюснина И.Ф.* Типологические особенности поведения и памяти у крыс-пасюков, селектированных на отсутствие агрессии к человеку // Журн. высш. нервн. деят. им.И.П.Павлова. 2003. Т.53. №6. С.739–745.
6. *Плюснина И.З.* Двигательная активность — исследование или «паника»? // Рос. физиол. журн. им. И.М.Сеченова. 2004. Т.90. №8. С.84.
7. *Plyusnina I., Oskina I.* Behavioral and adrenocortical responses to open-field test in rats selected for reduced aggressiveness toward humans // Physiol. Behav. 1997. V.61. P.381–385.
8. *Naumenko E.V., Popova N.K., Nikulina E.M. et al.* Behavior, adrenocortical activity, and brain monoamines in Norway rats selected for reduced aggressiveness towards man // Pharmacol. Biochem. Behav. 1989. V.33. P.85–91.
9. *Плюснина И.З., Оськина И.Н., Никулина Э.М. и др.* Вектор отбора и онтогенетические закономерности формирования поведения при доместикации серых крыс // Генетика. 1997. Т.33. №8. С.1149–1154.
10. *Попова Н.К., Барыкина Н.Н., Плюснина И.З. и др.* Экспрессия реакции испуга у крыс, генетически предрасположенных к разным видам защитного поведения // Рос. физиол. журн. им. И.М.Сеченова. 1999. Т.85. №1. С.99–104.
11. *Price E.O., King J.A.* Domestication and adaptation // Adaptation of Domestic Animals / Ed. E.S.E.Hafez. Philadelphia, 1968. P.34–45.
12. *Hediger H.* Wild Animals in Captivity. N.Y., 1964.
13. *Scott M.D., Causey K.* Ecology of feral dogs in Alabama // J. Wildlife Manag. 1973. V.37. P.253–265.
14. *Thorpe W.H.* Learning and Instinct in Animals. L., 1963.
15. *Bamber R.T., Boice R.* The labyrinth method of comparing wild and domestic rats: History revisited // Psychonom. Sci. 1972. V.29. P.161–163.
16. *Boice R.* Effect of domestication on avoidance learning in the wild rat // Psychonom. Sci. 1970. V.18. P.13–14.
17. *Boice R.* Some behavioral tests of domestication in Norway rats // Behaviour. 1972. V.3–4. P.198–231.
18. *Пошивалов В.П.* Этологический атлас для фармакологических исследований на грызунах (мыши, крысы). М., 1978.
19. *Blanchard R.J., Blanchard C.D.* Aggressive behavior in the rat // Behav. Biol. 1977. V.21. P.197–224.
20. *Blanchard R.J., Wall M.P., Blanchard C.D.* Problems in the study of rodent aggression // Hormones and behavior. 2003. V.44. P.161–170.
21. *Lucion A.B., de Almeida R.M.M.* Role of the intruder in the aggressive behaviour of colonies of wild rats (*Rattus norvegicus*) // Animal Models in Psychopharmacology, Advances in Pharmacological sciences. Basel, 1991. P.347–356.
22. *Takahashi L.K., Blanchard R.J.* Attack and defense in laboratory and wild Norway and black rats // Bahav. Proc. 1982. V.7. P.49–62.
23. *Blanchard R.J., Fukunaga K., Blanchard D.C., Kelley M.J.* Conspecific aggression in the laboratory rat // J. Compar. Physiol. Psychol. 1975. V.89. P.1204–1209.
24. *Boice R.* Domestication // Psycol. Bull. 1999. V.80. P.215–230.
25. *Price E.O.* Behavioral aspects of animal domestication // Quart. Rev. Biol. 1984. V.59. №1. P.1–32.
26. *Hale E.B.* Domestication and the evolution of behavior // The behavior of domestic animals / Ed. E.S.E.Hafez. Baltimore, 1969. P.22–45.
27. *Levine S.* Infantile experience and resistance to physiological stress // Science. 1957. V.126. P.405.
28. *Denenberg V.H., Brumaghim J.T., Haltmeyer G.C. et al.* Increased adrenocortical activity in the neonatal rat following handling // Endocrinology. 1967. V.81. P.1047–1052.
29. *Myers M.M., Brunelli S.A., Squire J.M. et al.* Maternal behavior of SHR rats and its relationship to offspring blood pressure // Dev. Psychobiol. 1989. V.22. P.29–53.
30. *Levine S.* Maternal behavior as mediator of pup adrenocortical function // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1994. P.260–275.
31. *Francis D., Diorio J., LaPlante P. et al.* The role of early environmental events in regulating neuroendocrine development. Moms, pups, stress, and glucocorticoid receptors // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1996. V.794. P.136–152.
32. *Liu D., Diorio J., Tannenbaum B. et al.* Maternal care, hippocampal glucocorticoid receptors, and hypothalamic-pituitary-adrenal responses to stress // Science. 1997. P.1659–1662.

Возрождение поруганной науки

Фрагменты из книги воспоминаний об академике Д.К.Беляеве*

Создавшаяся после 1948 г. обстановка, волна проработок, принуждение к отказу от своих убеждений и раскаянию, снятие с работы и невольная изоляция способствовали объединению генетиков. В то время ДК нашел своих настоящих друзей и единомышленников. Это были Борис Львович Астауров, глубокое уважение к которому перешло в искреннюю дружбу, Николай Николаевич Соколов и Борис Николаевич Сидоров, Владимир Владимирович Сахаров, Вера Вениаминовна Хвостова, Петр Фомич Рокицкий, Екатерина Тимофеевна Васина, Леонид Викторович Крушинский. ДК был значительно моложе ветеранов генетики, но он органично вписался в их спаянный невзгодами коллектив, несломленный, готовый к новой борьбе за истину в науке. В 1968 г. Б.Л.Астауров писал: «В “потерянном поколении” биологов, формировавшихся как исследователи в трудный для биологии период, генетики такой квалификации и уровня, как Д.К.Беляев, практически нацело отсутствуют. Это был трагический период в биологии, “землетрясением” была охвачена вся биология, и только эпицентр находился в области генетики. Приток молодых сил в генетику был надолго задержан, так как в высших учебных заведениях так же, как и всюду в биологии и медицине, господствовал лысенкоизм». <...>

Судьба Дмитрия Константиновича Беляева сложилась так, что он оказался в центре важнейших для страны событий: возрождения поруганной науки генетики, претерпевшей гонения в течение нескольких лет, а также организации и становления Сибирского отделения Академии наук, не говоря уже о войне, ког-

* Академик Дмитрий Константинович Беляев: книга воспоминаний / Отв. ред. Шумный В.К., Бородин П.М., Маркель А.Л., Аргутинская С.В. Новосибирск, 2002.

Первый ученый совет, 1961 г. Сидят (слева направо): П.К.Шкварников, Ю.Я.Керкис, О.И.Майстренко, З.С.Никоро, Д.К.Беляев, В.Б.Енкен, Р.И.Салганик, Ю.П.Мирюта, А.Н.Лутков; стоят: Н.Б.Христолюбова, Ю.О.Раушенбах, Т.С.Ростовцева, Н.А.Плохинский, В.В.Тряско, И.И.Кикнадзе, В.Н.Тихонов, К.П.Ануфриев, С.Е.Боржковский, Г.Ф.Привалов.

Дмитрий Константинович Беляев с Борисом Львовичем Астауровым.

да он разделил судьбу народа, пробыв на фронте 4 года. «Солдат войны, науки и труда» — так называл Д.К.Беляева В.К.Шумный.

Важнейшие события в волнующем процессе возрождения генетики в той или иной степени связаны с именем Дмитрия Константиновича. Генетики, обреченные на молчание после августовской сессии, пытались использовать малейшую возможность для популяризации науки. Еще до Пленума ЦК КПСС 1964 г. ДК с группой выдающихся генетиков страны участвовал в первых после августовской сессии публикациях по генетике и прочел две лекции по разведению пушных зверей в Политехническом музее. Через месяц после пленума 1964 г., когда можно было надеяться на признание генетики, в «Правде» была напечатана статья Д.К.Беляева с четкими рекомендациями по восстановлению разгромленной науки в стране. <...> Речь шла, в частности, об изменении учебных программ по генетике в вузах, о создании общества генетиков и селекционеров, о научном журнале по генетике, об укомплектовании селекционных учреждений специалистами, владеющими генетической теорией. ДК был очень рад, когда увидел эту статью напечатанной, это был хороший признак изменения отношения к генетике: газета «Правда» — правительственный орган. Ведущие генетики страны энергично взялись за организационные вопросы, может быть, даже в ущерб своей научной работе. Интерес к генетике среди научной общественности был очень велик.

В начале 1965 г. ДК для ученых всего Академгородка прочел лекцию «О некоторых философских вопросах генетики». Интерес к генетике, подчеркнул ДК в докладе, определяется исключительным интересом к биологии и естествознанию вообще. Рассмотрев материальные основы наследственности, ДК не мог обойти вопроса о догматических представлениях Т.Д.Лысенко и его последователей на процессы наследования признаков и роли внешней среды на наследственность и изменчивость. Заканчивая доклад, ДК сказал о значении морально-этического поведения ученых, о верности служения науке.

В 1965 г. ученым-генетикам удалось основать свой печатный орган — научный журнал «Генетика». Первым главным редактором был академик ВАСХНИЛ П.М.Жуковский, заместителями — С.И.Алиханян и Д.К.Беляев. ДК с самого начала держал твердую линию сохранения высокого теоретического уровня журнала и тесной связи с селекционерами. Установление союза генетиков и селекционеров как основы плодотворного развития науки считали важнейшей задачей лидеры советской генетики академики Н.И.Вавилов и Б.Л.Астауров. Этому принципу в полной мере следовал Д.К.Беляев.

В 1966 г. усилиями инициативной группы генетиков под руководством академика Б.Л.Астаурова было создано Всесоюзное общество генетиков и селекционеров. Позже к большой радости ученых удалось добиться присвоения обществу имени академика

С Верой Вениаминовной Хвостовой и Леонидом Викторовичем Крушинским.

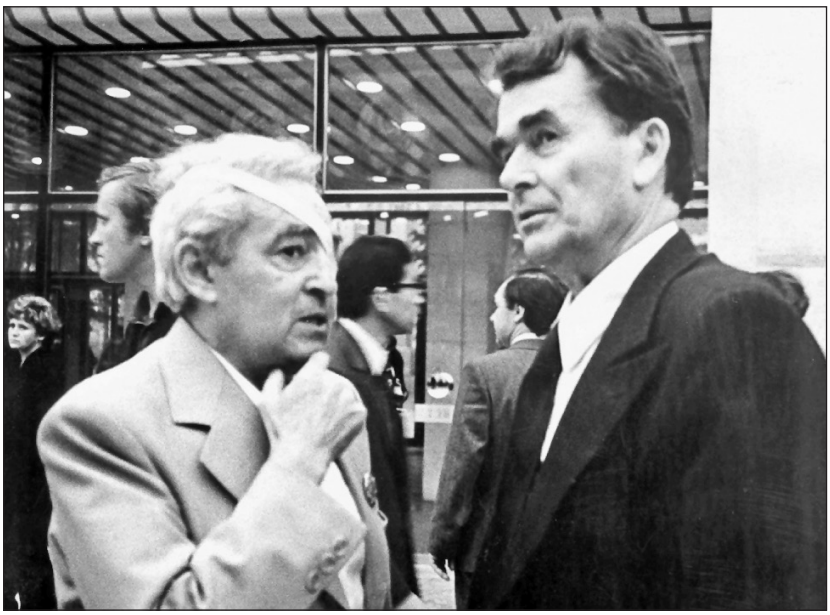
Н.И.Вавилова. Учредительный пленум ВОГиС был проведен в апреле 1967 г. в Мозжинке под Москвой. Это было первое после длительного перерыва собрание генетиков. Присутствовали 30 замечательных ученых, многие из которых прошли нелегкие испытания, сохранив жизненный оптимизм и верность науке. Борис Львович Астауров был избран президентом общества, вице-президентами выбрали С.И.Алиханяна, Д.К.Беляева, В.Д.Тимакова и Н.В.Цицина.

Перед руководством ВОГиС встала серьезная задача: организовать генетиков союзных республик и крупных городов и областей. ДК побывал в Казахстане, Таджикистане и Узбекистане, помогая объединить местных генетиков. <...>

С Николаем Николаевичем Соколовым.

С марта 1968 г. ДК стал бессменным председателем Научного совета по проблемам генетики и селекции при Президиуме Академии наук СССР. Это была большая работа, требовавшая решения многих и разных вопросов: от подготовки генетических форумов до согласования тематики работы отдельных институтов, от постановки общесоюзных программ, до помощи в решении судьбы отдельных ученых. Сложность состояла в том, что работы и заботы концентрировались в Москве, а ДК был в Новосибирске. <...>

В 1969 г., т.е. через 5 лет после легализации генетики, в Академии наук было решено заслушать генетиков на заседании Президиума. Это была веха в ходе возрождения генетики в стране, от решения Президиума зависело дальнейшее развитие науки. Основной доклад «О состоянии и дальнейшем развитии генетики в СССР» был у председателя Проблемного совета члена-корреспондента АН Д.К.Беляева. <...> Председательствует президент Академии наук академик М.В.Келдыш. Предстоит обсудить планы, надежды и трудности. Свой доклад ДК начал с краткого обзора состояния генетики вообще в мире, успехов молекулярной генетики; он отметил, что стала развиваться генетика человека, и подчеркнул, что развитие молекулярной генетики — это одно из самых актуальных направлений мировой генетики. Интенсивно развиваются такие сулящие крупные практические успехи направления, как генетика растений и генетика животных. ДК рассказал, что удалось сделать нашим ученым-генетикам за истекшие 5 лет. Генетические исследования ведутся в 25 институтах Академии наук и в союзных республиках, почти в 40 институтах Министерства сельского хозяйства СССР, ВАСХНИЛ и некоторых университетах. Генетика растений — одно из самых развитых направлений, и в этой области отмечены успехи. Пока небольшое число лабораторий занято проблемами молекулярной генетики, успешно работают в немногих институтах с генетикой микроорганизмов. Генетико-селекционные работы по животным ведутся во многих отраслевых институтах, но разработкой теории генетики и селекции занимаются лишь две-три лаборатории (фотопериодизм). ДК отметил успешные разработки П.П.Лукьяненко, М.И.Хаджинова,



С Иосифом Абрамовичем Рапопортом.

С Михаилом Алексеевичем Лаврентьевым.

Б.Л.Астаурова, П.К.Шкварникова, В.В.Хвостовой, И.А.Рапопорта, В.В.Сахарова, А.Н.Луткова. «Общий баланс состояния генетики можно считать положительным, — говорил ДК, — учитывая теоретические и практические результаты за последние 5 лет. <...> Однако в силу понятных причин положение генетики в стране оставляет желать лучшего, — подчеркнул он, — учитывая потенциальные возможности и задачи, которые ей предстоит решить».

На кафедре величественного конференц-зала Академии наук сменяли друг друга ведущие генетики страны, выступали четко, ярко, смело. Генетике микроорганизмов посвятил свое выступление С.И.Алиханян. И.А.Рапопорт, получивший интересные результаты по химическому мутагенезу с выходом в практику, предложил создать условия для направлений исследований, где советскими генетиками могут быть сделаны новые открытия. Выступали Н.И.Шапиро, Я.Л.Глембоцкий, В.В.Хвостова, А.А.Прокофьева-Бельговская, А.А.Малиновский и др. Б.Л.Астауров подчеркнул: «То, что проделано нашей генетикой за последние годы, не только удовлетворительно, но даже поразительно при том составе кадров, которое мы имели к началу этого периода». Вопрос с кадрами стоял очень остро. «Ихтиозаврами» он назвал старшее поколение генетиков, их оставалось мало, наших легендарных ветеранов, и они были немолоды. Он опасался, что генетической науке грозит вымирание. Необходимо было срочно готовить кадры генетиков. К счастью, Борис Львович ошибался, вскоре в науку пришло новое талантливое молодое поколение, взращенное университетами и усилиями ветеранов генетики. Выступления членов президиума были в основном доброжелательные, очень хорошо отозвался об Институте цитологии и генетики академик М.М.Шемякин, который предложил институту не только развивать генетические исследования у себя, но и способствовать их развитию в других местах.

Подводя итоги, президент академик М.В.Келдыш поддержал предложения ДК и других генетиков, выступавших в прениях. Было принято постановление о материальном обеспечении главных направлений генетики, о подготовке кадров, о целевой аспирантуре, о повышении уровня преподавания генетики и о создании новых учебников. Это была окончательная победа генетики в стране. Доклад был напечатан в «Вестнике Академии наук». <...>

Неизменно ДК оказывался в центре всесоюзных и международных форумов генетиков. Особенно волнующим был 2-й съезд ВОГиС имени Н.И.Вавилова, проведенный в 1972 г. в Москве. Съезд воспринимался как триумф возрожденной науки: праздничная, дружеская и в то же время деловая обстановка. К этому времени были организованы отделения в некоторых союзных республиках, областях и городах. Генетики старшего поколения были уже не одиноки, много молодых ученых представили свои работы. <...> ИЦиГ был представлен в ряде симпозиальных и секционных докладов. Борис Львович Астауров выступил с блестящим докладом по истории и проблемам генетики и, конечно, остановился на наиболее близкой ему теме по биологии индивидуального развития. ДК подготовил доклад по дестабилизирующему отбору. <...>

Конгрессы и съезды, всесоюзные совещания, заседания президиума ВОГиС и Проблемного совета, собрания Сибирского отделения или президиума АН — он относился к этой работе очень серьезно, и на очередном научном форуме выступал по проблеме, которую считал наиболее важной в этот период. Так на IV съезде ВОГиС в 1982 г. в Кишиневе, когда обозначился ряд новых направлений в генетике и особенно остро встала проблема продовольствия, он в докладе «Проблемы развития генетики» постарался сконцентрировать внимание на главных задачах теоретической и прикладной генетики. Он подчеркнул, что в арсенале науки есть много способов решения этих задач: «Сама жизнь бросает вызов как генетической теории управления формообразованием организмов, так и практике всей нашей генетико-селекционной работы».

Еще острее Д.К.Беляев поставил вопрос о роли генетики в решении продовольственной программы в стране на специальной сессии Общего собрания АН СССР в декабре 1984 г. <...> Он подчеркнул важность роста производительности труда первичных сельхозколлективов, и что эта проблема требует внимания не только экономистов, но и социологов и даже специалистов в области социальной психологии. <...> Он говорил о необходимости развивать весь фронт генетики и комплекс общебиологических наук. <...>

ДК не жалел ни сил, ни времени на увековечение памяти классиков советской генетики, на популяризацию их идей и установление их вклада в науку. Это была многообразная деятельность: переиздание научных трудов, редактирование биографических справочников, статей и книг, консультирование научных кинофильмов. В те времена в условиях жесткой цензуры это была чрезвычайно трудная работа.

В 1980 г. под его редакцией вышел сборник биографических очерков «Выдающиеся советские генетики». В него были включены и биографии неоправданно репрессированных и подвергавшихся гонениям наших замечательных ученых Г.А.Левитского, Г.Д.Карпеченко, С.Г.Левита. Он активно содействовал восстановлению доброго имени «великого генетика, ботаника и биолога» Николая Ивановича Вавилова, рассказывая молодежи о мужестве, научном вкладе и огромном влиянии личности Николая Ивановича на многие поколения генетиков. <...> В комиссии по научному наследию он вместе с И.А.Рапопортом и С.Р.Микулинским способствовал изданию материалов, связанных с именем нашего гениального соотечественника, был ответственным редактором воспоминаний о Н.И.Вавилове Фатиха Хафизовича Бахтеева. Фильм «Звезда Вавилова» (автор С.С.Дяченко, научный консультант Д.К.Беляев) и телепередача П.М.Бородина «Собрание сочинений природы» с рассказом ДК о Николае Ивановиче Вавилове с большим удовлетворением были приняты генетической общественностью. Все это делалось до 1985 г. — переломного периода в нашей стране.

ДК всячески способствовал изданию трудов академика Б.Л.Астаурова и сам подготовил ряд статей и докладов, посвященных жизненному пути и научной деятельности этого талантливого ученого и замечательного человека. <...>

...Он принял на себя ответственность за генетику в стране и за всю биологию Сибири, понимал, что должен был ее нести, и нес многие годы.

С.В.Аргутинская,
жена Д.К.Беляева,
кандидат биологических наук,
сотрудник ИЦиГ с 1959 по 1981 г.

В начале ДК заведовал отделом генетики животных ИЦиГ, потом стал заместителем директора института, а с 1959 г., после драматического снятия первого директора Н.П.Дубинина, стал исполняющим обязанности директора института.

Момент был очень сложный. Известно, что после смерти И.В.Сталина его фаворит Т.Д.Лысенко попал на несколько лет под справедливое отторжение, биологическая наука вздохнула более свободно. Именно тогда, в 1957 г., Н.П.Дубинин по предложению академика М.А.Лаврентьева создал Институт цитологии и генетики СО АН СССР. Ехать в Сибирь собралась большая группа генетиков старшего поколения, вступивших в науку до войны и переживших разгром 1948 г. ИЦиГ казался убежищем от ограничений и репрессий. Первыми поехали Д.К.Беляев, Ю.Я.Керкис, З.С.Никоро, Н.А.Плохинский, И.Д.Романов, П.К.Шкварников, А.Н.Лутков, Ю.П.Мирюта, Д.Ф.Петров, Е.П.Раджабли и др. Позже — В.Б.Енкен, В.В.Хвостова, Р.Л.Берг, Р.П.Мартынова, Г.А.Стакан. Кроме того, потянулось новое поколение: Р.И.Салганик, О.И.Майстренко, Г.Ф.Привалов, И.И.Кикнадзе, Н.Б.Христолюбова, А.Д.Груздев,

Сотрудники ИЦиГ на территории будущего Академгородка, 1958 г. Слева направо: Н.А.Плохинский, Ю.Я.Керкис, Д.К.Беляев, Н.Б.Христолюбова, Ю.П.Мирюта.

С Владимиром Константиновичем Шумным (слева) и Рудольфом Иосифовичем Салгаником.

В.К.Шумный, позже — Л.И.Корочкин, Н.Н.Воронцов, В.А.Драгавцев и др. <...>

...Главный результат деятельности ДК состоял в том, что он спас наш институт. <...> Конечно, были различные сложности и разногласия, из института по разным причинам ушли Д.Ф.Петров, И.Д.Романов, Н.А.Плохинский, П.К.Шкварников, Ю.П.Мирюта, Р.Л.Берг и др. <...> Но в целом ДК проявил неоспоримые качества лидера. <...>

«Быстрота» становления ДК как лидера, по-моему, связана с некоторыми важными особенностями ситуации. Во-первых, конечно, он был лидер по натуре. Но главное, он был младшим среди старших генетиков. Старшее поколение генетиков, ученики Н.Л.Кольцова, С.С.Четверикова, А.С.Серебровского, Н.И.Вавилова и др., к этому времени были обескровлены и разобщены. Только в конце 1950-х годов возникли отдельные лаборатории, где они могли продолжить исследования. Многие были деморализованы 10-летним отрывом от науки. Так, Ю.Я.Керкис прибыл из таджикского совхоза, где работал директором, П.К.Шкварников был председателем колхоза в Крыму, а З.С.Никоро — баянистом Клуба моряков в Измаиле. Кроме того, ДК был младшим братом Николая Беляева — талантливого генетика, ученика Н.К.Кольцова, друга и соратника многих генетиков старшего поколения. Н.К.Беляев погиб в 1938 г. в сталинских лагерях. Друзья брата стали друзьями ДК. Его безоговорочно поддержали многие московские и ленинградские генетики. <...>

В 1972 г. ДК был избран академиком. <...> Довольно быстро он стал одной из ведущих фигур в Сибирском отделении и Отделении общей биологии АН СССР. В СО АН он стал заместителем председателя президиума. В эти годы он многое сделал для развития биологии в Сибири и генетики в стране.

В.А.Ратнер,
доктор биологических наук,
сотрудник ИЦиГ с 1960 г.

С заведующими лабораторий ИЦиГ в день 25-летия СО АН СССР, 1982 г. Слева направо: Б.Ф.Чадов, В.И.Молин, В.К.Шумный, Н.К.Попова, О.И.Майстренко, Е.Б.Будашкина, Е.В.Науменко, И.И.Кикнадзе, Л.Н.Иванова.

Ученый совет ИЦиГ отмечает 75-летие З.С.Никоро (сидит рядом с Д.К.Беляевым), 1979 г.

Пожалуй, два человека оказали сильное влияние на мое мировоззрение, в том числе и научное: Дмитрий Константинович Беляев и Юрий Петрович Мирюта. Первым опальным генетиком, с которым меня свела судьба в Новосибирске, был Юрий Петрович, бывший аспирант Н.И.Вавилова и первый заведующий лабораторией гетерозиса ИЦиГ, где я начинал свою научную работу по проблеме закрепления гетерозиса путем полиплоидизации. Кстати, зачислены в лабораторию гетерозиса мы были одним приказом с З.С.Никоро и первое время сидели за одним столом, я — с микроскопом, она — со счетной машинкой.

В.К.Шумный,
академик РАН,
директор ИЦиГ с 1986 по 2007 г.,
сотрудник с 1958 г.

Я впервые встретился с Д.К.Беляевым на студенческом семинаре по проблемам эволюции в Институте цитологии и генетики СО РАН в 1967 г. В работе этого семинара, который возглавлял Д.К.Беляев, участвовали студенты младших курсов биологического отделения факультета естественных наук НГУ. <...> Как-то раз в ходе обсуждения взглядов Ламарка Д.К.Беляев спросил: «Почему же не могут наследоваться приобретенные признаки?» К этому времени мы прослушали курсы Н.Б.Христолюбовой, И.И.Кикнадзе, Ю.Я.Керкиса. Поэтому несколько человек дали обстоятельные разъяснения этого вопроса. Затем выступила наша однокурсница и сказала, что вопрос о невозможности наследования приобретенных признаков очевиден и что «вообще, мы впитали этот взгляд с молоком матери». <...>

Обычно сдержанный Д.К.Беляев вспыхнул... и затем в течение двух часов... рассказывал нам о судьбе генетики, о Лысенко и об ученых — сотрудниках нашего института: Ю.Я.Керкисе, Н.А.Плохинском, З.С.Никоро, А.Н.Луткове, П.К.Шкварникове, Ю.Н.Мирюте, которые после августовской сессии ВАСХНИЛ 1948 г. были изгнаны из науки именно потому, что отвергали идею наследования приобретенных признаков.

Н.А.Колчанов,
доктор биологических наук,
директор ИЦиГ с 2007 г.,
сотрудник с 1971 г.

«Я верю в добрые начала человека...»

Интервью с Д.К.Беляевым*

Как вы думаете, чем будет отличаться мир начала XXI в. от нынешних дней? Что человечество приобретет за полтора десятилетия и с чем распрощается навсегда?

Хочется верить, что нашей планете к началу третьего тысячелетия удастся навсегда распроститься с угрозой самоуничтожения. Вы спросите: возможно ли такое, когда запасы накопленного на земле ядерного оружия настолько велики, а возможность воспользоваться даже непроизвольно настолько реальна, что третья мировая война, если она начнется, перерастет в глобальную катастрофу? И все же предотвратить самоуничтожение возможно, если все честные люди в оставшиеся годы XX в. направят свои усилия на то, чтобы с лица Земли навсегда исчезла тень атомной войны.

Если же говорить о научно-техническом прогрессе, то приметы будущих перемен видны уже сейчас.

В мирных условиях человек через полтора-два десятилетия детально изучит недра планеты, научится добывать сырье с больших глубин. Освоит околоземное космическое пространство, сможет длительное время жить и работать в условиях невесомости, создаст на орбите замкнутые экологические системы. Человек опояшет Землю скоростными магистралями, по которым будут курсировать «летящие» поезда.

Несомненны также будущие успехи в автоматизации, компьютеризации и электронизации всех сфер человеческой деятельности. Появятся ЭВМ пятого, а возможно, и шестого поколения. Это будут говорящие, думающие, самосовершенствующиеся машины. Получат широкое распространение персональные компьютеры, роботы, средства коммуникации.

Все это, верю, будет. Но каким будет сам человек, не берусь предсказать. Сделает ли эра технизации и роботизации человека более человечным? Вот вопрос.

И нет ли здесь опасности, что произойдут какие-то изменения в человеке на генетическом уровне?

Данные, которые получены в нашем институте, позволяют именно так ставить вопрос.

Когда усиливается психоэмоциональное воздействие, когда нарастает частота стрессовых ситуаций (а именно это мы наблюдаем в последнее время), происходят и перестройки на генетическом уровне. Ученые уже установили несомненную связь между защитными реакциями организма и наследственным аппаратом. То, что стрессы издавна являются спутниками человека, известно. Но то, что влияние их, а следовательно, и значение возросло, — это главное учитывается недостаточно.

Поэтому, чем дальше в будущее, тем больше нужно беречь психику человека. Многое зависит при этом от социального климата в обществе, от отношения людей друг к другу, от того, как будет выполнять общество свою воспитательную, гуманистическую функцию.

Хочется, чтобы в будущем, общаясь с компьютерами, человек не потерял связь с человеком.

Может ли к началу XXI в. появиться такое научное открытие, которое по своему значению можно было бы поставить в один ряд с законами Ньютона или теорией относительности Эйнштейна?

Почти невозможно планировать в науке сроки появления крупных открытий. Но все же, если говорить о генетике, то, по-моему, в обозримом будущем можно ожидать два события, имеющих большое значение для познания законов жизни. Первое — будут разработаны кардинальные методы лечения злокачественных опухолей.

Второе — будет искусственно синтезирована жизнь. Я имею в виду не воспроизведение клетки на генноинженерном уровне, а как бы повторение того уникального процесса, который начался когда-то в природе: вот еще не жизнь — а вот уже жизнь! Как она началась? По этому вопросу мы имеем пока лишь различные гипотезы.

Решение этих важнейших задач можно было бы приблизить — откажись мир от гонки вооружений. Ведь ежегодно на эти цели расходуется около 700 миллиардов долларов. Представим, что вам доверили распределить высвободившиеся средства. Куда бы вы их направили?

На земле голодают миллионы людей. Необходимо тщательно разрабатывать и в достаточной степе-

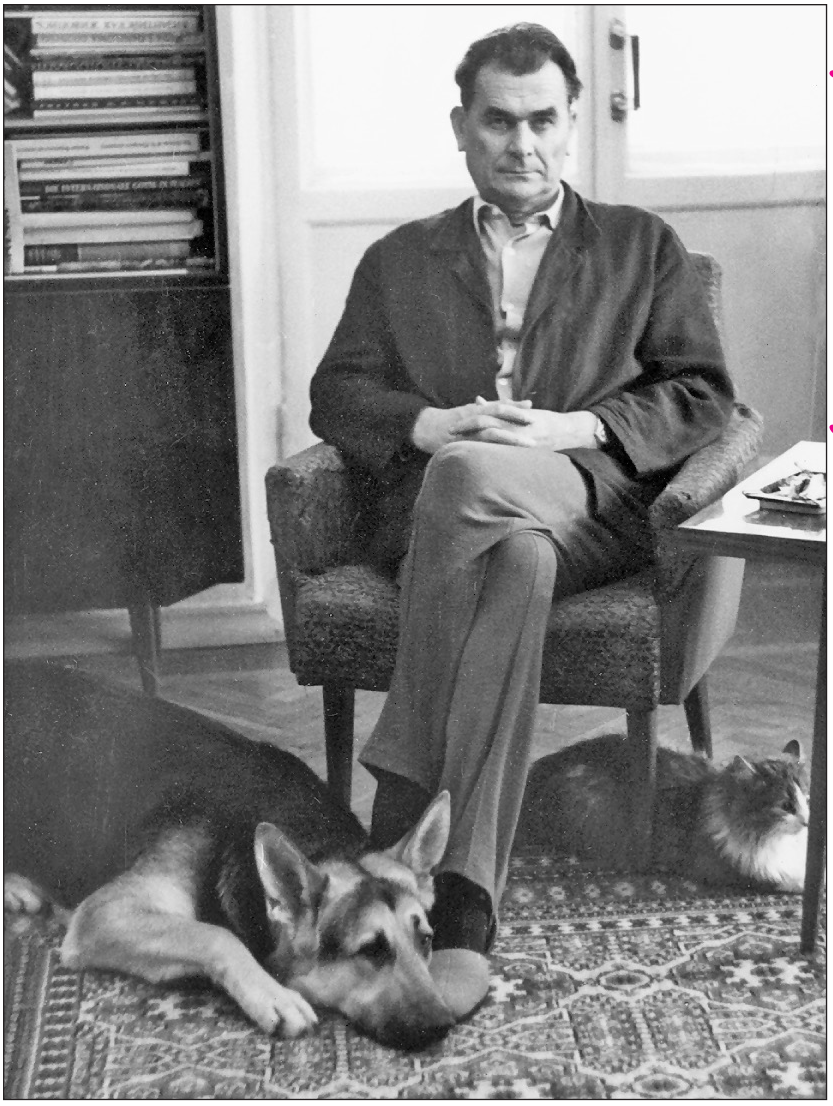
* Первая публикация: Вопросы философии. 1986. №4. С.93–94.

ни финансировать различные продовольственные программы, прежде всего в слаборазвитых странах. Необходимо расширять медицинские исследования и значительно улучшить медицинское обслуживание.

Особенно важным я считаю также пересмотр нашего отношения (в глобальном, конечно, масштабе) к вопросам воспитания и образования. Темпы социального прогресса в значительной мере зависят от того, какими будут новые поколения людей.

Характер человека, его главные устремления формируются в раннем детстве. И с самого рождения необходимо следить за развитием тех или иных наклонностей, находить и поддерживать добрые начала. Особое внимание нужно обращать на психоэмоциональное поведение. В воспитании и образовании должно быть меньше стандартных схем, всегда нужно помнить, что каждый человек индивидуален. И психически, и генетически.

Я еще раз подчеркиваю огромное значение трудовой, нравственной, идейной, общеобразовательной, психологической подготовки подрастающих поколений людей.



Дома, 1974 г. «Вечерами продолжались деловые беседы с сотрудниками, часто заглядывали на огонек друзья, общительный и открытый ДК иначе не представлял себе домашней жизни, которая была продолжением работы. Здесь, в неофициальной обстановке, обсуждали научные проблемы, решали организационные вопросы. После ухода гостей, друзей, коллег, поздним вечером он любил попить чайку со всей семьей "в спокойствии душевном", подвести итоги дня. Короткие это были моменты, но очень дорогие для нас всех» (из воспоминаний С.В.Аргутинской).

Многие деятели на Западе изображают науку как «ящик Пандоры», полный неисчислимых страданий и несчастий, имея в виду использование научных достижений в военных целях. А каково ваше мнение? И принесет ли наука когда-нибудь человечеству счастье?

Использование результатов научных исследований во имя добра или зла — это вопрос социальной зрелости общества.

И все же, если говорить о прошлом и настоящем, то ясно, что наука принесла человечеству больше пользы, чем зла. Все, чего достигла современная цивилизация, — полеты в космос, компьютеры, авиация, победы над многими болезнями, уносившими ранее миллионы жизней, и многое другое — это результат применения научных знаний. Но в этом же ряду и порох, и военная техника, и атомная бомба, и страшная перспектива ядерной войны.

Мнение всех советских людей — от рабочего, ученого до политического деятеля: наука должна служить миру.

Что бы вы хотели пожелать человеку XXI в.?

Быть добрым, т.е. социально ответственным, стремиться к взаимопониманию со всеми людьми, жить в мире. Нести подлинную ответственность за «братьев наших меньших» — весь живой мир планеты Земля. Не забывать, что человек — часть природы и должен жить с ней в единстве, изучая и постигая законы ее развития и ставя их себе на службу.■

Новости науки

Энергетика. Экология

Как обезопасить население от воздействия ^{14}C?

Одна из ключевых проблем, от решения которой в значительной степени зависит развитие ядерной энергетики, — сокращение радиоактивных отходов на всех этапах топливного цикла. Сегодня в атомной отрасли реализован открытый топливный цикл, при котором отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) рассматривается исключительно как отходы. Несколько лет назад Госкорпорация «Росатом» предложила энергетический проект «Прорыв», предусматривающий создание технологий нового поколения на базе замкнутого топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах. Строительство опытно-демонстрационного энергокомплекса с таким реактором, получившим название «Брест-ОД-300», уже идет на площадке Сибирского химического комбината (г.Северск Томской обл.).

Результаты наших экспериментальных работ указывают на возможность так называемого радиационно-эквивалентного обращения ядерных материалов в замкнутом топливном цикле*. Оно подразумевает переработку (выжигание) в быстрых реакторах биологически опасных компонентов ОЯТ — минорных актиноидов (U, Pu, Am, Np, Cm) и долгоживущих продуктов деления (Tc, I) — и получение для хранения, как мы говорим, более «дружественного» к биосфере состава радионуклидов. Перед окончательной изоляцией в глубинных геологических формациях высокоактивные отходы выдерживают в контролируемых хранилищах в течение 150–300 лет, что снижает их биологическую опасность примерно в 100 раз. Таким образом, в условиях замкнутого топливного цикла природный радиационный баланс Земли не нарушается.

Однако есть еще один радиоэкологический аспект, связанный с применением в реакторах на быстрых нейтронах смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. Его использование ведет к образованию ^{14}C по реакции ^{14}N (n, p) ^{14}C. Общее количество радиоуглерода, наработанного на 1 т топлива, составляет 274 г. Если пересчитать на 20 т ядерного горючего, то в год будет производиться 1.37 кг ^{14}C, что сопоставимо с годовым поступлением ^{14}C в атмосферу Земли за счет его образования от космического излучения. Экологическая опасность возникает в случае выброса этого радионуклида в газовой фазе, в основном в виде диоксида углерода. При постоянном выбросе его воздействие на человека происходит главным образом перорально. При фотосинтезе он поступает в растения и далее в растениеводческую и животноводческую продукцию.

Расчеты показывают, что равновесная концентрация ^{14}C в атмосферном воздухе, приводящая к формированию годовой дозы 1 мЗв, составляет 3.2 Бк/м^3. Допустимый годовой выброс, формирующий дозу 10 мкЗв/год на границе санитарно-защитной зоны, равен 2.4 г. Консервативность расчетов можно значительно уменьшить, учитывая характеристику территории, прилегающей к модулю переработки ОЯТ, например особенностей производства и потребления местной пищевой продукции.

Что касается опытно-демонстрационного энергокомплекса, строящегося в Томской области, то основные сельскохозяйственные угодья расположены примерно в 8 км от него. Кроме того, в соответствии с технологиями ведения сельского хозяйства производство основной пищевой продукции (молока и мяса) объединяется, в том числе за счет выпаса животных на больших площадях. В этой ситуации консервативность расчетов правомерно уменьшить за счет рассеяния газовой струи до границы сельскохозяйственных предприятий. Это допускают нормативные документы Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Наши оценки показывают, что отношение функции рассеяния газовой струи, рассчитанной в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, к максимальному значению на границе 8 км составляет 0.043. По уточненным данным допустимый выброс составит 2.4/0.043 = 55 г. Точность методики Пасквилла—Гиффода, принятой в МАГАТЭ для описания процессов рассеивания примесей в атмосфере, по которой проводился этот расчет, оценивается в ±50% от среднего значения. Отсюда следует, что с поправкой на ошибку годовой выброс 22.5 г ^{14}C не превысит дозу 10 мкЗв в год для

* *Алексахин Р.М., Спирин Е.В., Соломатин В.М., Спиридонов С.И.* Некоторые экологические аспекты сооружения опытно-демонстрационного энергокомплекса в проекте «Прорыв» / Атомная энергия. 2016. Т.120. Вып.6. С.312–318.

населения. При ежегодной переработке 5 т отработавшего топлива технически реализуемая десятикратная очистка газовой фазы ^{14}C обеспечивает годовую дозу, не превышающую 10 мкЗв.

Таким образом, использование в быстром реакторе нитридного топлива требует применения специальных технологий, которые будут направлены на предотвращение выброса ^{14}C в газовой фазе выше допустимых пределов при переработке ОЯТ, а также на перевод твердой фазы в виде фуллереновой сажи в нерастворимое состояние при окончательном захоронении отходов.

© академик **Р.М.Алексахин**
Е.В.Спирин,
доктор биологических наук
В.М.Соломатин,
кандидат биологических наук
Инновационно-технологический центр
проекта «Прорыв»
Москва

Плазмохимия

Новый экологически чистый способ производства олигосахаридов

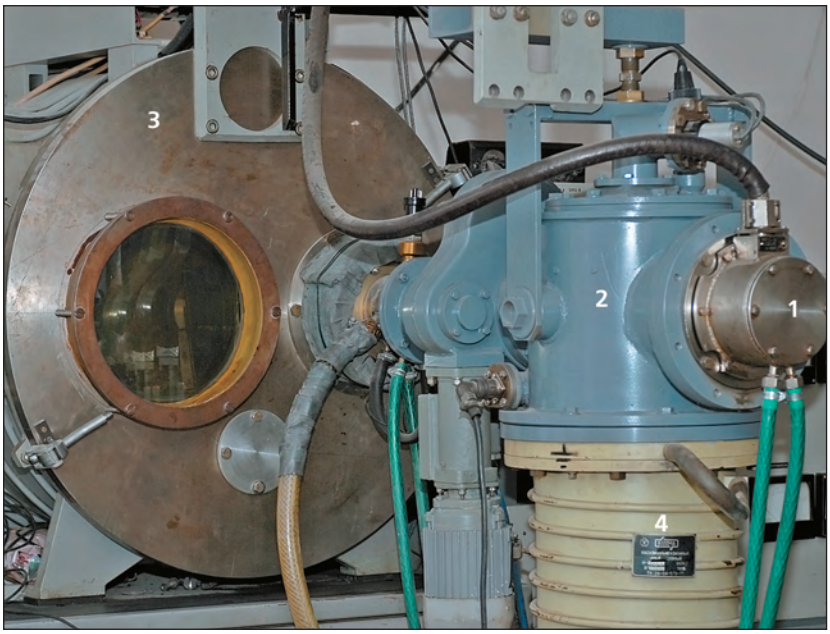
Хитин, второй по распространенности биополимер после целлюлозы, и его деацетилированное производное — хитозан, входящие в наружную оболочку членистоногих, тканей большинства грибов и некоторых водорослей, были открыты примерно 200 лет назад. Однако широкую популярность они приобрели в последние десятилетия. Сегодня известно более 70 направлений применения хитина и хитозана, что связано с уникальными свойствами этих полисахаридов: их высокой биосовместимостью с тканями живых организмов, отсутствием признаков токсичности, а также со способностью к биодеградации и комплексообразованию.

К наиболее перспективным производным хитина и хитозана относят низкомолекулярные водорастворимые олигосахариды, которые обладают антибактериальной и фунгицидной активностью и могут применяться в качестве фитопротекторов и стимуляторов роста растений. Традиционно для получения олигосахаридов исходное сырье подвергают для деполимеризации химическому гидролизу, протекающему при повышенной температуре. При этом используют перекись водорода, концентрированные растворы кислот, гидроокиси натрия и другие агрессивные вещества. В ходе такой обработки образуется большое количество слабокислых и слабощелочных сточных вод и разнообразных отходов. Кроме того, химический гидролиз требует больших временны́х затрат и может длиться несколько суток.

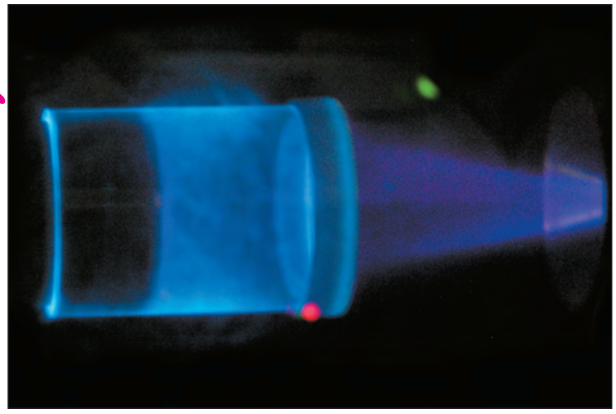
Группа ученых Московского физико-технического института (МФТИ), в которую входит автор статьи, при участии коллег из Федерального исследовательского центра «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН и Северного Арктического федерального университета разработала принципиально новый экологически чистый способ производства низкомолекулярных производных хитина и хитозана в электронно-пучковой плазме*, защищенный российским патентом**.

Мы использовали для деполимеризации хитина и хитозана сильно неравновесную низкотемпературную электронно-пучковую плазму, которая генерируется при инжекции в плотные плазмообразующие среды непрерывного дорелятивистского электронного пучка. Такой пучок нам удалось получить в условиях глубокого вакуума при помощи электронной пушки, входящей в узловую часть электронно-пучкового плазмохимического реактора, специально сконструированного нами для плазмохимической модификации биополимеров. Поскольку плазмообразующий газ находится в ре-

* *Vasilieva T., Sigarev A., Kosyakov D. et al.* Formation of low molecular weight oligomers from chitin and chitosan stimulated by plasma-assisted processes // Carbohydrate Polymers. 2017. V.163. P.54–61.
** Патент №2595162 Российской Федерации от 2 августа 2016 г.



Общий вид электронно-пучкового плазмохимического реактора: 1 — электронная пушка, 2 — высоковакуумная камера, 3 — реакционная камера, 4 — высоковакуумный насос.



Деполимеризация хитозана в электронно-пучковой плазме, генерируемой внутри кварцевого перемешивающего устройства.

акционной камере под определенным давлением, для проводки пучка мы использовали газодинамическое выводное окно, за разработку которого сотрудники МФТИ в свое время получили премию Ленинского комсомола. В принципе реакционная камера установки может быть заполнена различными плазмообразующими средами, однако для получения олигосахаридов хитина и хитозана наилучшими оказались кислород и пары воды.

При прохождении электронного пучка через газ происходит ионизация, возбуждение и диссоциация его молекул, вследствие чего нарабатываются радикалы и другие химически активные частицы в сверхвысоких концентрациях, которых в обычных равновесных условиях достичь невозможно. Если ввести в плазму порошок хитина или хитозана, то под действием электронного пучка в частицах этих веществ будут инициированы необходимые превращения биомолекул. При этом температура частиц порошка во время обработки остается на уровне комнатной, что позволяет исключить термическую деструкцию полисахаридов и преодолеть одну из главных проблем химического гидролиза — необходимость проведения процесса при высокой температуре.

Предложенные нами технические решения дают возможность контролировать энерговыделение в реакционном объеме, обеспечивать его устойчивость и добиваться полной воспроизводимости результатов в ходе пучково-плазменной обработки веществ. При этом удалось получить олигосахариды хитина и хитозана с молекулярной массой 800–2000 кДа, полностью растворимые в воде. Посредством оптимизации режимов пучково-плазменного воздействия необходимая степень деполимеризации исходных веществ была достигнута всего за несколько минут обработки, а выход водорастворимых низкомолекулярных продуктов составил 85–90%.

В тестах *in vitro* для определения биологической активности полученных олигосахаридов обнаружено, что хитин и хитозан полностью подавляют размножение стафилококка, кишечной палочки и рост ряда нитевидных грибов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-05724_а).

© Т.М.Васильева,
доктор технических наук
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Геология

Древняя карбонатитовая провинция на Алданском щите

Вопрос о геологической природе магнетит-апатит-доломитовых руд* Селигдарского месторождения (Центральный Алдан, Южная Якутия) — весьма сложный и дискуссионный. В конце 1980-х годов существовало несколько гипотез их происхождения, две из них — наиболее обоснованные и устоявшиеся: осадочно-метаморфогенная (В.И.Егин и др., 1973, 1975; А.Г.Булах, 1984) и апобазитовая (Г.Ю.Боярко, 1983). Идею о карбонатитовой природе селигдарских руд впервые выдвинул в 1976 г. Ф.Л.Смирнов с коллегами. В 1980-х годах она нашла развитие в работах А.Р.Энтина, А.И.Зайцева и др. Однако полученные авторами изотопно-геохимические данные вступили в серьезные противоречия с их карбонатитовой гипотезой. Первичные (т.е. сложившиеся во время образования пород) изотопные отношения стронция и изотопный состав углерода в рудах месторождения имеют значения, близкие к составу известняков. Именно по этой причине карбонатитовая точка зрения не нашла в то время поддержки среди специалистов щелочного магматизма. Да и сами авторы в публикации 1987 г., а затем в монографиях высказались в пользу полигенетической природы формирования магнетит-апатит-доломитовых руд на Алданском щите: коровый источник — для руд Селигдара и мантийно-коровый — для руд Усть-Чульманского проявления.

На сегодняшний день руды Селигдарского месторождения однозначно отнесены к карбонатитовому типу. Данные в пользу этой версии представлены в статье, опубликованной недавно в журнале Ore Geology Reviews**. Согласно детальным термобарогеохимическим исследованиям, руды месторождения образовались из флюидонасыщенного карбонатитового расплава доломитового состава с примесью (1–10 масс.%) солевого (сульфаты, хлориты и фториды Na и K)

* Магнетит — $FeFe_2O_4$, апатит — $Ca5[PO_4]_3(F,Cl,OH)$, доломит — $CaMg(CO_3)_2$.

** *Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A.* Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // Ore Geology Reviews. 2017. V.81. P.296–308.

Расположение Селигдарского месторождения в пределах Нимнырской апатитоносной зоны (по данным А.Р.Энтина и О.А.Тяна, 1984).

и алюмосиликатного компонентов. Минералогические исследования показали наличие в них монацита — фосфата редкоземельных элементов (La, Ce, Nd и др.). Апатит на месторождении содержит примесь (до 1 масс.%) легких лантаноидов (LREE). В результате интенсивных гидротермальных процессов происходило перераспределение редкоземельных элементов с высвобождением их из апатита и последующим формированием двух разновидностей монацитов: по краям и в трещинах кристаллов апатита, а также обособленно — в доломитовой матрице пород. Эта информация важна для оценки технологических свойств руд, поскольку ранее считали, что редкоземельные элементы сконцентрированы только в апатите. Предыдущие оценки возраста руд Селигдарского месторождения, выполненные K–Ar- и Pb–Pb-методом, давали широкий диапазон значений — от 2100 до 1490 млн лет. По результатам наших исследований, в ходе которых применялся U–Pb-метод датирования циркона из пород Селигдарского месторождения, установлено, что возраст руд составляет 1880±13 млн лет.

Геологи из государственного предприятия «Якутскгеология» обнаружили в пределах Нимнырской структурно-металлогенической зоны Алданского щита несколько апатитовых рудопроявлений селигдарского типа. Эта зона тянется с севера на юг на 400–500 км.

Изучение апатитовых рудных полей с использованием современных методов анализа открывает перспективы для исследования глубинных мантийных процессов в древних магнезиальных карбонатитах на Алданском щите, а также имеет, на наш взгляд, прикладной характер, связанный с выявлением новых редкоземельных объектов карбонатитового типа в данном регионе Якутии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 15-17-20036).

© И.Р.Прокопьев,
кандидат геолого-минералогических наук
Институт геологии и минералогии имени В.С.Соболева СО РАН
Новосибирск

Геология

Желтые алмазы из северных регионов Якутии

Природные алмазы, сохраняющие уникальную информацию о составе, строении и эволюции глубинных зон нашей планеты, давно стали объектом интенсивных научных исследований. На поверхность их выносят специфические кимберлитовые магмы, сформированные на большой глубине. В России месторождения этих минералов, составляющие основу алмазодобывающей промышленности нашей страны, расположены в Республике Саха (Якутия). На севере региона открыты богатые алмазоносные россыпи, коренной

Алмазы второй минералогической разновидности из россыпей Якутии.

источник которых, несмотря на большой объем проведенных геологоразведочных работ, до сих пор не известен. Специфика россыпей обусловлена необычной минеральной ассоциацией алмазов. И это позволяет предположить, что по условиям образования глубинного источника они отличаются от алмазов из большинства промышленных кимберлитовых месторождений Якутии.

Необычные алмазы представляют собой кристаллы кубической формы ярко-желтого цвета, относящиеся по классификации известного советского минералога Ю.Орлова ко второй разновидности этого минерала. Желтая окраска обусловлена присутствием в составе алмаза неагрегированных азотных дефектов, свидетельствующих о том, что перед выносом с больших глубин на поверхность минералы находились в мантии в специфических условиях охлаждения, причем очень короткий по геологическим масштабам промежуток времени. Такие образцы редко встречаются в коренных кимберлитовых месторождениях, но довольно часто — в богатых алмазами русловых отложениях северных рек.

До сих пор мы имели весьма ограниченные сведения по алмазам второй разновидности. Но теперь благодаря новым минералогическим и геохимическим данным, опубликованным в журнале Lithos, на основе которых был сделан анализ особенности образования необычных желтых алмазов, знаем о них больше*. В работе описаны результаты исследования представительной коллекции желтых алмазов второй минералогической разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы. Показано, что такие алмазы характеризуются специфическим набором дефектно-примесных центров (C, N3, H3, S1, NV и NV^-) и облегченным изотопным составом углерода ($\delta^{13}C$ от −6.1 до −20.2‰). В этих кристаллах также обнаружены включения моносульфидного твердого раствора на основе пирротина с низкими концентрациями Ni и Co, которые указывают на эклогитовый** парагенезис изученных алмазов. Таким образом, был сделан вывод, что эти алмазы предположительно кристаллизовались из остатков органического вещества биогенного происхождения, изначально находившегося на поверхности нашей планеты в составе древней океанической плиты. После столкновения с континентом она погрузилась на большую (150–200 км) глубину, где при высоких температурах и давлениях и образовались алмазы. Процессы погружения вещества, очевидно, происходили на протяжении многих миллионов лет длительной геологической истории нашей планеты. На это указывает облегченный изотопный состав углерода алмазов, а также геохимия изотопов стабильных элементов в минеральных включениях.

В настоящее время мы рассматриваем и другие геохимические индикаторы алмазообразующих процессов. Кроме того, будем уточнять параметры условий формирования природных минералов, чтобы детально определить специфические процессы, которые привели к возникновению необычных желтых алмазов на севере Якутии.

© Д.А.Зедгенизов,
доктор геолого-минералогических наук
Институт геологии и минералогии
имени В.С.Соболева СО РАН
Новосибирский государственный университет
г. Новосибирск

* *Zedgenizov D.A., Kalinina V.V., Reutsky V.N. et al.* Regular cuboid diamonds from placers on the northeastern Siberian platform // Lithos. 2016. V.265. P.125—137. Doi:10.1016/j.lithos.2016.04.012/.

** Эклогит — глубинная метаморфическая или магматическая горная порода. — *Примеч. ред.*

Геология Северной Евразии

В.Н.Комаров,
кандидат геолого-минералогических наук
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе
Москва

Книга известного геолога В.Б.Караулова, профессора Российского государственного геологоразведочного университета, посвящена описанию геологического строения России и ближнего зарубежья (Северной Евразии) в границах бывшего Советского Союза.

В предисловии отмечено, что учебный курс «Региональная геология» — неотъемлемая и очень важная часть подготовки специалистов геологического профиля. Знания, полученные при работе над усвоением этого курса, служат основой, пользуясь которой можно сознательно и грамотно решать специальные вопросы оценки территорий на различные виды полезных ископаемых, анализа гидрогеологических и инженерно-геологических особенностей различных объектов, интерпретации геофизических материалов. Объектом, изучаемым в курсе региональной геологии, остается Россия и ближнее зарубежье. Сокращение исследуемой территории до площади России в ее современных пределах нецелесообразно. Прежде всего, это привело бы к «обрезанию» естественных границ таких крупнейших структур, как Восточно-Европейская древняя платформа и Урало-Монгольский складчатый пояс, и к невозможности объяснить общие особенности их строения. На территории Северной Евразии сосредоточено почти все разнообразие известных структур материковой земной коры, что расширяет кругозор и подготавливает к работе в разных геологических условиях. Данное пособие, как подчеркивает автор, не заменяет существующие учебники по региональной геологии. Оно не содержит всех подробных сведений о стратиграфических разрезах, магматических комплексах, тектонических структурах и полезных ископаемых рассматриваемых территорий, однако позволяет составить о них общее представление, систематизировать фактический материал и сделать его более наглядным. Следует отметить, что в пособие включены новые актуальные данные о строении регионов Российской Арктики.

Описание каждого тектонического региона иллюстрируется многочисленными (в книге приведено 115 рисунков) фрагментами физико-географических, а также геологических и тектонических карт, геологическими разрезами, схемами и другими графическими материалами (в значительной мере оригинальными), которые облегчают понимание геологического строения территорий.

Во введении подчеркивается, что региональная геология — сложная дисциплина, занимающаяся обобщением данных о строении и истории развития конкретных областей и использованием этих сведений для решения практических вопросов природопользования. В связи с этим дана подробная информация о фактических данных, знание которых необходимо для понимания и усвоения изложенного материала. Приведена подробная стратиграфическая шкала докембрия и фанерозоя.

В разделе «Краткие сведения об истории изучения геологии России и смежных регионов» проанализирована история вопроса. До-

В.Б.Караулов. ВВЕДЕНИЕ В РЕГИОНАЛЬНУЮ ГЕОЛОГИЮ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ.

М.: ГЕОС, 2017. 173 с.

© Комаров В.Н., 2017

бротный фактический материал, касающийся строения большинства регионов России и ближнего зарубежья, стареет медленно. Изучающим региональную геологию следует опираться на сведения, которые содержатся в обобщающих работах второй половины прошлого века. Для получения новых данных необходимо регулярно следить за статьями, которые появляются в современных геологических журналах.

Раздел «Тектоническое районирование земной коры» предваряется замечанием о том, что исследование региональной геологии начинается с тектонического районирования. Под этим подразумевается разделение земной коры на регионы, которые обладают определенным внутренним единством и отличаются от смежных по каким-то важным признакам. Подобные регионы можно, в свою очередь, разделить на более мелкие, различающиеся по менее существенным особенностям. Таким образом, процесс районирования — многоступенчатый, а сами регионы — многоранговые. В разделе рассмотрено строение земной коры и представлены подробные сведения о современном тектоническом районировании материков. Обобщены данные о структурных этажах и методике изучения разнотипных тектонических структурных элементов древних платформ и подвижных поясов. Показано тектоническое районирование, в соответствии с которым построено дальнейшее изложение материала. Выделены Восточно-Европейская и Сибирская древние платформы (кратоны), разделяющие их или примыкающие к ним части складчатых поясов: Урало-Монгольского, Средиземноморского, Тихоокеанского и Арктического.

Содержание третьей части книги — «Древние платформы» — отражает представления о крупных блоках континентальной земной коры, обладающих архейско-нижнепротерозойским складчатым (кристаллическим) фундаментом и осадочным чехлом, который образован верхнепротерозойскими и фанерозойскими отложениями. Это наиболее устойчивые и относительно малоподвижные глыбы в составе материков. Подробно освещены слагающие каждый регион геологические формации, образованные ими тектонические структуры и связанные с ними полезные ископаемые.

Заключительный, самый большой раздел книги — «Складчатые (подвижные) пояса». Возникнув в рифее, они подверглись длительной и сложной эволюции. Характерная ее черта — постепенное сокращение площади поясов, развивавшихся в условиях геосинклинального тектонического режима; превращение геосинклинальных областей в складчатые и причленение их к обрамляющим структурам с более древней континентальной земной корой. Этот процесс не был строго линейным и однонаправленным. Тектоническая периодичность выражалась в многократном чередовании эпох, в которых преобладали растяжения и сжатия коры. Нередко ранее консолидированные области подвергались деструкции и вновь вовлекались в геосинклинальный процесс. Рано или поздно геосинклинальный режим сменялся орогенным. Затем на месте подвижных поясов или их значительных по площади участков возникали молодые платформы. Почти повсеместно эта стройная картина нарушалась неогеново-четвертичным эпиплатформенным орогенезом. И только в Тихоокеанском поясе до сегодняшнего дня сохранились линейные зоны высокой подвижности земной коры, рассматриваемые как современные геосинклинальные области.

В заключении на основе анализа геологического строения и эволюции древних платформ и складчатых поясов Северной Евразии сделан вывод о том, что возникновение этих главных типов структур континентов произошло одновременно в начале рифея, в результате деструкции архейско-нижнепротерозойской консолидированной коры. Крупнейшие, сравнительно слабо переработанные блоки сохранились в виде древних платформ, а интенсивно переработанные участки между ними сформировали сложнопостроенные подвижные пояса, в пределах которых остатки архейско-нижнепротерозойского основания сохранились в срединных массивах и в более мелких образованиях в антиклинорных зонах. Границы между древними платформами и подвижными поясами не оставались постоянными, а изменялись путем переработки краевых участков кратонов и включения их в состав подвижных поясов. При последующей эволюции древние платформы и складчатые пояса испытывали процессы растяжения, сопровождавшегося рифтогенезом и формированием прогибов разного типа. Растяжение чередовалось со сжатием и вздыманием, приводившими к возникновению надвигов, тектонических покровов и систем линейных складок. Сравнение одновозрастных формаций и структур в разных областях показывает, что данные процессы происходили там почти одновременно. Это выражается в общей для платформ и складчатых областей тектонической периодичности. Размах вертикальных движений, приводивших к формированию осадочных бассейнов разного рода, определяется мощностью накопившихся осадков, а масштаб горизонтальных движений блоков земной коры (как показывают реконструкции) мог достигать нескольких десятков километров на древних платформах и сотен километров в подвижных поясах. Древние платформы обладают общими чертами строения и развития (возрастом фундамента, характером формаций и особенностями их залегания), позволяющими относить их к единой категории тектонических структур. В то же время в строении Восточно-Европейской и Сибирской платформ есть много существенных различий. На протяжении всей геологической истории Сибирская платформа оставалась тектонически бо-

лее активной, что проявилось, в частности, в особенностях магматизма, характере деформаций и даже в современном рельефе.

Складчатые пояса Северной Евразии также обладают общими чертами (высокой тектонической активностью, резкой дифференцированностью, как правило, интенсивным магматизмом, специфическими геологическими формациями). Но каждый из них имеет и свои собственные особенности и не похож на другие. Так Тихоокеанский пояс относится к окраинно-материковым (граничит с впадиной Тихого океана) и обладает асимметричным в поперечном направлении строением с омоложением складчатых структур в сторону океана, а все другие пояса считаются внутриматериковыми или межматериковыми. Симметричное строение с наращиванием возраста складчатых областей от осевой части к окраинам особенно ярко проявлено в Урало-Монгольском поясе.

Как отмечает автор книги, данное пособие позволяет получить лишь самые общие представления о строении и истории развития древних платформ и подвижных поясов Северной Евразии. Оно и названо «Введением в региональную геологию...». Для приобретения более полных знаний о геологии регионов необходимо получать данные о конкретных разрезах чехла платформ и геосинклинальных комплексов, об их мощностях и изменчивости, о палеонтологических остатках, позволяющих устанавливать и уточнять их относительный возраст, о магматических формациях и месторождениях полезных ископаемых, пространственно и генетически связанных с теми или иными комплексами. Эти сведения, как уже говорилось, можно почерпнуть в ранее опубликованных «больших» учебниках и в научной периодике.

Книга В.Б.Караулова написана в самых лучших традициях русской геологической школы. Огромный опыт полевой, аналитической и педагогической работы позволил автору создать четко структурированный, емкий по содержанию труд, в котором материал изложен очень доступно для понимания. Отдельно хотелось бы отметить отличное полиграфическое качество издания.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия по региональной геологии России и ближнего зарубежья. Она будет полезна студентам вузов и техникумов, аспирантам, геологам-практикам и всем интересующимся естественными науками читателям, желающим расширить и укрепить свои познания о геологическом строении Северной Евразии. ■

Астрономия

М.Я.Маров. КОСМОС. ОТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ВГЛУБЬ ВСЕЛЕННОЙ. М.: Физматлит, 2016. 532с.

Систематизированы и обобщены результаты космических исследований, накопленные со времени запуска первого искусственного спутника Земли. Сделано это в доступной форме, но при соблюдении настоящего научного подхода к подаче материала. 11 глав книги можно объединить в три части. В первой (главы 1–5) представлена информация о Солнечной системе. Характеризуются свойства планет земной группы, их внутреннее строение и атмосфера, сопоставляются истории их формирования. Рассказывается о планетах-гигантах, их внутреннем строении, атмосферных циркуляциях и физических условиях на их многочисленных спутниках. Глава, посвященная Солнцу, завершает первую часть книги. Во второй (главы 6–9) рассмотрены проблемы физики звезд, их рождения и эволюции, а также поздних и заключительных стадий звездной жизни (гиганты, сверхгиганты, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры). Уделено внимание открытию экзопланет, которые по массе и размерам подобны Земле и расположены в пределах так называемой зоны обитания. Завершает вторую часть глава, посвященная проблемам астробиологии, зарождению и развитию жизни. В третьей части (главы 10 и 11) приведены данные о Вселенной, описаны ее структурные элементы (галактики, скопления галактик, сверхскопления, темная материя) и их взаимодействия. Рассказывается о проблемах космологии — о разбегании галактик, о Большом взрыве, о реликтовом излучении, о темной энергии, об ускоренном расширении Вселенной.

Палеонтология

С.В.Наугольных. ПАЛЕОНТОЛОГИЯ КРАСНОУФИМСКА. М.: Медиа-Гранд, 2016. 72 с.

Именно в предгорьях Урала, в окрестностях г.Красноуфимска, в начале XX в. были сделаны первые важные шаги в изучении пермского периода палеозойской эры. В Красноуфимском р-не Свердловской обл. расположены интереснейшие геологические объекты, которые содержат богатые и разнообразные комплексы ископаемых остатков вымерших организмов. В книге подробно рассмотрены следующие разрезы: Соболевский карьер, Красноуфимские Ключики, Атамановская гора, Рахмангулово, Александровское, Зюрзя и Гониатитовый овраг. Для каждого разреза приведены сведения о его географическом положении и стратиграфической характеристике, а также о составе встречающихся в нем представителей ископаемой фауны и флоры. Рассказано об условиях существования древних организмов, живших на данной территории в раннепермсую эпоху. Читателям будут интересны три палеонтологических эссе, посвященные пермской акулоподобной рыбе геликоприону, имевшей необыкновенную симфизную зубную спираль, псигмофиллуму — предку реликтового растения гинкго и уфадендрону — раннепермскому плауновидному растению, у которого на коре были веретеновидные листовые подушки с длинными, слегка изогнутыми шлейфами. Книга богато иллюстрирована как фотографиями, так и рисунками окаменелостей и выполненными автором реконструкциями вымерших организмов.

ПРИРОДА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук

Издатель: ФГУП «Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Адрес редакции: 117997,
Москва, ул.Профсоюзная, 90 (к.417)
Тел.: (495) 276-70-36 (доб. 4171, 4172)
E-mail: priroda@naukaran.com

Подписано в печать 23.05.2017
Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Цифровая печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 295 экз.
Заказ 487
Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Издательство «Наука»,
(типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., 6

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Научные редакторы
М.Б.БУРЗИН
Т.С.КЛЮВИТКИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
М.Е.ХАЛИЗЕВА
О.И.ШУТОВА
А.О.ЯКИМЕНКО

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод
А.О.ЯКИМЕНКО

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

www.ras.ru/publishing/nature.aspx; www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/
При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

ПРИРОДА
7 17

в следующем номере

Жителям Европы и Северной Америки трудно себе представить, что всего 200–14 тыс. лет назад (с геологической точки зрения — совсем недавно) мощные ледниковые щиты, подобные антарктическим, неоднократно покрывали огромные территории. Отдельные лопасти ледниковых покровов спускались в Восточной Европе до 49° с.ш., а в Северной Америке до 38° с.ш. На месте Москвы или Чикаго располагались ледники толщиной до 1–3 км. Неудивительно, что в середине XIX в. открытие следов этих оледенений, относившихся к позднечетвертичной эпохе и ко времени появления современного человека, стало большой научной сенсацией. Во второй половине XIX в., в XX и XXI вв. были обнаружены следы существенно более древних оледенений: позднепалеозойских (ныне датированных в интервале 300–250 млн лет назад), докембрийских (750–550 и 2400–2200 млн лет назад), а затем и самых древних — позднеархейских (около 2900 млн лет назад). Причины, характер и последствия оледенений ныне стали популярным предметом научных дискуссий и прогнозов.

Н.М.Чумаков. ОЛЕДЕНЕНИЯ ЗЕМЛИ

Индекс 70707

ISSN 0032-874X. ПРИРОДА. 2017. №6. 1–96