

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

12 18



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.Батулин**, 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. Koopin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Ленин**, 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.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Разнообразие агроклиматических условий Монголии предполагает разведение домашних животных с определенными генофондами.

См. в номере: **Ю.А.Столповский, Ю.Я.Якель. Монгольские заметки, или В стране древней животноводческой культуры.**

Фото Д.В.Щепоткина

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Жизнестойкая береза в песчаной степи о.Ольхон.

См. в номере: **Л.Н.Касьянова, А.М.Мазукабзов. Береза в ольхонской степи.**

Фото авторов

В НОМЕРЕ:**3 Интервью с А.В.Кукековой****Новые перспективы «лисьей модели» в изучении генетики поведения**

Решение ряда фундаментальных и прикладных задач биологии и медицины связано с выявлением генов, отвечающих за поведение млекопитающих. Одно из важнейших направлений этой работы — изучение синдрома доместикации. Популяции ручных и агрессивных лисиц, выведенные в Институте цитологии и генетики СО РАН и исследуемые международной научной группой, стали уникальной моделью для поиска генов, от которых зависят проявления дружелюбия, беспокойства, агрессии и других качеств животных.

12 Р.К.Расцветаева, С.М.Аксенов**Бераунит и его команда: история открытия нового минерала элеонорита**

История открытия и исследования минерала бераунита насчитывает без малого 200 лет, а его близкие родственники долгое время считались разновидностями. Однако этот структурный тип оказался наиболее продуктивным для образования новых минералов.

21 А.В.Якушев**Секреты географии микробных сообществ Земли**

Анализ свежее опубликованных данных глобальных исследований микробиома почв разных биоклиматических зон позволяет выявить не отмечавшиеся ранее закономерности: бактериальные почвенные комплексы подразделяются на две глобальные группы (тропическую и внетропическую), принципиально различающиеся по таксономическому составу.

26 Ю.А.Столповский, Ю.Я.Якель**Монгольские заметки, или В стране древней животноводческой культуры**

Экспедиция Российской академии наук преодолела 12 тыс. км для того, чтобы изучить породное разнообразие сельскохозяйственных животных в труднодоступных монгольских селениях, отобрать биологические образцы и сопоставить результаты их анализа с данными, имеющимися в генетическом банке Института общей генетики имени Н.И.Вавилова. Эта работа — основа поиска специфических генов продуктивности и адаптивности домашнего скота кочевых народов.

39 А.В.Кузьмин**Астрометрические приборы древности**

К одним из самых первых астрометрических приборов относятся армиллярная сфера, предназначенная для определения экваториальных или эклиптических координат небесных светил, и антикитерский механизм, использовавшийся при расчете движения небесных тел и вычислении дат астрономических событий.

Научные сообщения**48 Я.А.Попов****Беззубый предок усатых китов****Заметки и наблюдения****50 Л.Н.Касьянова, А.М.Мазукабзов****Береза в ольхонской степи****Времена и люди****58 Р.Н.Щербаков****Джон Уилер: смелый консерватизм в науке****69 ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2018 ГОДА****Е.А.Хазанов****По физике — А.Эшкин, Ж.Муру, Д.Стрикланд (69)****А.В.Юдкина, Д.О.Жарков****По химии — Ф.Арнольд, Дж.Смит, Г.Винтер (74)****А.В.Недоспасов****По физиологии или медицине — Дж.Аллисон и Т.Хондзё (82)****87****Некролог****Памяти В.А.Гончарова****88****Тематический и авторский указатели за 2018 г.**

CONTENTS:

3 Interview with A.V.Kukekova

New Perspectives of the "Fox model" in the Study of Behaviour Genetics

The solution of a number of fundamental and applied problems of biology and medicine is associated with the identification of genes responsible for the mammalian behaviour. One of the most important fields of this work is the study of the domestication syndrome. The populations of tame and aggressive foxes, bred in the Institute of Cytology and Genetics (SB RAS) and studied by an international research group, have become a unique model for finding genes on which friendliness, anxiety, aggression, and other animal characters depend.

12 R.K.Rastsvetaeva, S.M.Aksenov

Beraunite and Its Team: the History of Discovery of a New Mineral Eleonorite

The history of discovery and exploration of the mineral Beraunite is nearly 200 years old. The close relatives of this mineral have long been considered as its species. However, this structural type turned out to be the most productive for the formation of new minerals.

21 A.V.Yakushev

Secrets of Geography of Microbial Communities of the Earth

Analysis of newly published data from global studies of the soil microbiome of different bioclimatic zones makes it possible to identify patterns that have not been noted earlier: bacterial soil complexes are divided into two global groups (tropical and non-tropical), fundamentally different in taxonomic composition.

26 Yu.A.Stolpovsky, Yu.Ya.Yakel

Mongolian Notes, or in the Country of Ancient Cattle Culture

The expedition of the Russian Academy of Sciences overcame 12 thousand km in order to study the breeder cattle diversity of livestock in hard-to-reach Mongolian villages, select biological samples, and compare the results of the analysis with the data available in the genetic bank of Vavilov Institute of General Genetics. This work is the search basis for specific genes for the productivity and adaptability of livestock of nomadic peoples.

39 A.V.Kuzmin

Ancient Astrometric Devices

Two of the very first astrometric instruments is the armillary sphere, which was intended to determine the equatorial or ecliptic coordinates of celestial bodies, and the Antikythera mechanism, used in calculating the movements of celestial bodies and calculating dates of astronomical events.

Scientific Communications

48 Ya.A.Popov

Toothless Ancestor of Baleen Whales

Notes and Observations

50 L.N.Kasyanova, A.M.Mazukabzov

Birch in the Olkhon Steppe

Times and People

58 R.N.Shcherbakov

John Wheeler's Courageous Conservatism in Science

69 2018 NOBEL PRIZE LAUREATES

E.A.Khazanov

In Physics: Arthur Ashkin, Gerard Mourou, and Donna Strickland (69)

A.V.Yudkina, D.O.Zharkov

In Chemistry: Frances Arnold, George Smith, and Sir Gregory Winter (74)

S.A.Nedospasov

In Physiology or Medicine: James Allison and Tasuku Honjo (82)

87

Obituary

In Memoriam of V.A.Goncharov

88

Subject and Author Index for 2018

Новые перспективы «лисьей модели» в изучении генетики поведения

Интервью с А.В.Кукековой

Департамент наук о животных Иллинойского университета (шт. Иллинойс, США)
e-mail: avk@illinois.edu

В августе 2018 г. журнале «Nature Ecology & Evolution» вышла статья, авторам которой впервые удалось расшифровать геном лисицы обыкновенной и получить новейшие данные о генетических основах поведения этого животного. Лидер международного исследовательского коллектива, профессор департамента наук о животных Иллинойского университета (США) Анна Валерьевна Кукекова рассказала редактору журнала «Природа» о возможностях, открывающихся в результате проведенной работы.

Ключевые слова: геном лисицы обыкновенной, одомашнивание, синдром одомашнивания, социальное поведение млекопитающих, синдром Вильямса-Бойрена.

Анна Валерьевна, исследования, освещенные в статье «Red fox genome assembly identifies genomic regions associated with tame and aggressive behaviors» [1]*, — продолжение эпохальной работы, начатой более полувека назад выдающимся российским генетиком, академиком Дмитрием Константиновичем Беляевым, не так ли?

Несомненно, без фундамента, заложенного коллегами из Института цитологии и генетики Сибирского отделения (ИЦиГ СО) РАН, подобная работа была бы невозможна. Исследования начались в 1950-е годы, на протяжении десятилетий российские ученые вели селекцию лисиц только по одному признаку — поведению — и смогли отобрать животных, которые в определенной мере напоминают собак. Конечно, это еще не домашние животные в полном смысле слова: они любят грызть мебель, активны ночью, их трудно содержать в маленькой квартире. Требуется дальнейшая селекция. Но по этой «лисьей модели» можно многое узнать о начальных, ключевых этапах одомашнивания.

На определенном этапе приручения животного важна его способность жить рядом с людьми. Сегодня большинство ученых придерживается мнения, что селекция предков собаки по этому качеству (причем не осознаваемая человеком) предшествовала их одомашниванию — можно сказать, что животные «одомашнивали себя сами». И такой взгляд на одомашнивание сложился во многом бла-



Анна Кукекова с ручной волчицей по имени Дарма, социализированной в раннем возрасте в Парке волков (Wolf Park). Индиана, США. 2011 г.

* Для более полного освещения обсуждаемой темы в конце интервью приведен список литературных источников.



Члены международного исследовательского коллектива, изучающего генетические основы domestikации лисицы обыкновенной. 2007 г. Слева направо: Е.В.Володина (Московский зоопарк), И.А.Володин (МГУ имени М.В.Ломоносова, Московский зоопарк), И.Н.Оськина (ИЦиГ), Г.Аккланд (Корнелльский университет, США), Т.И.Семёнова (ИЦиГ), Л.Н.Трут (ИЦиГ), Г.Ларк (Университет Юты, США), И.В.Пивоварова (ИЦиГ), А.В.Харламова (ИЦиГ).

Здесь и далее фото А.В.Кукековой

годаря эксперименту Беляева. Новосибирские ученые сумели смоделировать первый этап адаптации животных к жизни с людьми: отбирались лисицы, не только наименее агрессивные и не испытывающие значительного страха перед человеком, но и способные проявлять по отношению к нему положительные эмоции.

В настоящее время мы пробуем на основе «лисий модели» найти гены, отвечающие за первоначальную ступень процесса domestikации. Изучая собак, это очень трудно сделать, поскольку они одомашнены так давно, что теперь трудно уловить в их геноме ключевые «сигналы», связанные с предрасположенностью к domestikации. Эти «сигналы» не так явно выражены, смешаны со многими другими, ведь на протяжении истории совместной жизни человека и собаки происходила селекция по морфологическим и другим признакам.

Представленные на страницах «Nature Ecology & Evolution» данные вызвали огромный интерес коллег. Как вы оцениваете проведенную работу, каковы основные итоги исследования?

Во-первых, секвенирован геном лисицы обыкновенной (*Vulpes vulpes*). Теперь мы знаем, какие

гены и в какой последовательности находятся на хромосомах лисицы, как лисий геном отличается от генома собаки и других животных, а также у нас теперь есть карта вариантов генетического полиморфизма лисицы, которая так важна для проведения молекулярно-генетических исследований. Зоологам и экологам, изучающим лисиц, тоже очень важно располагать полными данными о геноме этих животных, которые имеют чрезвычайно широкий ареал (в том числе за счет интродукции) в сравнении с другими представителями отряда хищных млекопитающих. Лисы на удивление способны приспосабливаться к разным климатическим условиям — от пустыни до тундры, поднялись до субарктических широт. В некоторых областях Скандинавии они вытесняют песцов, занимая их экологическую нишу. Расшифрованный геном лисицы поможет ответить на многие вопросы, связанные с распространением, популяционной динамикой и способностью этого животного к адаптациям, а также будет востребован сообществом ученых, исследующих близкородственные виды, геном которых еще не был секвенирован.

Во-вторых, мы провели детальный генетический анализ трех сформированных на звероферме ИЦиГ СО РАН популяций лисиц — ручных, агрес-

сивных и обычных совхозных. Несколько слов о том, что представляют собой ручные лисицы: своим поведением они напоминают собак с их стремлением защищать хозяина и проводить время в дружелюбном общении с человеком. Селекцию лисиц на ручное (добродушное по отношению к человеку) поведение ученые начали в 1959 г. и получили соответствующую популяцию. С 1970 г. проводили отбор этих животных по признаку недоверия к людям и получили линию агрессивных лисиц. Популяция совхозных лисиц исходно была предковой для двух других, и, хотя она также прошла свои 50 лет отбора, селекции по поведению в данном случае специально не проводилось, и мы использовали эту популяцию как контрольную.

В ходе анализа мы нашли в геноме лисиц из трех названных популяций 103 участка, которые наиболее сильно различаются между этими популяциями и перспективны для дальнейших исследований. По-видимому, не все найденные участки связаны непосредственно с поведением, некоторые — с возможностью животных размножаться в неволе (обусловленной, к примеру, особенностями иммунитета или другими параметрами). Так или иначе, мы определили, что у части из них есть связь с поведением. Но нам было интересно пой-

ти дальше — установить конкретные гены в этих участках, «ответственные» за дружелюбие, беспокорство, агрессию и другие качества животного. В результате проведенного исследования удалось показать, что, комбинируя методы, вполне реально найти такие гены.

Одно из преимуществ нашей работы состоит в том, что мы могли не только сравнить сиквенсы лисиц из разных популяций, но и составить экспериментальные семьи — скрестить ручных животных с агрессивными и получить поколение F1, затем провести скрещивание внутри F1 и получить поколение F2. Используя ранее разработанный нами набор генетических маркеров, мы провели генетическое картирование созданных экспериментальных семей. Этот подход давно используется в генетике классических моделей, таких как дрозофила и мышь; суть его сводится к поиску ассоциаций между генотипом и фенотипом. Поведение лисиц в поколении F2 крайне разнообразно: можно увидеть как ручных, так и агрессивных лисиц — в зависимости от того, какие гены они унаследовали от бабушек и дедушек. Чтобы выявить геномные участки, влияющие на поведение лисиц в F2, мы проследили наследование генетических маркеров в экспериментальных семьях и идентифицировали 11 геномных участков,



Тема и Марина Шепелевы играют с ручными лисицами. Экспериментальная звероферма Института цитологии и генетики СО РАН. 2018 г. На этой фотографии и далее показано, что одомашненные лисы своим дружелюбным и игривым поведением напоминают собак.



которые влияют на то, будет ли лисица в поколении F2 более добродушной или более агрессивной. Сравнив геномные участки, найденные в результате генетического картирования, с участками, идентифицированными при сравнении сиквенсов популяций, мы обнаружили, что 30 из 103 участков, выявленных в популяционном анализе, перекрываются с участками, найденными в анализе экспериментальных семей. Геномные участки, обнаруженные двумя независимыми методами, представляют собой наиболее вероятные мишени селекции лисиц на ручное и агрессивное поведение. И в настоящем исследовании мы сфокусировались на анализе одного такого участка, расположенного на лисьей хромосоме 15.

Детальный анализ этого участка показал, что он содержит всего один кодирующий ген — *SorCS1**. Более того, мы сумели определить наиболее часто встречающиеся варианты этого гена (аллели) в ручной и агрессивной популяциях и посмотреть, как проявятся эти аллели в экспериментальных лисьих семьях. Мы уже обсудили, что при скрещивании ручных и агрессивных лисиц представители поколения F2 довольно сильно различаются по поведению — есть и ласковые лисята, и довольно агрессивные. А теперь нам удалось показать, что поведение лисиц в поколении F2 значительно лучше (с точки зрения человека), если данная особь унаследовала две аллели гена *SorCS1* от популяции прирученных лисиц. Этот эксперимент позволил показать, что ген *SorCS1* может влиять на социальное поведение млекопитающих, и подтвердил, что, используя такой методологический подход, мы способны идентифицировать конкретные гены, влияющие на добродушное и агрессивное поведение лисиц.

* Ген *SorCS1* регулирует белки, вовлеченные в связь между нейронами.

Почти все научно-популярные интернет-сайты, комментируя полученные вашей исследовательской группой данные о влиянии *SorCS1* на поведение лисицы, использовали выражение «ген дружелюбия». Наверное, вы не согласитесь с такой интерпретацией?

Нет, конечно. *SorCS1* — лишь один из «генов дружелюбия», ведь речь идет о комплексном фенотипе. Ранее мы показали, что расположенность лисы к человеку контролируется несколькими геномными участками, и они отвечают за разные аспекты поведения животного. Например, некоторые геномные участки отвечают за то, будет ли

лиса рада нашему появлению, другие отвечают за то, нравятся ли ей наши прикосновения. Мы установили, что ген *SorCS1* кодирует вполне конкретное поведение — желание лисицы продолжать общение с человеком в ситуации, когда он провел около нее некоторое время и собирается уходить.

Вообще неудачи в изучении генетических основ domestikации связаны с тем, что исследователи часто не принимают во внимание чрезвычайно комплексность фенотипа поведения. Нужно искать гены, отвечающие за отдельные «элементы» поведения домашнего животного, — это сродни составлению мозаики.

В 2016 г. исследователи Линчёпингского университета (Швеция) обнародовали результаты проведенного ими поиска генов, ответственных за межвидовые коммуникации собак [2]. Есть ли совпадения в материалах, полученных ими и вашим исследовательским коллективом?

Я помню это исследование и хорошо знакома с его авторами. Конкретные гены, определенные шведскими учеными (*SEZ6L*, *ARVCF*, *COMT*, *TXNRD2*) и нашей группой, не совпали. Однако интересно, что и в работе коллег из Линчёпингского университета, и в нашей были найдены гены, вызывающие специфические особенности поведения не только у животных, но и у людей. Нельзя сказать, что «перекрывание» между найденными участками генома лисицы и генами, которые связаны с особенностями поведения человека, статистически значимо, тем не менее мы видим, что совпадения есть. Например, один обнаруженный нами ген, кодирующий глутаматный рецептор**, *GRINB*, во-

** Глутаматные рецепторы расположены главным образом на мембранах нейронов и глиальных клеток, их функции связаны с запоминанием и обучением.

влечен в механизм формирования по крайней мере трех психологических особенностей человека — синдрома дефицита внимания, аутизма, шизофрении. О чем это говорит? Можно предположить, что существуют гены, имеющие чрезвычайно важное значение для социального поведения млекопитающих, и, исследуя его аспекты, мы будем всегда находить комбинации этих генов. С другой стороны, изучение таких уникальных моделей, как популяции лисиц, созданные в Новосибирске, позволяет найти и абсолютно новые гены, которые влияют на поведение млекопитающих. Например, насколько мне известно, ген *SorCS1*, выявленный в нашем последнем исследовании (с помощью «лисей модели»), никогда прежде не тестировали на его роль в социальном поведении, хотя в нескольких исследованиях *SorCS1* находили в участках генома человека, ассоциированных с психическими особенностями [3].

Открывать новые гены, связанные с поведением млекопитающих, очень важно. Дело в том, что когда проводятся исследования на людях — полногеномный поиск ассоциаций (genome-wide association studies)* — и ученые находят геномные участки, ассоциированные, например, с аутизмом или шизофренией, то зачастую неизвестно, как связать эти гены с фенотипом, потому что нет информации о том, что эти гены как-либо влияют на поведение. У человека агрессия связана с различными психическими особенностями, в частности с шизофренией, и я полагаю, что в данном случае используемая нами «лисей модель» поможет в поиске неизвестных пока генов, контролирующих социальное поведение.

Из вашей статьи в «Nature Ecology & Evolution» [1] следует, что у лисиц из вышеупомянутой агрессивной популяции и у собак определенные участки генома оказались гомологичными. Расскажите, пожалуйста, об этом подробнее. Для вас было неожиданностью то, что подобное совпадение отмечено не с теми лисицами, селекция которых велась по признаку дружелюбия?

Известны несколько участков в геномах собак, которые связаны с селекцией, направленной на одомашнивание. Тот участок, о котором вы го-



ворите, формируется при гемизиготной делеции**, или перестройке одной из двух хромосом (вторая остается нормальной) с потерей фрагмента, включающего, как правило, 26–28 генов. Такая же делеция встречается и у некоторых людей, причем этой наследственной мутацией обусловлено возникновение у человека синдрома Вильямса—Бойрена. Хотя люди с синдромом сильно различаются, у них есть общие особенности: чаще всего они имеют проблемы с сердцем, отставание в росте, абсолютный слух и очень интересный поведенческий фенотип — чрезвычайное дружелюбие. Такие люди часто улыбаются и располагают к себе. Однако их отличает не только необычное дружелюбие, но и повышенная тревожность, из-за чего им трудно поддерживать длительные отношения. Кроме того, у них понижен IQ. Когда мы опубликовали свою первую статью по генетическому картированию лисьих семей [4], нам стали писать люди, имеющие детей с синдромом Вильямса—Бойрена, и спрашивать, не находим ли мы связи между генами, вовлеченными в этот синдром, и поведением лисиц, ведь ручные лисицы также характеризуются невероятным дружелюбием. Замечу, что хотя гены, делетированные у носителей синдрома Вильямса—Бойрена, известны, их механизм влияния на поведение неясен, мы не знаем, какой из этих генов отвечает за дружелюбие, а какой за абсолютный слух. Мы предполагали, что именно в популяции ручных лисиц найдем нечто интересное на участке хромосомы, соответствующей делеции с появлением синдрома Вильямса—Бойрена, но обнаружили то, что искали, в популяции агрессивных.

* Полногеномный поиск ассоциаций (GWA study) — направление биологических (как правило, биомедицинских) исследований, связанных с изучением ассоциаций между вариантами генома и фенотипическими признаками.

** Делеция (от лат. deletio — уничтожение) — хромосомная перестройка, при которой происходит потеря участка хромосомы. Утраченный участок называется делетированным.



Как вы это интерпретируете?

Мы предполагаем, что агрессия лисиц связана с беспокойством. Возможно, именно по этой причине животные, селекцию которых вели по способности на агрессивный ответ, заранее показывают человеку, чтобы он к ним не приближался: мы еще только подходим к клетке, а лисица уже демонстрирует неудовольствие (определенно не боязнь, поскольку она не отбегает). Но об этой интерпретации не сказано в нашей последней статье: нам не хотелось преждевременно спекулировать на полученных данных. Однако, возможно, и здесь «лисий модель» поможет нам лучше понять механизм человеческого заболевания.

В вашей работе большое значение имели наблюдения за поведением животных. Кто из международной исследовательской группы занимался этой сложной задачей?

Мне было необходимо иметь полное представление о поведении лисиц, и я тестировала каждое из более чем 500 животных, представленных в нашей работе, записывая тесты на видео. Затем специалисты ИЦиГ СО РАН из группы доктора биологических наук Людмилы Николаевны Трут расшифровывали видеозаписи. Это очень кропотливая работа, но она того стоила. Мы на протяжении многих лет работаем вместе, и то, что наше плодотворное сотрудничество позволяет нам открыть столько всего нового, приносит мне огромную радость — и профессиональную, и человеческую.

Вы проводите междисциплинарные исследования и, вероятно, планируете дальнейшее взаимодействие с коллегами из других учреждений, в том числе медицинских?

В США существует множество представленных в открытом доступе данных по психиатрическим заболеваниям людей, сведений о соответствующих

генотипах, ведь большинство исследований в этой сфере финансирует Национальный институт здоровья США, который придает большое значение публичности поддерживаемых им проектов. Наша лаборатория в Иллинойском университете состоит из генетиков и биоинформатиков, и мы имеем хорошие контакты с Медицинской школой Университета Вашингтона в Сент-Луисе. Специалисты, работающие там, изучают детские психиатрические заболевания и имеют двойную специализацию — биологи-генетики и психиатры. С нашей точки зрения, это очень хорошая группа для взаимодействия. Мы сотрудничаем с учеными в Швеции, в Ки-

тае, Корее, Великобритании, России, США. Постоянная связь с самыми разными институтами необходима, потому что невозможно выучить все с нуля, а каждая исследовательская группа сегодня — эксперты в своей узкой области.

Мы депонировали полученные нами сиквенсы в базу данных с открытым доступом, и коллеги из разных областей уже используют эту информацию. Часто загрузка больших данных (таких, как в статье, о которой мы говорим) ведет к новым совместным проектам. И действительно, ряд ученых, с которыми мы давно сотрудничаем, предлагают совместную работу и новые направления исследований.

В какой мере полученные вами данные согласуются с предложенной академиком Беляевым концепцией дестабилизирующего отбора, который приводит к появлению у животных синдрома деструкции?

Академик Беляев разрабатывал свою теорию в 1950–1960-е годы, когда только-только была открыта ДНК и началось изучение работы генов. Он полагал, что если ведется очень жесткая селекция по определенным признакам, то происходит дестабилизация организма животного и можно получить животных с совершенно новыми, не известными ранее особенностями. Скорее всего, феномен, который Дмитрий Константинович объяснял с позиций своей концепции, связан с жестким отбором по комбинации нескольких или многих генов, в результате чего возникает их сочетание, крайне редкое у индивидуумов в природе. Также, возможно, мишенями селекции становятся гены с широким спектром действия — например, если это какой-то регуляторный ген, он может влиять как на поведение, так и на морфологию. Мы не думаем, что наблюдаемые нами мутации возникли именно в экспериментальной лисьей популяции;

скорее всего, они существовали в популяциях лисиц очень давно, но их частота встречаемости в наших популяциях была увеличена за счет селекции.

Еще один механизм, который может вызывать множественные изменения, — hitch-hiking («езда на попутке»). Селекция по поведению означает отбор конкретного гена на хромосоме вместе с окружающими его генами, каждый из которых может влиять на разные признаки — например, на пушистость, окраску меха и др. Если поддерживать селекцию долго, но избегать инбридинга, то через несколько поколений сцепленность признаков, обусловленная близким соседством и определенной последовательностью кодирующих их генов, разрушается в силу генетической рекомбинации. Как известно, у белаяевских лисиц по мере одомашнивания снизилось качество меха, но у современных поколений — наших подопытных лис — не только добрый характер, но и вполне пушистый мех. Возможно, те комплексные изменения, которые наблюдались у лисиц через несколько поколений селекции, но пропали в недавние годы, в какой-то мере стали результатом этого процесса. Конечно, было бы очень интересно поговорить с академиком Беляевым. К сожалению, его не стало в 1985 г.

Существует гипотеза Адама Уилкинса (эволюционного биолога из Университета Гумбольдта в Берлине) о формировании синдрома одомашнивания, в том числе дружелюбного поведения животных, в результате нарушения деления или миграции клеток нервного гребня — стволовых клеток позвоночных, которые появляются в раннем эмбриогенезе и играют важную роль в развитии центральной нервной системы [5]. Как вы оцениваете аргументацию коллег в свете данных, полученных в вашем исследовании?

Это очень интересная идея. С одной стороны, я отношусь критически к аргументации, предложенной упомянутыми авторами, потому что клетки нейронного креста не участвуют непосредственно в формировании мозга. Но нельзя отрицать их косвенного влияния. Приме-



чательно, что мы находим у лисиц определенные гены, которые важны для функционирования и развития мозга, но вместе с тем способны воздействовать и на функционирование клеток нейронного креста. Этой теме посвящена еще одна наша новая статья в журнале «Proceedings of the National Academy of Sciences» [6], в которой мы представили результаты сравнительного анализа транскриптома* двух областей мозга у лисиц из ручной и агрессивной популяций. Среди генов, которые показали различия в экспрессии между ручной и агрессивной популяциями, наряду с рецепторами нейротрансмиттеров (химических передатчиков электрохимического импульса между нейронами и от нейронов на исполнительные клетки) были также и гены, которые не участвуют

* Транскриптом — совокупность всех транскриптов, синтезируемых одной клеткой или группой клеток, включая матричную РНК и некодирующие РНК.



в передаче сигналов через нейротрансмиттеры, но важны для межклеточных взаимодействий — например, при развитии мозга. Спектр действия таких генов этим не ограничивается — они так же активны в других клетках организма, и известно, что они экспрессируются в клетках нейронального креста.

Я допускаю, что описанный в гипотезе Уилкинса механизм формирования синдрома доместикации действительно работает, но опосредованно — через селекцию генов, которые влияют и на развитие клеток нейронального креста, и на поведение. Неспецифичность генов также может приводить к комплексному изменению фенотипа, в том числе к появлению характерной для синдрома доместикации белой пятнистости в результате более медленной миграции клеток нейронального креста в определенные участки тела.

Вы говорили о «самоодомашнивании» предков современных собак. А недавно ученые из Института эволюционной биологии и экологических наук Цюрихского университета опубликовали статью о самоодомашнивании мышей [7], согласных мириться с присутствием человека ради безопасной и сытой жизни в амбаре. Исследователи даже за-

фиксировали у этих животных морфологические изменения. Вас заинтересовали результаты их работы?

Было бы интересно посмотреть на результаты секвенирования геномов этих мышей. Я думаю, морфологические изменения связаны с частотой встречаемости определенных аллелей генов в разных поколениях животных. Данный момент нужно хорошо проконтролировать. Возможно, тогда удастся выявить параллели между изменениями поведения мышей и генетическими изменениями несколько поколений спустя.

В числе моделей изучения синдрома доместикации иногда называют обезьян бонобо и противопоставляют их более агрессивным шимпанзе. Помогают ли полные данные о геноме бонобо [8] приблизиться к пониманию природы одомашнивания?

У меня несколько раз была возможность поговорить с исследователем шимпанзе и бонобо Брайаном Харэ из Университета Дьюка (США) о том, насколько эти животные интересны с точки зрения анализа поведения. Ситуация тут столь же сложна, как и в случае с волком и собакой, которые эволюционно разошлись так давно, что когда мы сравниваем их геномы и определяем

различия, то не можем сказать, какие из очевидных несовпадений связаны непосредственно с поведением. Повторюсь, преимущество наших (беляевских) лисиц в том, что их селекция проводилась именно по поведению, и в том, что можно скрещивать животных из ручной и агрессивной популяций и тестировать роль геномных участков, найденных при сравнении популяций, в поведении лисиц из экспериментальных скрещиваний. В случае же с бонобо и шимпанзе это практически невозможно.

Могут ли палеогенетики опираться на данные об участках генома, связанных с поведением, когда пытаются проследить историю одомашнивания животных? Или говорить об этом пока преждевременно?

Это довольно интересный вопрос. Конечно, методологический аппарат, которым располагают палеогенетики, сильно ограничен в связи с тем, что ДНК в древних образцах довольно сильно деградирована. В настоя-



щее время накоплено огромное количество сиквенсов, принадлежащих собакам разных пород, волкам, древним собакам, и мы планируем взаимодействовать с коллегами, изучающими этих животных, сравнивать их материалы с данными по лисицам. Предполагаем, что мы можем найти общие механизмы изменения генома при одомашнивании у собак и лисиц. Но не обязательно мутации у разных одомашненных видов происходили в одних и тех же генах — например, *SorCS1* (ключевой «ген дружелюбия») мог остаться неизменным, а мутировали взаимодействовавшие с ним гены.

Год назад, благодаря научно-популярной книге Людмилы Николаевны Трут и американского эволюционного генетика Ли Дугаткина «How to tame a fox», история эксперимента академика Беляева по доместикации лис стала достоянием широкого круга чита-

телей во всем мире. Очень важно, что вы продолжаете исследования и они столь успешны. Хотелось бы чаще рассказывать о них на страницах «Природы» для российской аудитории, как это и было на протяжении многих лет.

Объект наших исследований чрезвычайно интересен. Коллеги продолжают изучать различные аспекты, о которых стоит рассказывать на страницах научно-популярных изданий. Например, о влиянии одомашнивания на вокальное поведение лисиц [9]. Книга Людмилы Николаевны «How to tame a fox», выпущенная издательством Университета Чикаго, прекрасно написана, и я надеюсь, что она будет переведена на русский язык. Это важно, ведь работа, о которой в ней рассказывается, — предмет гордости российских генетиков.

Интервью подготовила кандидат биологических наук **Е.В.Сидорова**

Литература / References

1. Kukekova A.V., Johnson J.L., Xiang X. et al. Red fox genome assembly identifies genomic regions associated with tame and aggressive behaviors. *Nature Ecology & Evolution*. 2018; 2(9): 1479–1491. Doi:10.1038/s41559-018-0611-6.
2. Persson M.E., Wright D., Roth L.S.V. et al. Genomic regions associated with interspecies communication in dogs contain genes related to human social disorders. *Scientific Reports*. 2016; 6. Doi:10.1038/srep33439.
3. Savas J.N., Ribeiro L.F., Wierda K.D. et al. The sorting receptor SorCS1 regulates trafficking of neuroligin and AMPA receptors. *Neuron*. 2015; 87(4): 764–780. Doi:10.1016/j.neuron.2015.08.007.
4. Kukekova A.V., Trut L.N., Chase K. et al. Mapping Loci for fox domestication: deconstruction/reconstruction of a behavioral phenotype. *Behav. Genet.* 2011; 41(4): 593–606. Doi:10.1007/s10519-010-9418-1.
5. Wilkins A., Wrangham W.R., Fitch T. The «domestication syndrome» in mammals: A unified explanation based on neural crest cell behavior and genetics. *Genetics*. 2014; 197(3): 795–808. Doi:10.1534/genetics.114.165423.
6. Wang X., Pipes L., Trut L.N. et al. Genomic responses to selection for tame/aggressive behaviors in the silver fox (*Vulpes vulpes*). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2018; 115(41): 10398–10403. Doi:10.1073/pnas.1800889115.
7. Geiger M., Sánchez-Villagra M.R., Lindholm A.K. A longitudinal study of phenotypic changes in early domestication of house mice. *Royal Society Open Science*. 2018. Doi:10.1098/rsos.172099.
8. Prüfer K., Munch K., Pääbo S. The bonobo genome compared with the chimpanzee and human genomes. *Nature*. 2012; 486(7404): 527–531. Doi:10.1038/nature11128.
9. Гоголева С.С., Володин И.А., Володина Е.В. и др. Влияние экспериментальной доместикации серебристо-черных лисиц (*Vulpes vulpes*) на вокальное поведение. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017; 21(4): 402–413. Doi:10.18699/VJ17.258. [Gogoleva S.S., Volodin I.A., Volodina E.V. et al. Effects of experimental domestication of silver foxes (*Vulpes vulpes*) on vocal behaviour. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017; 21(4): 402–413. (In Russ.).]

New Perspectives of the “Fox model” in the Study of Behaviour Genetics

Interview with A.V.Kukekova
Department of Animal Sciences, University of Illinois (USA)

In August 2018 the journal “Nature Ecology & Evolution” published an article “Red fox genome assembly identifies genomic regions associated with tame and aggressive behaviours”. The authors first in the world deciphered the genome of the red fox and have got the latest data on the genetic basis of the behaviour of this animal. The leader of the international research team assistant professor of the Department of Animal Sciences at the University of Illinois (USA) Anna Kukekova told the correspondent of the journal “Priroda” about the opportunities that open up as a result of the work.

Keywords: genome of the red fox, domestication, domestication syndrome, social behaviour of mammals, Williams—Beuren syndrome.

Бераунит и его команда: история открытия нового минерала элеонорита

Р.К.Расцветова¹, С.М.Аксенов¹

¹Институт кристаллографии имени А.В.Шубникова РАН (Москва, Россия)

Многие фосфатные минералы имеют в своем составе железо. Его атомы формируют октаэдры, которые объединяются в трехмерные постройки с помощью фосфорных Р-тетраэдров. Чаще всего Fe-октаэдры изолированы друг от друга, но иногда они могут объединяться вершинами или ребрами, образуя кластеры или цепочки. Наиболее стабильные группировки — линейные триплеты из октаэдров, связанных гранями. Они дополняются четырьмя октаэдрами, которые присоединяются к ним вершинами, с образованием так называемых *h*-кластеров. Из подобных кластеров формируются структуры различных типов, а в структурный тип бераунита входят минералы и с разным составом октаэдров. Исследованный нами элеонорит $\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_4\text{O}(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ из месторождения Ротлейфхен (Германия) — новый трансформационный минерал, который образуется в результате твердофазного окисления бераунита и представляет собой его Fe^{3+} -аналог.

Ключевые слова: элеонорит, бераунит, группа бераунита, фосфаты трехвалентного железа, рентгеноструктурный анализ, кристаллическая структура, *h*-кластер.

Фосфор — 10-й среди наиболее распространенных элементов на Земле. Он концентрируется в вулканических породах, но чаще всего встречается в осадочных породах многих регионов мира. Фосфатные минералы нередко содержат железо. В их структурах атомы железа формируют октаэдры, которые соединяются в трехмерные постройки вершинами фосфорных тетраэдров. В большинстве минералов Fe-октаэдры изолированы друг от друга, но в некоторых они могут объединяться вершинами или ребрами, образуя кластеры или цепочки. В их числе минералы, о которых мы уже писали в «Природе»*, — метавивианит с димерами из объединенных ребрами октаэдров и метаферроштрунцит с цепочками из связанных вершинами октаэдров.

В другом виде *h*-кластер состоит из семи октаэдров (рис.1). На основе этих кластеров изобретательная природа создала целое семейство минералов со структурами, в которых реализуются различные варианты — как расположения кластеров, так и их соединения друг с другом через собственные тетраэдры и октаэдры или с привлечением дополнительных октаэдров. Подобные кластеры найдены не только в берауните, но и в структурах дюфренита, рокбриджита, липскомбита, барбосалита и элеонорита.

Наиболее простой способ объединения *h*-кластеров встречается в липскомбите и его упорядоченной форме барбосалите.

Роль *h*-кластеров в структуре минералов

Наиболее стабильные структурные группировки состоят из трех Fe-октаэдров с общими гранями. Эти уникальные линейные триплеты дополняются четырьмя октаэдрами, которые соединяются с ними вершинами. Такой фрагмент впервые был выделен П.Б.Муром в структуре бераунита [1, 2] и назван *h*-кластером, так как по форме он напоминает заглавную латинскую букву «Н». В изоли-

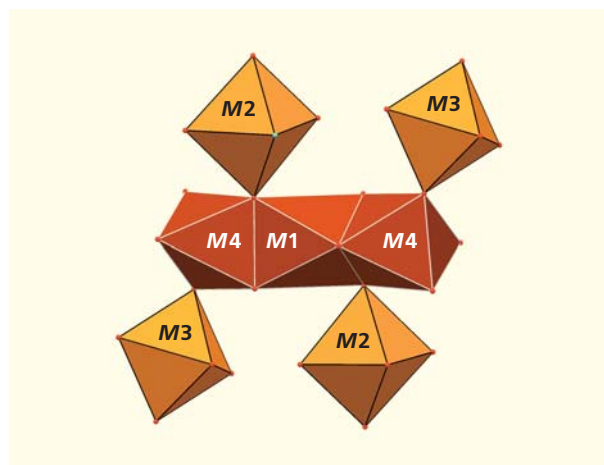


Рис.1. *h*-кластер из семи октаэдров.

* Расцветова Р.К. Метавивианит или метаферроштрунцит? // Природа. 2012. №12. С.70–74.



Рамиза Кераровна Расцветаева, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института кристаллографии имени А.В.Шубникова РАН, соавтор открытий более 80 минералов. Область научных интересов — структурная минералогия, кристаллохимия, рентгеноструктурный анализ. Постоянный автор «Природы».
e-mail: rast.crys@gmail.com



Сергей Михайлович Аксенов, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник того же института. Специалист в области кристаллохимии и рентгеноструктурного анализа. Неоднократно публиковался в «Природе».
e-mail: aks.crys@gmail.com

Липскомбит $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn})\text{Fe}_2^{3+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$ в виде голубовато-зеленых кристаллов из гидротермально измененных пород гранитных пегматитов Сапукая (Бразилия) назван в честь американского физикохимика и кристаллографа, лауреата Нобелевской премии У.Н.Липскомба мл. из Гарвардского университета. Несмотря на престижное имя, минералу не повезло. Его структура из-за сильной разупорядоченности до конца не ясна [2]. Другое дело — упорядоченный эквивалент минерала —

барбосалит $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$ из рудного района Минас-Жерас на юго-востоке Бразилии [3]. Он назван в честь бразильского геолога А.Л.Барбосы. В структуре минерала *b*-кластеры расположены параллельно друг другу (рис.2). В вертикальном направлении они объединяются за счет обобществления висячих *M2*- и *M3*-октаэдров в колонки, а в горизонтальном колонки через Р-тетраэдры соединяются в плоский слой. При помощи свободных вершин этих же Р-тетраэдров соседние слои образуют трехмерную постройку.

Зеленовато-черный **рокбриджит** $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn})\text{Fe}_4^{3+}(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5$ из Ириш Крика (штат Виргиния, США) [2], названный по месту находки в округе Рокбридж, также построен из кластеров, которые тоже расположены параллельно друг другу и в вертикальном направлении обобществляют *M2*- и *M3*-октаэдры, образуя

колонки. Однако способ объединения колонок в этом минерале иной. Колонки сближены друг с другом так, что триплеты соединились ребрами *M4*-октаэдров, формируя зигзагообразные цепочки, а подвесные октаэдры *M3* и *M2* соседних колонок соединились вершинами в пары. При этом наружные Р-тетраэдры стали общими для соседних колонок (рис.3). Гетерополиэдрические слои объединились в каркасную постройку, более плотную по сравнению с барбосалитовой.

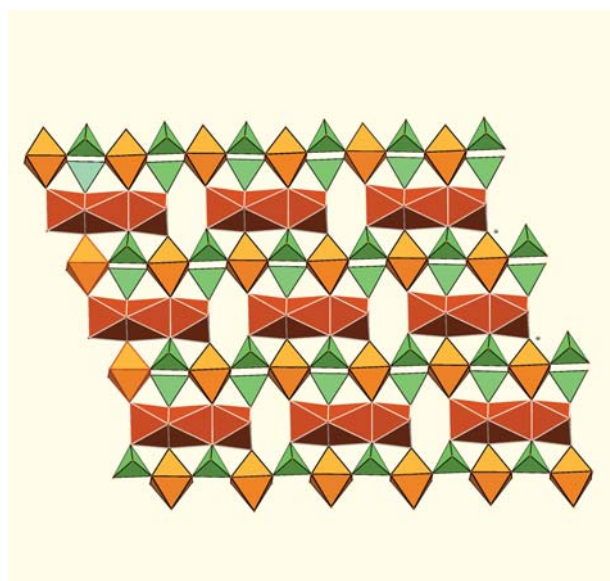


Рис.2. Структура барбосалита.

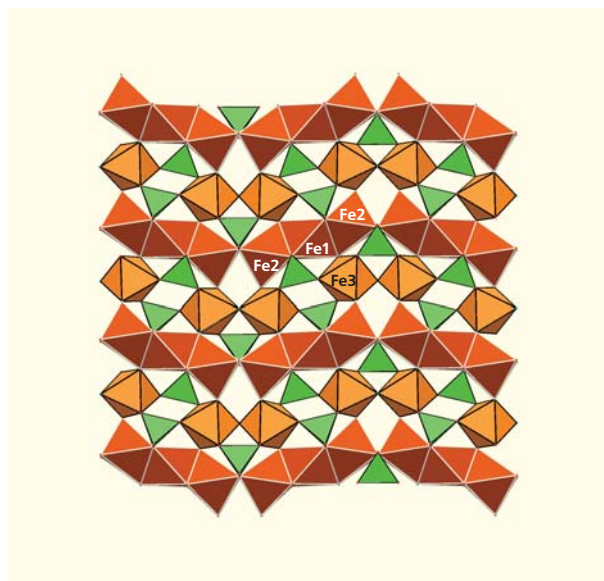


Рис.3. Структура рокбриджита.

Дюфренит $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ получил свое имя в честь французского геолога и минералога У.П.А.П.Дюфрена. Не каждый может похвастаться таким количеством имен, а Дюфрен удостоился еще и двух минералов. К счастью, они столь различны (дюфренуазит — сульфид свинца и мышьяка $\text{Pb}_2\text{As}_2\text{S}_5$), что их трудно спутать.

Каркас в дюфрените построен из кластеров, расположенных параллельно друг другу [2, 4], как и в предыдущих случаях. Однако для объединения колонок пришлось привлечь дополнительные октаэдры того же состава, которые своими вершинами цепляются за $M3$ - и $M2$ -октаэдры кластеров соседних колонок (рис.4), формируя дополнительные триплеты, параллельные основным. Все октаэдрические фрагменты (основные и производные) соединяются Р-тетраэдрами в слой, а затем и в ажурную каркасную постройку с широкими каналами, заполненными Ca.

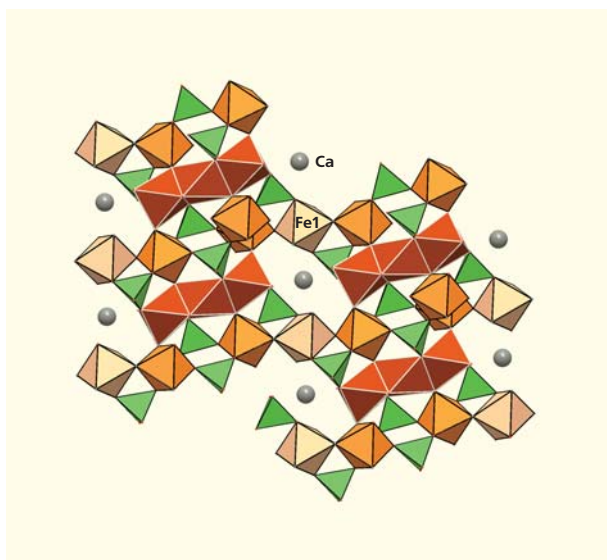


Рис.4. Структура дюфренита.

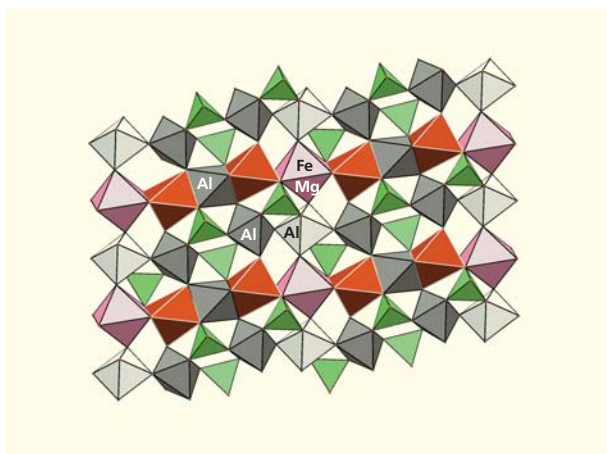


Рис.5. Структура сузалита.

Еще один оригинальный способ объединения триплетов реализуется в **сузалите** $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, который также найден в породах Минас-Жераиса и назван в честь директора Департамента национальных минеральных ресурсов Бразилии А.Ж.А. де Сузы. Минерал содержит алюминий, вытеснивший железо из $M1$ (центрального октаэдра триплета) и подвесных $M2$ - и $M3$ -октаэдров b -кластеров. В объединении кластеров участвует удвоенное количество дополнительных октаэдров [2]. В одном находится Al, а другой статистически заполнен атомами Fe и Mg. Таким образом, аналогично дюфрениту образуется дополнительный триплет из трех вершинно-связанных октаэдров (но не железных, а алюминиевых). Кроме того, так же как и в рокбриджите, образуется октаэдрическая цепочка (но с вставленным дополнительным октаэдром). И вдобавок можно выделить вертикальную цепочку из связанных вершинами добавочных октаэдров (рис.5) смешанного состава. Совершенно очевидно, что структура сузалита не уступает по плотности рокбриджитовой.

Наиболее четко роль b -кластеров видна в уникальной структуре бераунита.

Группа бераунита

Впервые **бераунит** $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, найденный в 1841 г. на руднике Грбек близ г.Бероуна в Чехии и названный по месту находки, был описан А.Брайтхауптом как новый минеральный вид [5]. Однако его уникальную структуру и формулу определили лишь через 125 лет [6]. Позже Мур выделил в каркасе наиболее стабильный блок — b -кластер, представляющий собой триплет $\text{Fe}_3\text{O}_8(\text{OH})_4$ из трех соединенных гранями Fe-октаэдров $M4-M1-M4$ (расстояние $M1-M4 = 2.875 \text{ \AA}$) и подвешенных к нему вершинами четырех октаэдров [1, 2]. В отличие от описанных выше структур, кластеры в берауните располагаются в шахматном порядке и соединяются направляющую в колонку через вершины $M3$ -октаэдров с образованием димера (как в рокбриджите). С соседними колонками объединение в слой происходит через обобществление $M2$ -октаэдров (рис.6). При помощи Р-тетраэдров слои образуют ажурную трехмерную постройку с широкими 10-членными в поперечнике каналами, заполненными водой.

Отличительной особенностью структурного типа бераунита служит обособленность b -кластеров и их связь без дополнительных октаэдров. Отсутствие производных фрагментов помогает проследить роль кластеров в структуре. Неудивительно, что именно структура бераунита позволила Муру выделить и описать подобные кластеры.

Все минералы группы бераунита характеризуются широкими вариациями химических составов, а их обобщенную кристаллохимическую формулу

можно записать в виде: $M1M2M3_2M4_2(PO_4)_4(OH,O)(OH)_4 \cdot 6H_2O$, где $M1 - Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{2+}, Zn, Mg$; $M2, M3$ и $M4 - Fe^{3+}, Mn^{2+}, Zn, Al, Cr$ [6]. Еще Мур, изучая темно-зеленый образец из Нью-Джерси (США), обратил внимание на присутствие в нем железа в двух формах и предположил, что 83% атомов Fe^{2+} располагаются в центральном ($M1$) октаэдре со средним расстоянием $M1-O = 2.11 \text{ \AA}$, в то время как атомы Fe^{3+} занимают остальные $M2-M4$ октаэдры [7]. Хотя анализы установили в берауните кроме железа и другие элементы, вплоть до 2014 г. он был единственным минеральным видом, представляющим этот структурный тип.

В формуле жирным выделены видообразующие элементы, но и другие катионы имеют шанс стать доминирующими и пополнить семейство бераунита новыми представителями.

Мп-бераунит $Mn_{0.5}Fe_{5.5}^{3+}(PO_4)_4(OH,O)_6 \cdot nH_2O$ нашли и описали в виде мелких игольчатых красных кристаллов в окисленных португальских гранитах Мангуелд (Mangualde) [8]. Их цвет связан с содержанием Fe^{3+} [2].

Л.Фанфани по результатам химического анализа подтвердил присутствие Mn^{2+} , частично замещающего Fe^{3+} в двух позициях [6]. Он считал, что данный образец отличается от классического бераунита [5]. На присутствие Mn^{2+} и Fe^{3+} в нескольких фосфатных минералах из гранитных пегматитов указывал ранее и Мур [2]. Но даже тогда, когда структура минерала была определена ($R = 0.034$) и опубликована [8] и данные Фанфани полностью подтвердились, минерал оставался в статусе всего лишь Mn^{2+} -содержащей разновидности Fe-окисленного бераунита. Распределение элементов с разной валентностью — определяющий фактор при описании минералов группы. Однако только на основании химического и рентгеноструктурного анализа Мп-содержащий бераунит новым минеральным видом не признавался. Нужны были дополнительные исследования, чтобы определить валентность марганца, но этого сделать пока не удалось.

Больше повезло минералам со структурным типом бераунита, содержащим Zn и Al.

Тврдыит $Fe^{2+}Fe^{3+}Al_3(PO_4)_4(OH)_5(OH_2)_4 \cdot 2H_2O$, обогащенный алюминием минерал, найден в гидротермальных отложениях на месторождении близ г.Красно в Западной Богемии (Чехия) в виде серебристых (до серовато-зеленых) кристаллов (рис.7), образующих радиально-лучистые агрегаты до 3 мм в длину [9]. Тврдыит назван в честь чешского минералога и геолога Яромира Тврды (Jagomir Tvrdu). Это трудновыговариваемое имя начинается «твердый».

Тврдыит изоструктурен берауниту, но содержит Al, доминирующий в четырех M -позициях ($M2$ и $M3$), где он замещает Fe^{3+} , а $M1$ - и $M4$ -октаэдры образуют Fe^{3+} -триплет, параллельный плоскости (101) (рис.8). Алюминий почти полностью (92% Al + 8% Fe) заселяет $M2$ -октаэдр, в то время как $M3$ -октаэдр заполнен лишь на 2/3. Позиции

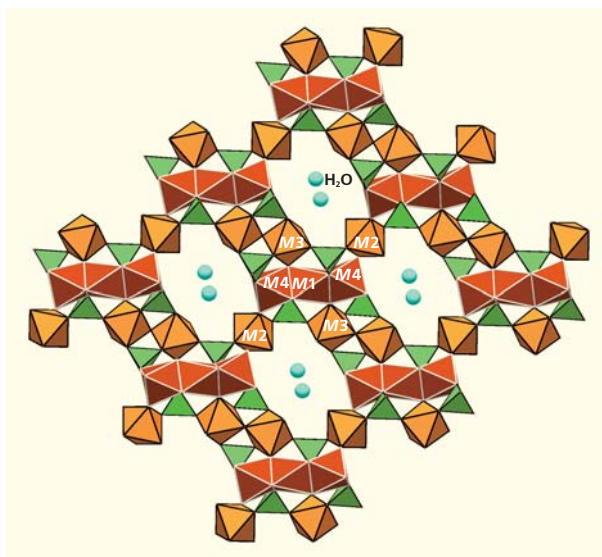


Рис.6. Структура бераунита.

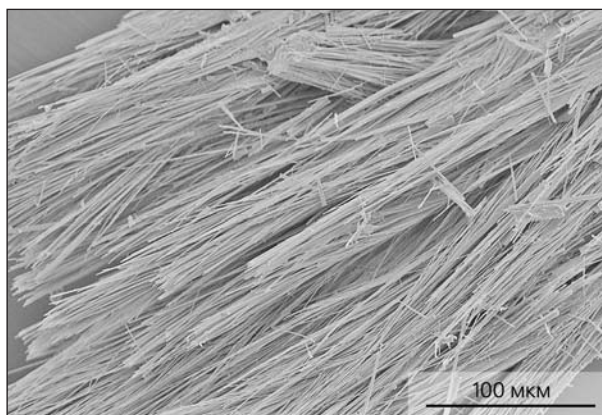


Рис.7. Волокнистые кристаллы тврдыита [9].

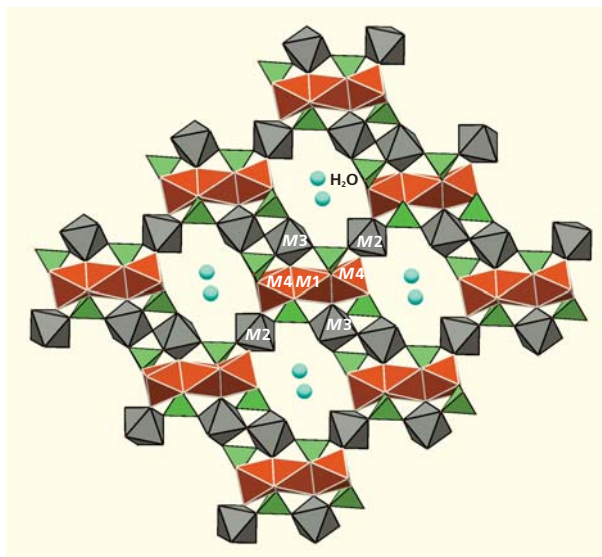


Рис.8. Структура тврдыита с Al в $M2$ - и $M3$ -октаэдрах.

M1 поровну занимают Fe^{3+} и Fe^{2+} с небольшой примесью атомов Zn, а M4 содержит остальную часть железа. Такое распределение элементов по позициям согласуется с размерами октаэдров: наименьшие средние расстояния M—O характеризуют Al-доминантные октаэдры (1.907–1.937 Å), остальные же обладают большими размерами (2.01–2.06 Å). Замещение Fe значительным количеством Al в M2- и M3-позициях приводит к уменьшению объема ячейки на 5.1%, а с-параметра — на 2.0%.

Минерал и его имя утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации (КНМНК, IMA 2014-082), а образец хранится в Национальном музее в Праге [9].

В гранитных пегматитах Баварии (Германия) наряду с тврдитом присутствует **цинкобераунит** $\text{ZnFe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Он образует сероватые радиально-лучистые агрегаты размером до 3 мм, которые состоят из отдельных волокон до 1.5 мм в длину и толщиной до 0.003 мм (рис.9, а, б). Предположительно они кристаллизовались на гид-

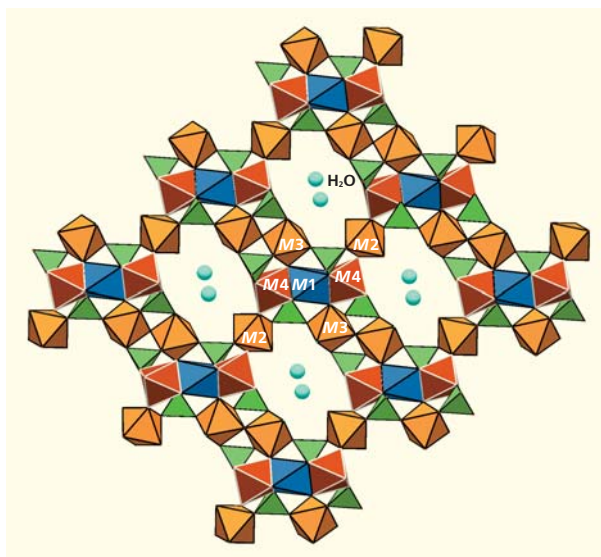


Рис.10. Триплеты в гетерополиэдрическом слое цинкобераунита с Zn в M1-октаэдре.



Рис.9. Белые кристаллы цинкобераунита на полеовом шпате (а) и радиально-лучистые — на калиевом полеовом шпате (б) [10].

ротермальной стадии при низких температурах и в окислительных условиях. В тврдите цинк размазан по всем позициям, не преобладая ни в одной, а в цинкоберауните атомы Zn концентрируются в M1-позиции (0.675 Zn + 0.289 Fe), где они преобладают над остальными двухвалентными катионами. Согласно балансу зарядов железа в минерале в основном трехвалентное, а Fe^{2+} присутствует лишь в позиции M1 [10]. Таким образом, цинкобераунит стал новым минеральным видом группы бераунита, утвержденным КНМНК (IMA 2015-117).

Мы же участвовали в открытии еще одного нового минерала группы, а также исследовали его высокомарганцевую разновидность [11, 12].

Элеонорит $\text{Fe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_4\text{O}(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ был найден А.Нисом еще в 1877 г. на железорудном месторождении Элеонорэ (Германия) и назван по месту находки [13]. И хотя его красно-коричневые таблитчатые кристаллы размером до 3.5 мм (рис.11) отличались от зеленых, темных сине-зеленых или зеленовато-серых иголок бераунита, его считали всего лишь продуктом изменения последнего при окислительных условиях, тем более что эти минералы часто встречаются в виде псевдоморфных сростаний. Таким образом, статус элеонорита в течение долгого времени оставался неопределенным, и его не включали в официальные минералогические справочники.

И действительно, чем может удивить элеонорит? В нем нет ничего, кроме железа (если не считать незначительной примеси Al и Mn). Казалось, шансов для места под солнцем у него нет. Мы решили разобраться, так ли это? Должна же быть причина, почему элеонорит отличается от бераунита физическими, оптическими и кристаллохимическими свойствами. И тут оказалось, что шансы все-таки есть.



Рис.11. Радиальные агрегаты кристаллов элеонорита. Ширина поля 2.5 мм [11].

Фото М.Буркхардта

Повторное структурное исследование бераунита, выполненное Муром, позволило ему предположить, что часть железа в минерале может быть двухвалентным и атомы Fe^{2+} и Fe^{3+} занимают разные позиции в структуре [7]. О том, что железо рознь и разновалентное железо принято считать разными элементами, мы писали ранее в «Природе»*.

Наше рентгеноструктурное исследование элеонорита из месторождения Ротлейфхен (Германия) выполнено с использованием дифракционных данных, полученных на современном дифрактометре SMART APEX2, который оснащен CCD-детекто-

ром [11]. Мы установили, что уточненная до R -фактора 6% структура исследованного минерала аналогична структуре бераунита (рис.12). Поскольку ионные радиусы Fe^{2+} и Fe^{3+} различны (0.61 и 0.55 Å соответственно), как и ожидалось, параметры элементарной ячейки элеонорита ($a = 20.694$, $b = 5.143$, $c = 19.236$ Å, $\beta = 93.52^\circ$, $V = 2044$ Å³) оказались меньше полученных для бераунита ($a = 20.760$, $b = 5.154$, $c = 19.248$ Å, $\beta = 93.55^\circ$, $V = 2055.4$ Å³), а среднее расстояние $M1-O$ уменьшилось от 2.110 Å в берауните до 2.034 Å в элеонорите. Таким образом, структурное исследование дало основание считать, что все M -позиции заняты преимущественно Fe^{3+} , а одна OH -группа заменена на O^{2-} . Мёссбауэровская спектроскопия подтвердила абсолютное преобладание трехвалентного железа во всех позициях структуры элеонорита. А это означало несомненный успех для нашего минерала.

У элеонорита его эмпирическая формула $(\text{Fe}_{5.76}^{3+}\text{Al}_{0.18}\text{Mn}_{0.09}^{3+})_{\Sigma 6.03}(\text{PO}_4)_{3.92}\text{O}(\text{OH})_{4.34} \cdot 5.98\text{H}_2\text{O}$ полностью соответствовала предсказанной ранее Муром [7] для возможного аналога бераунита с трехвалентным железом.

Частичное замещение Fe^{2+} на Fe^{3+} в окислительных условиях приводит к образованию большого количества ферро-феррифосфатов. В их числе упоминавшиеся выше метавивинит и ферроштрунцит. Полное окисление Fe^{2+} до Fe^{3+} , сопровождающееся замещением одной OH -группы на O^{2-} , происходит реже. Вероятно, элеонорит — трансформационный минерал, который образуется в результате природного твердофазного окисления бераунита, подобно ферриштрунциту $\text{Fe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, принадлежащему к иному структурному типу [14].

Группа известных фосфатных минералов, содержащих только трехвалентное железо в качестве видообразующего катиона, состоит из 12 представителей. Последним, двенадцатым, минералом как раз и стал элеонорит со структурным типом бераунита. Минерал утвержден КНМНК

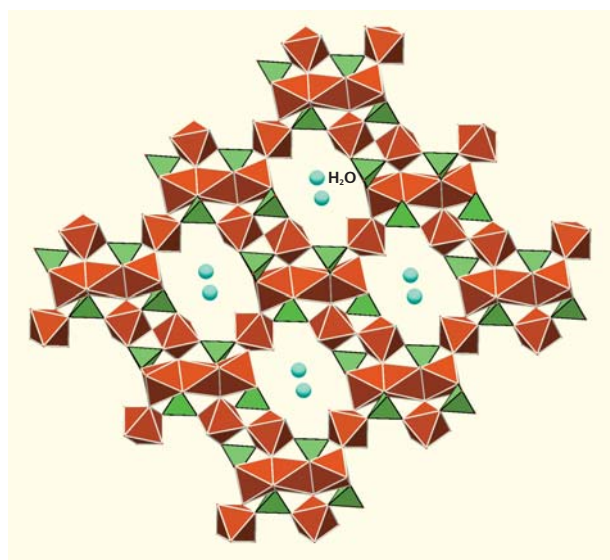


Рис.12. Гетерополиэдрический слой в структуре элеонорита с Fe^{3+} в октаэдрах.

* Расцветаева Р.К., Аксенов С.М. Возвращение на родину. Сиундаит — новый минерал из Хибинского массива // Природа. 2018. №8. С.18–23.

(IMA 2015-003) [11], а исследованные нами образцы из Германии хранятся в Минералогическом музее имени А.Е.Ферсмана под регистрационными номерами 4684.1 и 4684.2.

Окрыленные успехом, мы обратили внимание на элеонорит, обогащенный марганцем.

Мп-элеонорит происходит из пегматитов Баварии, где до 1984 г. добывался полевой шпат для производства фарфора. На этом месторождении найдено 20 фосфатных минералов. Многие из них претерпели изменения под действием дождевой воды, а вмещающие породы подверглись процессам окисления. В пустотах горных пород наряду с Мп-бераунитом был обнаружен и Мп-элеонорит в виде игольчатых волокнистых агрегатов золотистого и коричневатого цвета размером до 1.5 мм в длину (рис.13).

Методами рентгеноструктурного анализа нами был исследован образец элеонорита, обогащенный Мп, из месторождения Вайдхаус (Бавария). По цвету и структуре он похож на элеонорит, но в его эмпирическую формулу $(\text{Mn}_{0.58}^{2+}\text{Zn}_{0.13}\text{Mg}_{0.04}\text{Fe}_{5.24}^{3+})(\text{PO}_4)_4(\text{H}_2\text{O}, \text{OH}, \text{O})_9$ входит марганец, превышающий содержание других примесей (рис.13). Мы изучили структуру минерала, уточнив ее до *R*-фактора 5.2% с использованием 1994 отражений. Этот набор получен на современном высокоточном дифрактометре, оснащенный CCD-детектором. С помощью XANES-спектров (MnK, FeK), полученных на синхротроне ANKA (Karlsruhe Institute of Technology) на станции SUL-X, установили, что марганец находится в степени окисления +2, а железо +3 [12].

Несмотря на все усилия, на этот раз нас постигло разочарование. Хотя большинство минералов группы бераунита демонстрировало селективное накопление двухвалентных элементов в *M1*-позиции, а в нашем образце содержалось значительное количество Mn^{2+} , эти катионы разупорядочились по октаэдрическим *M*-позициям, не преобладая ни в одной из них. Все *M*(1–4)-октаэдры преимущественно заселены катионами Fe^{3+} , а *M1*-позиция наполовину заселена катионами Fe^{3+} и наполовину — Mn^{2+} (с примесью Zn^{2+} и Mg^{2+}) (рис.14).

Базируясь на новых данных, мы предполагаем, что Мп-элеонорит образовался как вторичный минерал в результате окисления Мп-бераунита,



Рис.13. Агрегаты Мп-элеонорита. Ширина поля 5 мм [11].
Фото С.Ревитзера

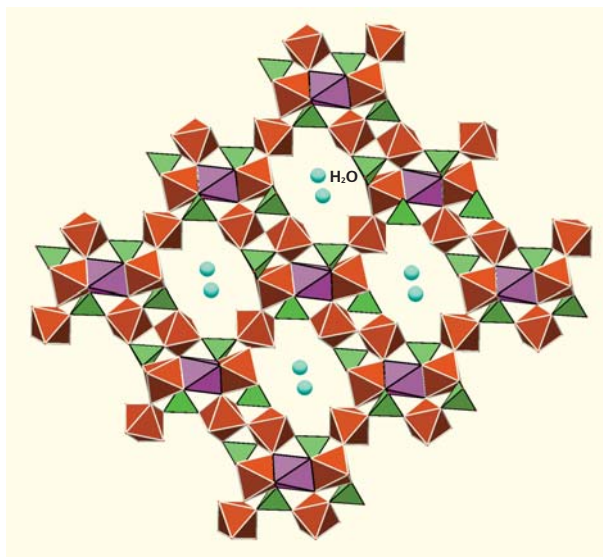


Рис.14. Структура Мп-элеонорита с атомами Мп в центральном октаэдре триплета.

в котором Mn^{2+} был изначально разупорядочен по октаэдрическим *M*-позициям.

В табл.1 приведены формулы и параметры элементарных ячеек в минералах группы бераунита.

Таблица 1

Параметры элементарных ячеек в минералах группы бераунита

Минерал	Формула	Параметры элементарной ячейки					Источник
		<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	β°	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	
Тврдунит	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.564	5.101	93.68	18.883	1976.7	[9]
Элеонорит	$\text{Fe}_6^{3+}(\text{PO}_4)_4\text{O}(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.679	5.148	93.574	19.223	2042.5	[11]
Цинкобераунит	$\text{Zn}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.836	5.162	93.252	19.250	2067.3	[10]
Бераунит	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.630	5.164	93.30	19.220	2044	[7]
Мп-бераунит	$\text{Mn}_{0.5}^{2+}\text{Fe}_{0.5}^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.760	5.154	93.55	19.248	2055.4	[8]
Мп-элеонорит	$(\text{Mn}_{0.58}^{2+}\text{Zn}_{0.13}\text{Mg}_{0.04})\text{Fe}_{5.25}^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH}_{4.7}\text{O}_{0.25}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20.832	5.157	93.01	19.200	2059.9	[12]

Мы видим зависимость размера ячеек от состава: наименьшие значения характеризуют Al-содержащий тврдыйт, а максимальные — бераунит. Примесь более крупного марганца в берауните и элеонорите увеличивает размеры их ячеек.

Все эти минералы (кроме элеонорита и его Mn-аналога) — ферро-ферри-соединения. Валентное состояние Fe в железистых фосфатах, содержащих триплеты, влияет на окраску минерала. Феррифосфаты — желтые, коричневые, красные и розовые, зеленовато-черные, они слабоплеохроичные. Их полностью окисленные аналоги — желтые до красно-коричневых — тоже слабоплеохроичны. Но смешанные ферро-феррифосфаты — темно-зеленые и чрезвычайно плеохроичные. Объясняется это тем, что цвет связан с электронными переходами атомов железа, которые формируют октаэдрические триплеты в *b*-кластерах, а также он зависит от степени их окисления. Так, голубой и зеленоватый соответствуют содержанию разновалентного железа в берауните, в то время как коричневый цвет отвечает трехвалентному состоянию железа в элеонорите. Кристаллы Mn-бераунита из Португалии — красные, скорее всего из-за большого количества Mn^{3+} .

Решающий фактор при определении статуса минерала — не столько повышенное количество элемента в брутто-составе, сколько его преобладание в отдельной позиции (одной или нескольких). Так важно поэтому надежно установить распределение элементов по позициям структуры. В табл.2 приведены составы катионов, доминирующих в ключевых позициях минералов группы бераунита.

Существует целый ряд ферро-феррифосфатов, близких по составу к рассмотренному семейству, но структуры у них иные. Например, **лаубманнит** $Fe_3^{2+}Fe_6^{3+}(PO_4)_4(OH)_{12}$, найденный в Арканзасе (США) и названный в честь немецкого геолога и минералога Г.Лаубманна [15], и **кидуэллит** $NaFe_3^{2+}(PO_4)_6(OH)_{10} \cdot 5H_2O$, названный в честь американского геолога А.Л.Кидуэлла [15], тоже относятся к волокнистым фосфатам железа (рис.15, рис.16). Однако в их структурах вместо триплетов содержатся димеры из соединенных гранями октаэдров железа и трех подвесных октаэдров. Таков и **какоксен** $(Fe^{3+}, Al)_{25}(PO_4)_{17}O_6(OH)_{12} \cdot 75H_2O$. Его название в переводе с греческого означает «плохой гость»: содержащийся в нем фосфор вредит качеству железа, которое производится из руды. Структура какоксена исследовалась П.Муром и Й.Шеном на образце из Арканзаса [16]. Было установлено, что три димера замыкаются в треугольное кольцо. Таким образом, все эти минералы к семейству бераунита не относятся.

Таблица 2

Распределение доминирующих катионов по позициям М-октаэдров в минералах группы бераунита

Минерал	M1	M2	M3	M4	Источник
Бераунит	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Fe_2^{3+}	Fe_2^{3+}	[6, 7]
Элеонорит	Fe^{3+}	Fe^{3+}	Fe_2^{3+}	Fe_2^{3+}	[11]
Цинкобераунит	$Zn_{0.675}Fe_{0.289}$	Fe^{3+}	$Fe_{1.9}Zn_{0.1}$	Fe_2^{3+}	[10]
Тврдыйт	$Fe_{0.92}^{2+}Zn_{0.08}$	$Al_{0.919}Fe_{0.081}^{3+}$	$Al_{1.34}Fe_{0.66}^{3+}$	$Fe_{1.36}^{3+}Al_{0.64}$	[9]
Mn-бераунит	$Fe_{0.8}Mn_{0.2}$	Mn	Fe_2	Fe_2	[8]
Mn-элеонорит	$(Fe^{3+}, Mn^{3+}, Zn, Mg)$	Fe^{3+}	Fe_2^{3+}	Fe_2^{3+}	[12]



Рис.15. Лаубманнит. Месторождение Йорк Майн (York Mine), Арканзас, США. Длина образца ФМ (№80260) 10 см.

Фото А.А.Евсеева



Рис.16. Зеленые сферолиты кидуэллита. Арканзас, США. Длина образца 4 см.

Фото: Р.Лавински (Robert Lavinsky / iRocks.com photo)

Вместо заключения

История открытия и исследования бераунита насчитывает без малого 200 лет, а его близкие родственники долгое время считались разновидностями. Однако этот структурный тип оказался наиболее продуктивным для образования новых минеральных видов.

Недавно было установлено три новых минерала, изоструктурных с бераунитом. В их числе и элеонорит. И хотя формально группы бераунита пока нет (она не утверждалась КНМНК ММА), фактически новая группа с большим разнообразием состава ее членов (см. табл.1) уже существует и будет пополняться в дальнейшем. А узаконить ее — дело времени. ■

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части сравнительного кристаллохимического анализа минералов и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-29-12005) в части сбора материалов по фосфатным железистым минералам.

Литература / References

1. Moore P.B. The basic ferric phosphates: a crystallochemical principle. *Science*. 1969; 164: 1063–1064.
2. Moore P.B. Crystal chemistry of the basic iron phosphates. *American Mineralogist*. 1970; 55: 135–169.
3. Redhammer G.J., Tippelt G., Roth G. *et al.* Structure and Mossbauer spectroscopy of barbosalite $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$ between 80 K and 300 K. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2000; 27: 419–429.
4. Frondel C. The dufrénite problem. *Amer. Miner.* 1949; 34: 513–540.
5. Breithaupt A. *Vollständiges Handbuch der Mineralogie*. Arnoldische Buchhandlung, 1841; 2.
6. Fanfani L., Zanazzi P.F. The crystal structure of beraunite. *Acta Cryst.* 1967; 22: 173–181.
7. Moore P.B., Kampf A.R. Beraunite: refinement, comparative crystal chemistry, and selected bond valences. *Zeit. Krist.* 1992; 201: 263–281.
8. Marzoni Fecia di Cossato Y., Orlandi P., Pasero M. Manganese-bearing beraunite from Mangualde, Portugal: mineral data and structure refinement. *Can. Miner.* 1989; 27: 441–446.
9. Sejkora J., Grey I.E., Kampf A.R. *et al.* Tvrdýite, $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{Al}_3(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new phosphate mineral from Krásno near Horní Slavkov, Czech Republic. *Miner. Mag.* 2016; 80: 1077–1088.
10. Chukanov N.V., Pekov I.V., Grey I.E. *et al.* Zincoberaunite, $\text{ZnFe}_3^{3+}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new mineral from the Hagendorf South pegmatite, Germany. *Miner. Petrol.* 2016; 111: 351–357.
11. Chukanov N.V., Aksenov S.M., Rastsvetaeva R.K. *et al.* Eleonorite, $\text{Fe}_6^{3+}(\text{PO}_4)_4\text{O}(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: validation as a mineral species and new data. *Miner. Mag.* 2017; 81: 61–76.
12. Aksenov S.M., Chukanov N.V., Göttlicher J. *et al.* Mn-bearing eleonorite from Hagendorf South pegmatite, Germany: crystal structure and crystal-chemical relationships with other beraunite-type phosphates. *Zeit. Krist.* 2018; 233(7): 461–477.
13. Nies A. Strengit, ein neues Mineral. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Palaeontologie*. 1877; 8–16.
14. Peacor D.R., Dunn P.J., Simmons W.B., Ramik R.A. Ferristrunzite, a new member of the strunzite group, from Blaton, Belgium. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*. 1987; 433–440.
15. Kolitsch U. The crystal structure of kidwellite and “laubmannite”, two complex fibrous iron phosphates. *Miner. Mag.* 2004; 68(1): 147–165.
16. Moore P.B., Shen J. An X-ray structural study of cacoenite, a mineral phosphate. *Nature*. 1983; 306: 356–358.

Beraunite and Its Team: the History of Discovery of a New Mineral Eleonorite

R.K.Rastsvetaeva¹, S.M.Aksenov¹

¹*Sbubnikov Crystallography Institute, RAS (Moscow, Russia)*

Many phosphate minerals have iron in their composition. Iron atoms form octahedra which are combined into three-dimensional structures using phosphoric P-tetrahedra. Mostly Fe-octahedra are isolated from each other but in some minerals they can be combined by corners or edges, forming clusters or chains. The most stable groups are linear octahedral trimers. They are complicated by four cornersharing octahedra, so-called “b-clusters”. A lot of various structures of different types are forming from these clusters, and minerals and with different composition of octahedra are included in the structural type of beraunite. The studied by us eleonorite $\text{Fe}_6^{3+}(\text{PO}_4)_4\text{O}(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ from the Rotläufchen mine (Germany) is among them. Eleonorite is a new “transformational” mineral formed as a result of natural solidstate oxidation of beraunite and is its Fe^{3+} -analogous.

Keywords: eleonorite, beraunite, beraunite group, ferric phosphates, single crystal X-ray analysis, crystal structure, b-cluster.

Секреты географии микробных сообществ Земли

А.В.Якушев

Факультет почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

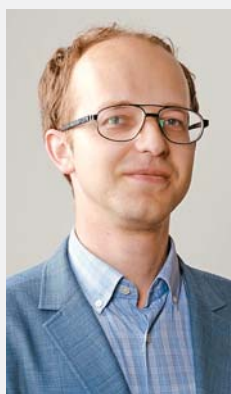
В статье кратко обсуждены результаты первого детального исследования микробиома почв Земли. Автор, обращаясь к массиву опубликованных данных, показывает интересные закономерности, выявленные благодаря работе международной исследовательской группы, но совершенно не обсужденные ее участниками в силу определенной направленности задач их исследования.

Ключевые слова: микробиом почв, почвенные бактерии, почвенные грибы, функциональные гены, гены антибиотикоустойчивости, функциональное разнообразие микробного сообщества, природно-климатические зоны.

Общеизвестно, что в наземных экосистемах тропиков (особенно в дождевых лесах) разнообразие животных и растений выше, чем в других климатических поясах нашей планеты. Служат ли и почвы этих биотопов столь же богатым хранилищем разнообразных и уникальных микроорганизмов? Ответ на этот вопрос имеет и фундаментальное, и прикладное значение, так как исследователям-микробиологам необходимо знать, в почвах каких природных зон стоит искать новые виды бактерий или грибов для их использования в биотехнологии (например, для производства новых антибиотиков). Но глобальные закономерности географии распространения микроорганизмов изучены пока довольно слабо. Поэтому в последние десятилетия специалисты прикладывают немало усилий для того, чтобы разобраться в этом непростом вопросе. Чрезвычайно информативными оказались молекулярно-генетические методы, которые не требуют выделения и культивирования микробов (в частности, метагеномный анализ их сообществ, т.е. изучение совокупности всех находящихся в исследуемом образце генов по извлеченной из него ДНК). Благодаря данному подходу сегодня можно составить картину распространения в почвах Земли микроорганизмов и генов, отвечающих за выполнение микроорганизмами биосферных функций.

В поиске глобальных подробностей

Для тех, кто бьется над разгадкой секретов микробиома почв, интересной оказалась статья междуна-



Андрей Владимирович Якушев — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник кафедры биологии почв факультета почвоведения Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — экология почвенных микроорганизмов, изучение временных микробных ассоциаций, возникающих в ходе зоомикробных, микробно-растительных, межмикробных взаимодействий в почве.
e-mail: a_yakushev84@mail.ru

родной исследовательской группы Мухаммеда Бахрама (Тартуский университет, Эстония), опубликованная в журнале «Nature» в октябре 2018 г. [1]. Работа коллег посвящена влиянию факторов окружающей среды на таксономический состав микробных сообществ и распространение генов грибов и бактерий в образцах верхних горизонтов зональных (не нарушенных человеком) почв Земли (рис.1). Названные группы микроорганизмов в наибольшей степени влияют на основные биогеохимические процессы.

Авторы впервые обобщили результаты метагеномного анализа почв большинства природных зон. Видовую принадлежность бактерий ученые определяли по видоспецифическим участкам гена, кодирующего синтез 16S* рРНК — одной из трех молекул РНК, расположенной на малой субъединице рибосомы. Грибы идентифицировали по фрагментам гена 18S РНК и ITS — некодирующей нуклеотидной последовательности ДНК, которая разделяет гены рибосомных РНК.

* Единица измерения S (сведберг) — это отношение скорости осаждения частиц в воде к центробежному ускорению в центрифуге.

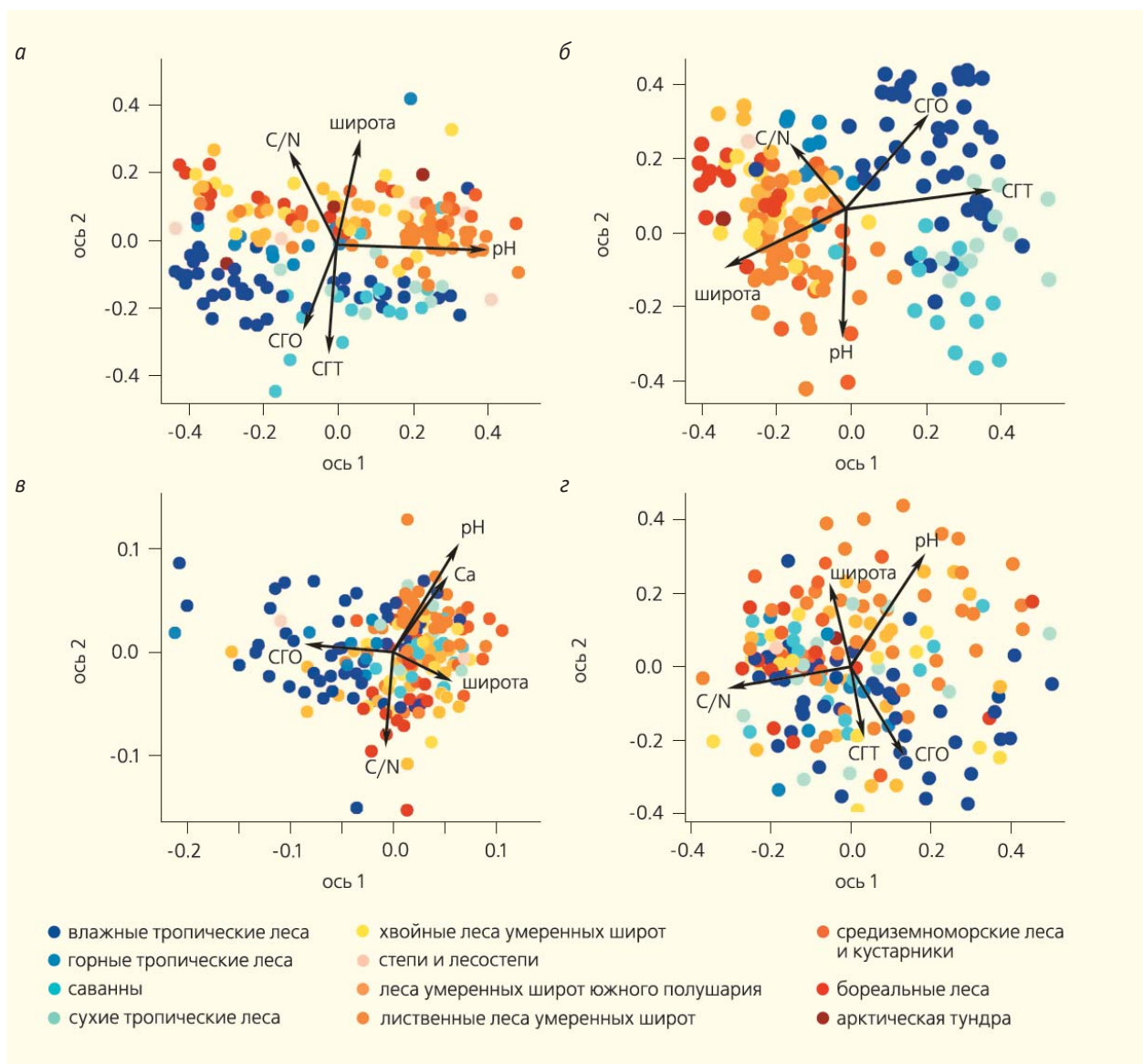


Рис.1. Результаты анализа метагеномных данных о грибных и бактериальных сообществах почв Земли методом многомерного шкалирования (по [1]). Проанализированы следующие показатели: а — таксономический состав бактериальных сообществ, б — таксономический состав грибных сообществ, в — состав функциональных генов бактериальных сообществ, г — состав функциональных генов грибных сообществ. Стрелками показана направленность увеличения значения фактора (признака данного типа почв или природно-климатической зоны). СГТ — среднегодовая температура; CГО — среднегодовые осадки.

Примечательно, что выводы, приведенные авторами глобального исследования, традиционны, т.е. в целом подтверждают классические научные представления. Так, отмечено, что условия окружающей среды влияют на состав микробных генов сильнее, чем географическое местоположение; в условиях умеренного климата бактериальное генетическое разнообразие выше грибного; грибы и бактерии занимают разные экологические ниши, так как зависимость их разнообразия от количества атмосферных осадков и pH почвы неодинакова. Кроме того, ученые выявили положительную корреляцию обилия бактериальных

генов устойчивости к антибиотикам и обилия грибов, а это свидетельствует о том, что антагонизм между названными группами микроорганизмов сильно влияет на микробные сообщества верхних горизонтов почв (рис.2). Наконец, вполне тривиальным кажется следующий вывод: межвидовая конкуренция и факторы окружающей среды во многом определяют обилие, состав и функции бактериальных и грибных сообществ.

Однако, анализируя полученные данные с позиции влияния условий окружающей среды на почвенные микробные сообщества, исследователи не увидели некоторых глобальных закономерностей

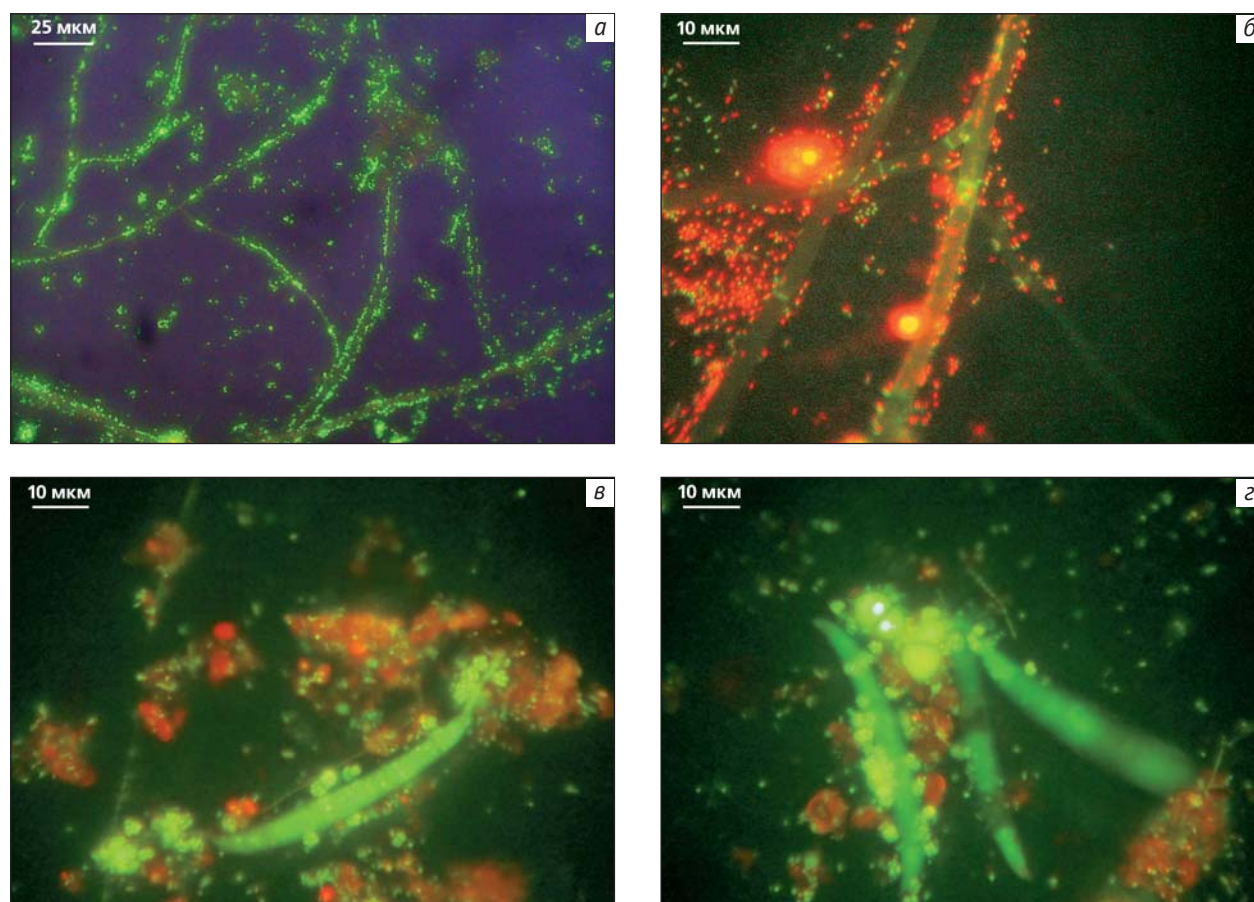


Рис.2. Характер расселения микроорганизмов в почве и взаимодействие грибной и бактериальной составляющих почвенного микробиома можно хорошо представить, рассматривая под микроскопом пластинки обрастания Росси-Холодного (в данном случае заложенные в кленовый опад Ботанического сада МГУ). На фотографиях показаны ассоциация почвенных бактерий, разлагающих мертвый грибной мицелий (а, б), и микроколонии прокариот, ассоциированные с живыми спорами гриба (в, г). Прижизненная окраска клеток прокариот проведена: а — флуоресцентным красителем Syto 9; б–г — флуоресцентным красителем акридином оранжевым.

в составе микробиомов разных природных зон, так как это не входило в задачи исследования. Между тем результаты анализа метагеномных данных методом многомерного шкалирования* позволили выявить степень сходства таксономического состава и функциональных генов бактериального и грибного почвенных сообществ в разных природно-климатических поясах Земли (см. рис.1).

* Многомерное шкалирование — метод математического анализа данных, определяющий направления (оси), вдоль которых наблюдается наибольшее расстояние между объектами исследования (микробными комплексами почв) в многомерном пространстве, где каждое измерение — это один из используемых в анализе параметров (ОТЕ или ген). Биологический смысл осей определяется по силе их корреляции с этими параметрами или другими показателями, которые потенциально могут влиять на объекты исследования (рН почвы, C/N и т.д.). Метод позволяет получить наглядный двухмерный график сходства и различий между собой объектов исследования (микробных сообществ) по большому числу характеризующих их параметров.

Иногда данные говорят сами за себя

Анализ рис.1,а позволяет сделать вывод, что бактериальные комплексы почв Земли подразделяются на две глобальные группы (тропическую и внутритропическую), между которыми есть принципиальные различия, связанные с особенностями таксономического состава. Грибные же почвенные комплексы по таксономическому составу подразделяются уже на три глобальные группы: сообщества влажных тропиков, сухих тропиков, внутритропической зоны (рис.1,б). Комплексы функциональных генов микроорганизмов различаются не так сильно, как таксономический состав их сообществ (рис.1,в,г). Но все же в тропических почвах набор генов, ответственных за биосферные функции бактерий и грибов, имеет особые черты, не совпадающие с тем, что мы видим во внутритропических почвенных микробных комплексах.

Причины глобального отличия почвенных микробных сообществ тропиков от внутритропиче-

ских пока не изучены, так как Бахрам с соавторами не рассматривали графики в подобном аспекте. К каким же заключениям можно прийти, анализируя приведенные в статье данные? Прежде всего, обнаруженная картина не обусловлена варьированием обилия типов бактерий и классов грибов, населяющих тропические и все прочие природно-климатические пояса Земли; нет связи и с генетическим разнообразием грибов и основными метаболическими путями бактерий. Особенно важно отметить, что в тропиках (даже в дождевых лесах) таксономическое и генетическое грибное и бактериальное разнообразие не намного богаче, чем во внетропических зонах (рис.3). В чем же секрет глобальных различий микробных сообществ почв, функционирующих в этих биоклиматических условиях? Скорее всего — в существовании специфичных для тропического пояса видов или родов микроорганизмов и конкретных генов. Как говорится, дьявол прячется в деталях.

Несомненно, сильная сторона работы коллег — в том, что они детально изучили, как именно разнообразие бактериальных генов устойчивости к антибиотикам связано с действующими на микробные сообщества биотическими и абиотическими факторами (к сожалению, грибы в этом аспекте не оценивали). Особый интерес вызывает график корреляционной тепловой карты (рис.4), отражающей взаимосвязь между количеством генов антибиотикоустойчивости и разнообразием типов микроорганизмов. Авторы заключили, что обилие таких генов растет при увеличении разнообразия грибов, в первую очередь сумчатых (особенно тех групп, среди представителей которых много продуцентов антибиотиков).

Со своей стороны отмечу: в массиве данных, представленных коллегами (рис.4), выделяются две группы функциональных генов и две группы филумов (типов) микроорганизмов, о которых следует сказать особо. Число бактериальных генов резистентности к антибиотикам, относящихся

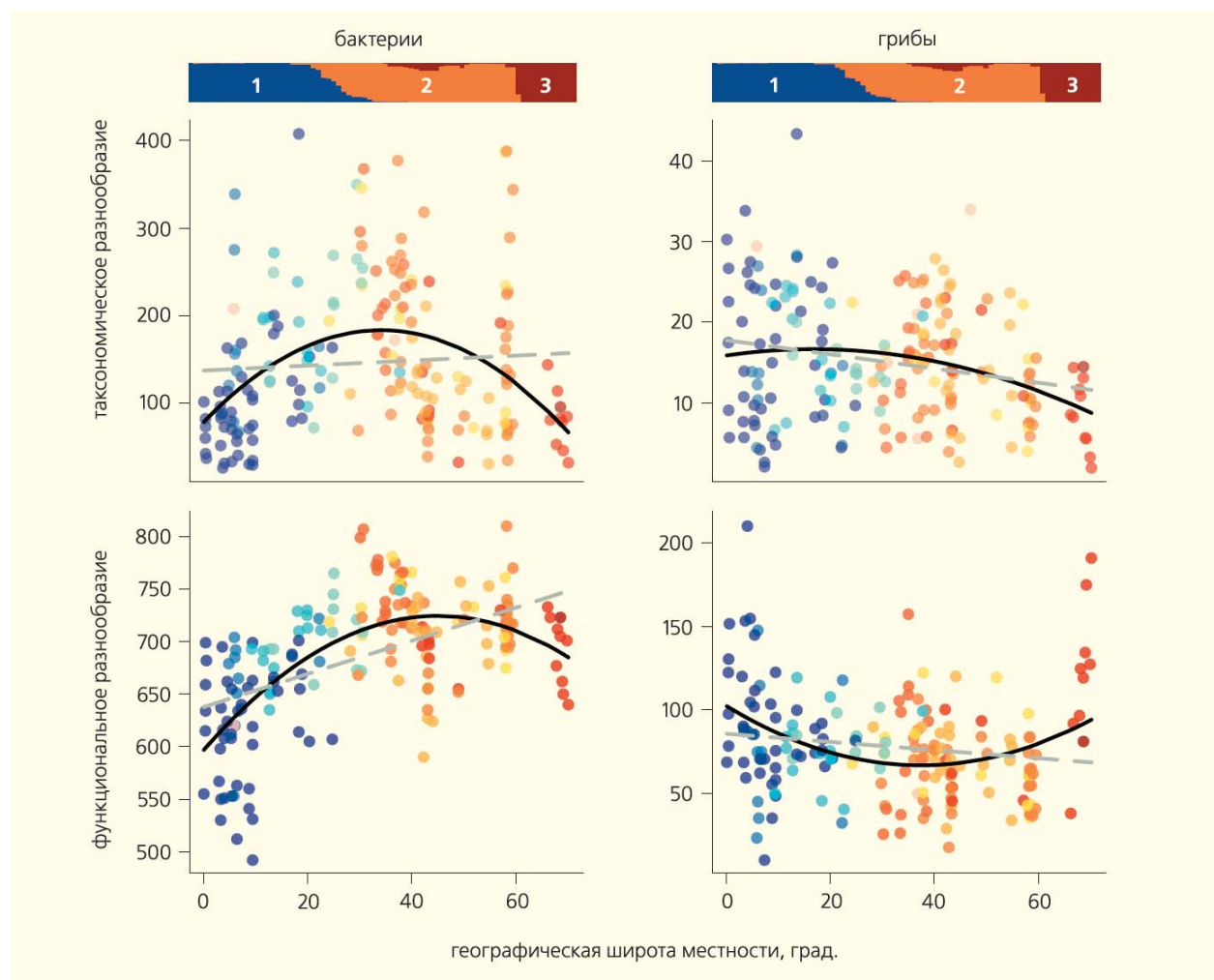


Рис.3. Изменение грибного и бактериального разнообразия в зависимости от широты региона. Условные обозначения те же, что на рис.1 (по [1]). Зоны: 1 — тропическая; 2 — умеренная; 3 — бореальная и арктическая.

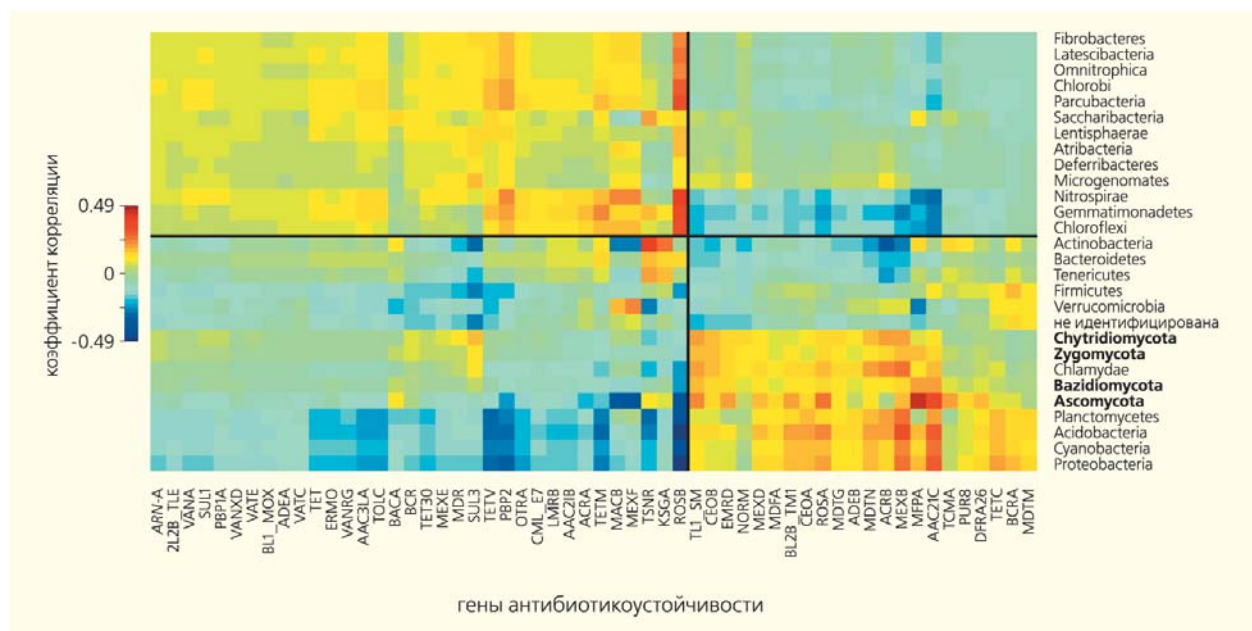


Рис.4. Корреляционная тепловая карта для генов антибиотикоустойчивости основных типов почвенных грибов (выделено жирным шрифтом) и бактерий (по [1], с изменениями — график разделен на четыре сектора, пояснение в тексте).

ся к первой группе, положительно коррелирует с количеством не только грибов, но и бактерий, относящихся к самым распространенным в почве типам (*Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria*, *Planctomycetes*, *Cyanobacteria*, *Bacteroides*, *Firmicutes*), и отрицательно коррелирует с обилием редких для почвы типов бактерий (*Nitrospirae*, *Verrucomicrobia*, *Chloroflexi*, *Aquificae* и др.). А для бактериальных генов антибиотикоустойчивости, принадлежащих ко второй группе, складывается противоположная картина корреляции. О чем это может свидетельствовать? По-видимому, упомянутые группы бактерий имеют взаимоисключающие

спектры генов устойчивости к антибиотикам. Однако причина явления пока не ясна. Может быть, эти группы занимают в почве разные микроместообитания, с разными «соседями», и для обороны им нужны совершенно особые гены? Но без детального анализа состава последних судить о механизмах трудно.

К тому же не будем забывать, что формальное установление корреляции между признаками еще не означает доказательства причинно-следственных связей. Несомненно, их детальный анализ — предмет дальнейших исследований, в которых было бы очень интересно принять участие. ■

Статья подготовлена в рамках темы госзадания №115122210098-2 «Роль геохимической деятельности почвенных микроорганизмов в поддержании стабильности наземных экосистем».

Литература / References

1. Babram M., Hildebrand F., Forslund S.K. et al. Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature*. 2018; 560 (7717): 233–237. Doi:10.1038/s41586-018-0386-6.

Secrets of Geography of Microbial Communities of the Earth

A.V.Yakushev

Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The article briefly discusses the results of the first detailed study of soil microbiome. The author, referring to the array of published data, shows interesting patterns identified through the work of the international research group. Unfortunately, these patterns were not discussed by the group of scientists, because of a certain focus of their tasks, which did not involve knowledge of the specifics of microbial soil communities.

Keywords: soil microbiome, soil bacteria, soil fungi, functional genes, antibiotic resistance genes, functional diversity of microbial community, natural climatic zones.

Монгольские заметки, или В стране древней животноводческой культуры

Ю.А.Столповский¹, Ю.Я.Якель²

¹Институт общей генетики имени Н.И.Вавилова РАН (Москва, Россия)

²Автономная некоммерческая организация «Центр по сохранению биоразнообразия, традиционных знаний, развитию гастрономической культуры, здорового образа жизни и правового просвещения «Хранители» (Москва, Россия)



Изучение породного разнообразия и генофонда домашних животных Средней Азии, начатое российскими генетиками в первой половине XX в., возобновлено в наши дни. Статья рассказывает о состоявшейся в 2017 г. животноводческой экспедиции в Монголию и о людях этой страны, принявших живое участие в полевых работах российских ученых. Отбор проб крови животных позволил создать уникальный генетический банк для оценки качества селекционного материала, которым располагают монгольские скотоводы.

Ключевые слова: пастбищное животноводство, породное разнообразие, генофонд домашних животных, животноводческая экспедиция.



Юрий Анатольевич Столповский, доктор биологических наук, заместитель директора по науке, заведующий лабораторией сравнительной генетики животных Института общей генетики имени Н.И.Вавилова РАН. Постоянный автор «Природы». Научные интересы — сохранение породного разнообразия и генофондов домашних животных, генетика животных.
e-mail: stolpovsky@mail.ru



Юлия Яковлевна Якель, член Общественного экспертного совета Комитета по делам национальностей Государственной думы РФ. Директор Центра «Хранители». Научные интересы — сохранение биоразнообразия, права коренных малочисленных народов на традиционное природопользование.
e-mail: uyakel@mail.ru

Идея совершить экспедицию из Москвы в Монголию на автомобиле вызвала в нашем окружении неоднозначную реакцию. Кто-то, явно «неэкспедиционных кровей», иронически спросил, не жаль ли нам, «стойким оловянными солдатами», бить машину по российским, да еще и по монгольским дорогам. Вспомнили и понатыканные всюду камеры слежения, и ненавязчивый придорожный сервис. Маршрут Москва—Ташанта—Москва — это около 9 тыс. км, плюс рабочие переезды в Монголии — еще 3 тыс. км. Итого нам предстояло преодолеть около 12 тыс. км. Да мало ли что может случиться в пути! Но два довода перевесили все сомнения. Первый — финансовый: затраты на автопробег значительно меньше, чем стоимость билетов на самолет вкупе с арендой машины на месте. Второй — эмоциональный: увидеть в путешествии добрую половину нашей огромной страны, от Москвы до Алтая, — давняя мечта, которую наконец-то удастся осуществить. Казань, Уфа, Ишим, Барнаул, Горно-Алтайск, Кош-Агач... Перечисление основных стоянок звучало, как сказочное заклинание перед невероятным приключением. Неужели?! Да, на самом деле... едем.

Здесь и далее
фото Д.В.Щепоткина

© Столповский Ю.А., Якель Ю.Я., 2018

Длинная дорога к Золотому Алтаю. Ради чего?

Продукция животноводства составляет 80% всего экспорта Монгольского государства, 64% населения страны заняты в этой отрасли. На первом месте по экспортной выручке — продажа шерсти, на втором — скота. По его поголовью на душу населения (12-30 животных на одного человека) Монголия — мировой лидер. Больше всего здесь овец и коз: на каждый из видов приходится в среднем по 43% всего поголовья сельскохозяйственных животных. Оставшиеся 14% представлены крупным рогатым скотом и яками (7%), лошадьми (6%), верблюдами (1%) [1].

Пастбищное животноводство — древнейшая отрасль народного хозяйства Монголии. Именно здесь сконцентрирован опыт многих поколений скотоводов. Природные условия способствуют ведению преимущественно кочевой жизни, которая требует разведения домашних животных с определенными генофондами. Наши исследования связаны с рядом фундаментальных направлений: сохранением и управлением генофондами, природо-

оохранной генетикой, геногеографией, изучением коэволюции, филогенеза, жизнеспособности и продуктивности домашних животных. Объектами изысканий экспедиции должны были стать основные виды домашнего скота: овца, коза, лошадь, корова, yak. Цель — изучить их породное разнообразие, генофонд монгольских пород и сравнить полученные результаты с данными, имеющимися в генетическом банке Института общей генетики имени Н.И.Вавилова [2]. Мы планировали собирать биологические образцы в многочисленных аймаках* и сомонах** Монголии, а это означало, что в день необходимо преодолевать в среднем 900 км.

Путешествие на автомобиле, безусловно, имеет свои плюсы и минусы. За окном километр за километром проплывают разнообразные природные ландшафты. В селениях с говорящими названиями Вперед, Хомяки, Хреново, Веселая Жизнь, Неудачино, Долина Свободы так и хочется приоткрыть и пообщаться с жителями. Однако работа не позволяет: выбежав из графика, и потом ищи-свищи в степи друзей-монголов.

Позади Нижегородская область, Татарстан, Башкирия, гостеприимный Алтай... Проехав по Чуйскому тракту — одной из красивейших дорог России, — ясно осознаешь, что в такой стране можно и нужно с детства воспитывать путешественников. А еще испытываешь разочарование от того, что не найдешь в этих местах, как ни высматривай, простую вывеску «Местные продукты», за которой по существу скрываются и история, и экономика, и философия, и здоровье, и вкус человеческой жизни... Очень хотелось попробовать что-нибудь оригинальное, национальное, но увы: засилье трансграничных товаров удручало. Где же исконные российские продукты — морс, сбитень, квас, ряженка, пряники, блины, расстегаи и кулебяки? Невольно напрашиваются аналогии с русскими породами домашних животных, утраченными в последние десятилетия.

С такими мыслями мы домчались до российско-монгольской границы. Экспедиции предстояло взять биопробы, сфотографировать и описать фенотипы неведомых нам пород домашних животных.

Монголия манила своими просторами. Нам казалось, что мы достаточно серьезно подготовились к работе. Надежная машина, хорошая палатка, экспедиционная одежда и даже газовая плитка прилагались к классическому продуктовому набору — макароны, тушенка и сгущенка. Что еще нужно для полного счастья? «Берите с собой не одно, а два запасных колеса. А кровохлёбку купили?», — это первое, что мы услышали от наших алтайских



Маршрут животноводческой экспедиции сотрудников Российской академии наук в Монголию.

* Аймак — административно-территориальная единица в Монголии, примерно соответствующая области в Российской Федерации. В Монголии насчитывается 21 аймак.

** Сомон — составная часть аймака, единица территориального деления. В 2005 г. в стране было 330 сомона.



Аймак Баян-Улгий (Баян-Улэгэйский). Место обитания овец породы керей.



Лог Тохой. Аймак Ховд (Кобдоский). Здесь мы видели монгольских пастушьих собак.

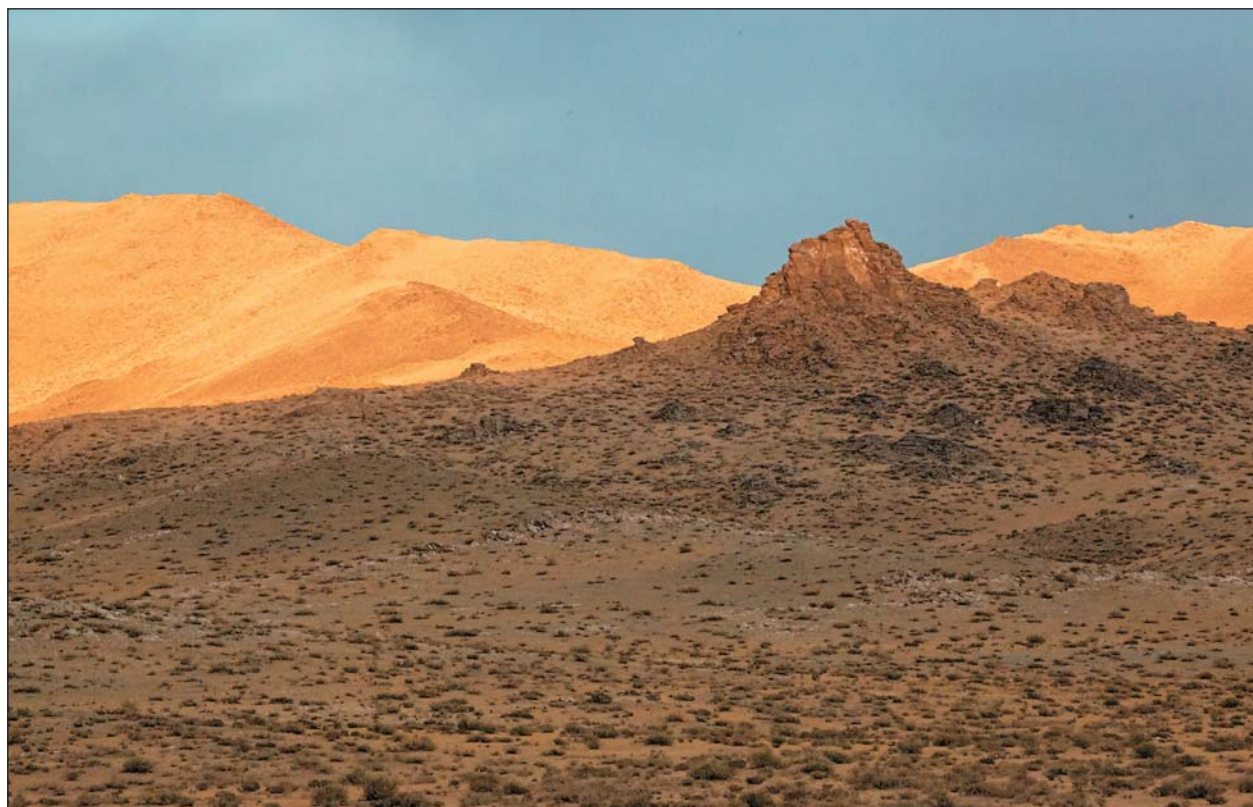
друзей. Кровохлёбка лекарственная, или железистая (*Sanguisorba officinalis*), — многолетнее травянистое растение из рода кровохлёбок семейства розовых и первое лекарственное средство в экспедиции. У этой травы огромное количество невероятных названий: кровососка, луговка, мышьяк, наголоватень, огорошник, простудная трава, сухозолотица, трудница, ужачье зелье и т.д. Экстракты и отвары из нее обладают бактерицидным, вяжущим и сильным кровоостанавливающим действием. Их применяют при различных желудочно-кишечных заболеваниях.

6 сентября 2017 г., запасшись кровохлёбкой (но не купив второго запасного колеса), мы пересекли границу и поехали в сомон Дэлун аймака Баян-Улгий, где нас ждало знакомство с овцами породы керей. Через первые 10 км стало понятно, почему в Москве нам не стали устанавливать в навигатор карту дорог этой страны. Специалисты сформулировали причину отказа кратко и емко: «Бессмысленное занятие, проверено на практике». Да, Монголия обладает прекрасными дорогами, но есть здесь и другая реальность — «без дорог», — где ездят не по указателям, а по направлениям. Кстати, данный факт привлекает туристов-экстремалов, которые любят погонять по бездорожью. Главное отличие от российских трасс: здесь нет ни камер, ни жезлов, а стоянки для отдыха кругом природные, на любой вкус. Проехав не одну тысячу километров, невольно захочешь написать оду монгольским дорогам.

Во-первых, может быть несколько, хоть десяток дорог проложено-наезжено в одном направлении. Во-вторых, зачастую они расходятся веером, а потом соединяются через несколько, а то и через десятки километров. И одновременно встречаются дороги, которые уводят в совсем иные, не нужные вам края, но вы долго об этом не догадываетесь, а осознаете, лишь преодолев большой отрезок пути. Если нет дождя, настраивайтесь на дорожную пыль — неотъемлемую часть монгольских странствий. Дороги бывают асфальтовые и проселочные: грунтовые, травянистые, песчаные и даже водяные, проложенные по руслу ручьев. Особенно коварны каменистые и гравийные: на первых довольно часто повреждаются автомобильные шины, даже самые современные, адаптированные к бездорожью; вторые опасны незаметными прогибами, в которых машина на скорости внезапно закапывается капотом вниз, а затем, как на трамплине, летит вверх и бьется о землю, подбрасывая до потолка плохо закрепленный скарб и перепуганных пассажиров. Однако все эти сюрпризы — ничто по сравнению с творениями природы Золотого Алтая. Бирюзовые, красные, зеленые, коричневые, голубые, оранжевые горы... Непередаваемые краски горных пейзажей, которые когда-то увидел и воспел в своих полотнах великий Николай Рерих. Перед глазами тысячи реальных картин — от невероятных, инопланетных до нежно-пастельных, трогательных и прекрасных в своей земной простоте.



Монгольские дороги расходятся и сходятся за горизонтом...



Золотые вершины Монголии.



Пастельные краски гор по маршруту Дэлун—Ховд—Алтай.



Масти коз породы алтай-улан.

И вот позади самая живописная дорога экспедиции — от сомона Дэлуун к Ховду*, где нас ждут монгольские яки и козы породы алтай-улан. Здесь встречаются животные всевозможных мастей — черные, белые, серые, рыжие, различных оттенков коричневого, с удивительными формами рогов. Из этого морфологического разнообразия нужно выделить фены, или дискретные морфологические признаки, чтобы затем посчитать их концентрацию, коэффициенты разнообразия, оценить различия и сходство. Со стороны, возможно, кажется смешным, когда взрослые люди гонятся за козами и овцами, пытаясь разглядеть их анфас и в профиль. На деле же мы получили уникальный материал о фенотипической изменчивости монгольских пород.

Постепенно в экспедиции сложился определенный ритм. Добираемся до конкретного места, где разводят ту или иную породу сельскохозяйственных животных. Договариваемся с местными администрациями, фермерами, ветеринарами и берем пробы крови у типичных представителей интересующей нас породы. Но прежде чем взять биоматериал, надо подробно рассказать о сути нашей работы местным товарищам. А она только на первый взгляд проста. «Зачем вы приехали из далекой России и берете кровь, описываете животных?» — спрашивали почти во всех сомонах и юртах.

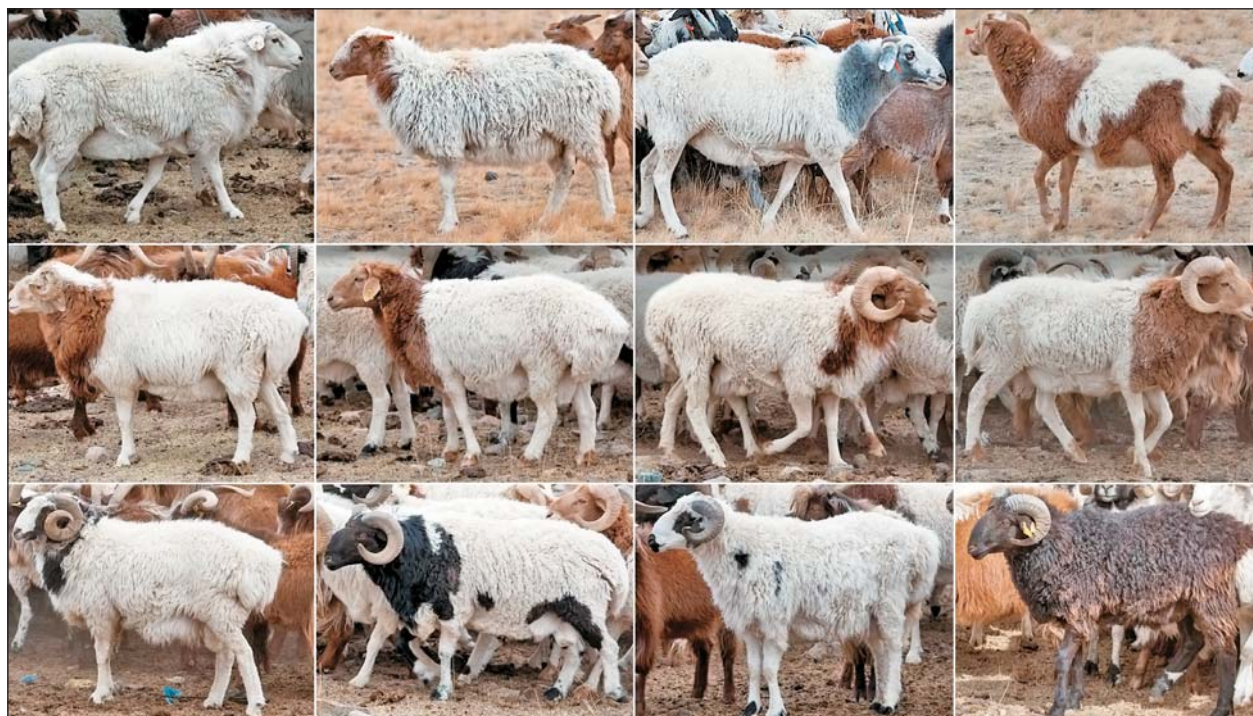
* Ховд — единственный сомон монгольского аймака Ховд, большинство населения которого составляют казахи (96%). — *Примеч. ред.*

Отбор проб — основа изучения генофондов

История наших изысканий восходит к 1926 г., когда по инициативе выдающихся генетиков Ю.А.Филипченко и Ф.Г.Добжанского на средства Комиссии по изучению естественных производительных сил России** были организованы первые исследования пород домашних животных Средней Азии и Казахстана [3]. Затем экспедиции стали работать и в Монголии [4]. Животноводство этой страны, как и Саяно-Алтайского региона России, в целом представляло интерес для биологов и генетиков, но в большинстве случаев оно не стало объектом систематического генетического мониторинга.

Теперь наша основная общепрограммная задача — с помощью ДНК-маркеров определить, с каким (или какого качества) селекционным материалом мы имеем дело сегодня. Порода перед нами или нет? Для этого необходимо охарактеризовать генетическую и фенотипическую структуру животных, проанализировать филогенетические связи и, наконец, попытаться найти специфические гены продуктивности, адаптивности и жизнеспособности. Этап отбора проб всегда

** Комиссия по изучению естественных производительных сил России (КЕПС) — самое крупное научное учреждение Академии наук первой трети XX в. Создана в 1915 г. при Петербургской академии наук по инициативе В.И.Вернадского для изучения природных ресурсов страны. — *Примеч. ред.*



Масти овец породы гоби-алтай.

очень важен, так как именно в экспедиции закладывается фундамент будущих исследований.

Отбор крови у разных видов животных происходит по разным сценариям. Легче всего работать с козами и овцами. С опаской мы ждали встречи с местными яками (*Bos grunniens*). Эти могучие представители рода настоящих быков одомашнены более 7000 тыс. лет назад, скорее всего на территории Тибета [5]. Опыт работы с ними в России подсказывал, что могут возникнуть самые неожиданные ситуации, ведь животные полудикие и большую часть времени проводят на высокогорных пастбищах без ежедневного контакта с человеком. Однако опасения оказались напрасными: яков в Монголии доят, и стадо, в котором мы брали кровь, оказалось на редкость миролюбивым, а яководы угостили нас вкуснейшим сквашенным молоком и нежнейшими сливками, напоминающими и кефир, и простоквашу, и йогурт одновременно.

В начале второй декады сентября экспедиция достигла города Олгий (Ульгий), в окрестностях которого обитает порода коз с соответствующим названием улан ульгий.

Стоит заметить, что перед совместной работой нужно не только пообщаться с хозяевами, но и, согласно обычаю, попить чаю в юрте, отведать местные гастрономические деликатесы: как правило, боорцог — небольшие кусочки теста, обваренные в бараньем жиру, и обязательно аруул, или грут, — кусочки засушенного творога. Гостеприимство монголов всегда было на высоте. «Чем



Процедура отбора крови для генетического банка.



Разнообразие масти яков (*Bos grunniens*).

цивилизированной человек, тем он менее человек», — сказал нам один из руководителей крупного аймака. Спорить мы не стали. Кочевники редко видят людей — отсюда их огромное желание пообщаться, принять у себя гостей.

На этот раз для того чтобы взять кровь у 50 животных, нам пришлось объехать пять семей (юрт), везде попить чай, кое-где и с архи (водкой, сделанной на основе молока), и поесть вареной баранины. Последние 10 образцов крови



Женщина-пастух для просторов Монголии — обычное явление.

брали в кромешной темноте, при этом было очень жаль молодую симпатичную девушку-ветеринара. Если перефразировать известную фразу про поэта и Россию, то «ветеринар в Монголии — больше, чем ветеринар». Это очень уважаемый человек. Вся жизнь большинства монголов связана с разведением домашних животных, и человек, умеющий их лечить, — спустившийся с небес Айболит. Насмотревшись на работу местных ветеринаров, можно сказать одно: выбирать эту профессию должны люди с очень устойчивой психикой — спокойные и уравновешенные; любовь к животным мы бы поставили на второе место.

С фонариками телефонов и под фарами джипа рутинное, в общем-то, действо отбора крови превратилось в сюрреалистическое шоу. Представьте: с разных сторон из темноты в облаках пыли местные ковбои тащат коз, ты чувствуешь близость невидимого огромного стада, слышишь его дыхание, бляние... и сотни горящих бледно-красно-розовых точек — глаз — хаотично перемещаются на горизонте. Животные волнуются: что там эти иноземцы творят с их сородичами?

Немногие россияне знают о великой животноводческой культуре монголов, о скотоводческих традициях. Как виртуозно здесь управляются с лошадьми, овцами, козами, коровами, яками, верблюдами! Как вылечить животное или взять кровь на пастбище без специального оборудования? Вербка да сноровка, ну и многовековой опыт, который передается от поколения к поколению.

Ранние подъемы, длительные переезды, работа с животными... С каждым днем полевой генетический банк пополнялся новыми пробами. Переночевав в городе Улаангом, в 23 км от самого большого озера Монголии Убсунур площадью свыше 3350 км², мы проследовали вдоль уникального водоема, включенного в 2003 г. в состав объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО — Убсунурского бассейна. (Маленький кусочек оз. Убсунур принадлежит и России: 0,3% площади озерного зеркала — 12 км² — находится на юге Республики Тыва). Это природное чудо служит убежищем для 173 видов птиц и 29 видов рыб. На берегах озера, расположенного на высоте 753 м, обитает 41 вид млекопитающих, включая таких редких животных, как ирбис, аргали, сибирский горный козел.

Однако целью нашей животноводческой экспедиции теперь была лошадь породы тэс.

«Монгол без коня, что птица без крыльев»

Тэс — древняя аборигенная монгольская порода [6]. Для того чтобы ее увидеть и взять пробы крови, мы приехали в Тэсин-гол — в Западную Монголию. И тут нас ждал сюрприз: в день нашего прибытия проводились ежегодные традиционные скачки. На первый взгляд, большая удача, ведь со всех окрестностей сюда собираются самые достойные представители породы, а люди ради этого зрелища специально приезжают издалека. Но мы были несколько разочарованы: вряд ли удастся отобрать в генетический банк экспедиции кровь приведенных на состязание лошадей. Скорее всего, никто не захочет нервировать своих лошадей перед ответственным соревнованием. Однако не стали терять времени — наш проводник, местный ветеринар, начал возить нас от стойбища к стойбищу, где мы брали биопробы у лошадей, которые в соревнованиях не участвовали.

Наконец подъехали к месту старта традиционных конных соревнований. Здесь собрались лучшие скакуны: вороные, палевые, серые, чубарые. Тэс — лошадь невысокая, приземистая, коренастая, с крупной головой и очень красивыми, немного раскосыми глазами, стройными, коротковатыми ногами и мощными копытами. Разумеется, отбирать пробы крови нам пока не разрешили. Зато наш фотограф начал снимать животных. Гривы у многих из них на удивление контрастировали с основной мастью, как будто кто-то их выкрасил специально: у рыжих лошадей — в черный цвет, у палевых — в темно-коричневый и серый. И только у двух коней-«близнецов», светло-палевых с ко-



Типичная лошадь пастуха под монгольским седлом.



Монголия — страна войлочных юрт.

ричевыми подпалами на ногах, были длинные коричневые гривы — в тон основной масти. Чуть позже, когда мы брали у них кровь, научный сотрудник Института биологии Монгольской академии наук Ц.Цендсурен рассказала, что, по преданию, именно такими были два жеребца-близнеца, принадлежавшие первому великому хану Монгольской империи Чингисхану.

Монголы охотно фотографировались вместе со своими лошадьми и между собой посмеивались, видимо, обсуждая, кто из них удачнее представил жеребца и будет красоваться «в прессе»... Подходили по очереди. Кадры выходили один другого краше. А среди лошадей бегали мальчишки. Самому старшему на вид лет двенадцать, а младшему — не больше шести. В этой суете обратил на себя внимание

малыш лет семи: он как-то очень по-взрослому держал жеребца за уздечку и что-то ему говорил. Увидев, что мы на него смотрим, приподнялся на носочки, потянулся ближе к голове лошади и стал говорить тише. И жеребчик еще ниже склонил голову, как будто хотел расслышать, что говорит его маленький друг.

Вдруг все вокруг забежали: объявили начало скачек! К мальчику быстро подошел, почти подбежал мужчина, видимо, его отец. Взял малыша под мышки и посадил на жеребца. Потом помог сыну снять традиционный халат (дээл), который был надет поверх тонкой куртки, стянул с него сапоги. От этого зрелища мы замерли, совсем не понимая, что происходит. Обернувшись, увидели, что на всех приготовленных для скачек лошадях сидят дети, а взрослые мужчины помогают снимать лишнюю одежду и обувь, некоторым сняли даже носки. Оказывается, в традиционных монгольских скачках участвуют только дети 5–14 лет, причем это могут быть и мальчики, и девочки. Раздеваются они, чтобы жеребцу было легче. А седла не надевают в целях безопасности наездников.

Лошадь традиционно дарят мальчикам на третий день рождения, и растут они вместе в абсолютной гармонии с природой, познавая друг друга и весь мир. Впервые монголы-кочевники сажают ребенка на лошадь в 3–4 года, с этого возраста он учится верховой езде, а через год-два уже может самостоятельно пасти скот и участвовать в соревнованиях. Существует старинная пословица: «Монгол без коня, что птица без крыльев». И до сих пор у каждого члена традиционной кочевой семьи есть свой конь.

Мальчишки, горделиво восседавшие на лошадях без седел и стремян, вызвали истинное восхищение! Как-то неожиданно у них изменилась осанка, взгляд — это были всадники, которым предстояло слиться со своими жеребцами в единое целое. И вот все собрались, построились, старт... десяток лошадей рванули одним махом, оставив за собой лишь облако густой пыли и гул копыт. Дух захватило от этого зрелища юной конницы потомков Чингисхана. Теперь стало понятно, о чем



Перед скачками: лошадь породы тэс и ее хозяин.

только что разговаривал мальчик со своим жеребцом — конечно, о предстоящих скачках. Мы желали маленькому наезднику удачи.

Когда конница вернулась, ребят пересадили на других, более взрослых жеребцов и снова отправили на старт. И так несколько раз. По правилам скачек в первом заезде участвуют лошади-двухлетки (даага), во втором — трехлетки (шулддэн) и так далее, всего семь забегов. В последнем состязаются только иноходцы.

Монгольские скачки — воистину незабываемое зрелище, имеющее многовековую историю. В XIII в. в Монголии появилась служба конных гонцов, которая могла всего за две недели доставить письмо из одного конца империи в другой. Примечатель-



Маленькие всадники.

но, что такая почтовая система успешно функционировала вплоть до 1949 г.! [7]. И конечно, лошадь была грозным «оружием» монголов, в XIII в. она помогла им завоевать полмира и создать великую империю. Сегодня ученые полагают, что многие породы лошадей в мире происходят именно от тех монгольских скакунов, но местные породы изучены генетиками пока недостаточно.

Мы покидали Тэсин-гол уже в сумерках. Прощались с новыми знакомыми, как с близкими людьми: долго жали друг другу руки и обещали выслать фотографии на адрес местной администрации. Нам предстоял долгий путь в Москву и следующий этап исследований — анализ отобранного генетического материала уникальных монгольских пород домашних животных. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-54-44060).

Литература / References

1. Столповский Ю.А., Цэндсүрен Ц., Кол Н.В. и др. Генофонды домашних животных Монголии. Под ред. И.А.Захарова. М., 2013. [Stolpovsky Yu. A., Tsendsuren T.S., Kol N.V. et al. Gene pools of domestic animals of Mongolia. I.A.Zakharov (ed.). Moscow, 2013. (In Russ.).]
2. Столповский Ю.А., Лисичкина М.Г., Каптанов С.Н. Сохранение пород домашних животных ex situ. Зоологический музей МГУ имени М.В. Ломоносова. Зоологические исследования. М., 2018; 20: 153–155. [Stolpovsky Yu.A., Lisichkina M.G., Kashtanov S.N. Preservation of breeds of Pets ex situ. Zoological museum of Moscow university. Zoological research. Moscow, 2018; 20: 153–155. (In Russ.).]
3. Конашев М.Б. Экспедиции лаборатории генетики Академии наук СССР в Среднюю Азию и Монголию (1925–1935). Санкт-Петербургский филиал Института истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН. Историко-биологические исследования. 2014; 6(4): 43–59. [Konashev M.B. Expedition of the Laboratory of genetics of the Academy of Sciences of the USSR to Central Asia and Mongolia (1925–1935). St. Petersburg branch of the Institute of history of natural science and technology. S.I.Vavilov of RAS. Historical and biological research. 2014; 6(4): 43–59. (In Russ.).]
4. Домашние животные Монголии. Под. ред. Я.Я.Лус. М.; Л., 1936. [Pets of Mongolia. Ya.Luz (ed.). Moscow; Leningrad, 1936. (In Russ.).]
5. Qifa L., Xingbo Zh., Yanhua L. et al. Construction and identification on enriched microsatellite library from yak genome. Proceedings of the International Congress on Yak. Acta Genetica Sinica. Sichuan, 2004; 31: 489–494.
6. Нямжав Т. Популяции монгольского скота. Улаанбаатар, 2006. [Nyamjav T. Populations of the Mongol cattle. Ulaanbaatar, 2006. (In Russ.).]
7. Третьяков Г., Раиш Р., Лиясов А. и др. Железнодорожная артерия Монголии: Очерки истории железнодорожного транспорта в Монголии. Иркутск, 2001. [Tretyakov G., Kush R., Liyasov A. et al. Railway artery of Mongolia: essays on the history of railway transport in Mongolia. Irkutsk, 2001. (In Russ.).]

Mongolian Notes, or In the Country of Ancient Cattle Culture

Yu.A.Stolpovsky¹, Yu.Ya.Yakel²

¹Vavilov Institute of General Genetics (Moscow, Russia)

²Autonomous Nonprofit Organization “Conservation of National Biological Resources — “Curators” (Moscow, Russia)

The study of the breed diversity and gene pool of Central Asian domestic animals, conducted by Russian geneticists in the first half of the XXth century, are resumed in our days. The article tells about the livestock expedition to Mongolia, held in 2017, and about local people, who took an active part in the field research of Russian scientists. Animal blood sampling allowed to create a special genetic bank to assess the quality of breeding material, which is available to mongolian cattle breeders.

Keywords: grazing, breeder cattle diversity of domesticated animals, gene pool of domesticated animals, Mongolian livestock expedition.

Астрометрические приборы древности

А.В.Кузьмин

Институт истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН (Москва, Россия)

С древнейших времен люди интересовались устройством Космоса, как для практических нужд (для ориентации в пространстве и составления календарей), так и в философском и научно-теоретическом смысле. В статье обсуждаются прикладные и мифологическо-религиозные прообразы и технические конструктивные особенности армиллярной сферы, механический глобус-планетарий Архимеда и его практические воплощения, а также антикитерский механизм и его современные реконструкции.

Ключевые слова: астрометрия, Анаксимандр, милетская школа, древняя космология, армиллярная сфера, глобус Архимеда, антикитерский механизм.

Астрометрия — старейший раздел науки астрономии, которая занимается изучением кинематических и геометрических свойств небесных тел, определением моментов астрономических событий и промежутков времени между ними. К одним из самых первых астрометрических приборов для изучения движения небесных светил относятся армиллярная сфера и антикитерский механизм, а также инструменты, созданные на их основе.



Андрей Валентинович Кузьмин, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела истории физико-математических наук Института истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН. Область научных интересов — карта созвездий, астрономия и математика XVI–XVII вв.
e-mail: akuzmin_acrux@yandex.ru

Предпосылки и средства создания армиллярной сферы

Армиллярная сфера — древний астрономический инструмент, состоящий из совокупности подвижных и неподвижных кругов, который предназначался для определения экваториальных или эклиптических координат небесных тел. Армиллярная сфера и руководство по ее использованию описаны Клавдием Птолемеем (100–165 гг.) в «Альмагесте» [1, с.135–136]. Птолемей в своей работе опирался на звездный каталог, составленный Гиппархом (ок. 190 — ок. 120 г. до н.э.), и потому принято считать, что армиллярная сфера была известна Гиппарху, т.е. по меньшей мере, во II в. до н.э. Кроме того, существует гипотеза, что изобретателем армиллярной сферы был Эратосфен (276–194 гг. до н.э.), величайший ученый-энциклопедист своего времени. Он также создал звездный каталог, для которого были необходимы знания небесных координат и прибора, их измерявшего.

Имеются многочисленные косвенные свидетельства того, что армиллярная сфера или по крайней мере какой-то ее прототип были известны еще Фалесу Милетскому (ок. 640 — ок. 562 г. до н.э.). Одно из таких доказательств приводит Леонтий Механик в книге «Об изготовлении Аратова глобуса». Он, пересказывая известную историю глобуса Архимеда, в частности, сообщает, что подобную сферу в виде сплошного шара впервые изобрел Фалес Милетский [2, с.174]. И только затем Евдокс Книдский, ученик Платона, изобразил на поверхности сферы различные созвездия, утвержденные на небесном своде [2, с.174].

Существует свидетельство Сервия (римского грамматика конца IV в.) в «Комментариях к «Энеиде»», где автор прямо указывает, что знание основных кругов армиллярной сферы восходит к Фалесу: *Фалес, Пифагор и его последователи полагают, что небесная сфера разделена на пять кругов, которые они именуют поясами: один из них называется арктическим и всегда видимым, другой — летним тропиком, третий — [небесным] экватором, четвертый — зимним тропиком, пятый — ан-*

тарктическим и невидимым. Так называемый зодиак наискось накладывается на три средних круга, касаясь всех трех. Всех их под прямым углом — с севера на юг — пересекает меридиан [1, с.100].

В каком же качестве могла существовать армиллярная сфера?

Обратимся к поэме Арата «Явления», созданной около 275 г. до н.э., и к известным исследованиям* этого уникального литературного произведения эллинистической эпохи [3, 4].

«Явления» содержат подробное описание звездного неба, созвездий и их положений относительно кругов протоармиллярной сферы. Текст так подробен, что позволяет сделать несколько независимых определений эпохи описанного в нем неба. Все реализованные методы исследований статистически подтвердили один и тот же результат: в учебном тексте Арата («Явления» представляют собой именно учебный, дидактический материал, что и сделало его столь тиражируемым) описано взаимное положение звезд и системы небесных координат (или, что то же самое, положение звезд в системе армиллярной сферы), соответствующее рубежу 3-го и 2-го тысячелетий до н.э.

Другими словами, прототипом текста поэмы (созданной, кстати, неастрономом на основе утраченных впоследствии описаний неба Евдокса) стал источник, который старше ее не менее чем на 1,5 тыс. лет [3].

В тот хронологический период небесные круги стали возможны как следствие и развитие наблюдений горизонтной астрономии [3]. Эпоха появления первоисточника для произведения Арата известна как период распространения археоастрономических памятников, подобных английскому Стоунхенджу или отечественному святилищу Савин. В археологии известно большое число подобных обсерваторий, фиксирующих на горизонте точки восходов и заходов солнца в дни равноденствий и солнцестояний.

Наблюдая восходы и заходы любых объектов (прежде всего звезд), в этих точках можно буквально прорисовать, вычертить соответствующие небесные круги, называемые сегодня небесным экватором, тропиком Рака и тропиком Козерога. Таким образом, возникают самодостаточные аналоговые элементы протоармиллярной сферы, впоследствии зафиксированные Аратом.

Вот как выглядит составленное им описание тропика Рака:

Первый из меньших [северный. — А.К.]

лежит не вдали от истоков Борея.

Обе главы Близнецов по этому кругу несутся;

Накрепко оба к нему прижимает колена Возничий;

Левая голень на нем и плечо утвердилось Персея;

Следом за ним сей круг Андромеды десницу над локтем

*Пересекает, причем ладонь остается над кругом,
Ближе к Борею, а локоть ее наклоняется к Ноту.
Также копыта Коня, затылок Птицы, вершина
Птичьей главы, наконец, Змеедержца прекрасные плечи
Вместе по кругу сему непрерывно вершат обращение,
Не прикасаясь к нему, влечется немного южнее
Дева, но Льву и Раку его избежать невозможно:
Оба подряд пронизаны им — одного рассекает
Он от груди всего целиком до самого срама,
А вслед за тем сквозь Рака бежит,*

расколов ему панцирь,

*И разрезается Рак пополам с таким совершенством,
Что остаются глаза его по разные стороны круга.*

*Если его разделить на восемь частей, то при свете
Дня над Землей обращаются пять, а три — в Океане.*

Летом, коснувшись его, назад поворачивается Солнце.

В царстве Борея сей круг утвержден

и проходит сквозь Рака [4, с.40–41].

В стихах отражено и положение тропика относительно созвездий (т.е. звезд), и условия его видимости (доли, находящиеся над и под горизонтом), и его предназначение быть летней границей пути Солнца в сторону севера. Подробности, содержащиеся в тексте, соответствуют рубежу 3-го и 2-го тысячелетий до н.э.

Модель Космоса Анаксимандра

Картине Космоса посвящен отдельный труд Анаксимандра (ок. 611 — 546 г. до н.э.). В пространстве, ограниченном сферическим экраном *от бушующего снаружи вселенского огня*, свободно размещается Земля цилиндрической формы. Для жителей нашей планеты Солнце представляет собой иллюминатор в этот огненный мир. В абстрактной модели Космоса, впервые созданной Анаксимандром, расстояние от Земли до Солнца составляет 27 диаметров земного цилиндра (рис.1). Круг Солнца определяет своеобразный горизонт видимости.

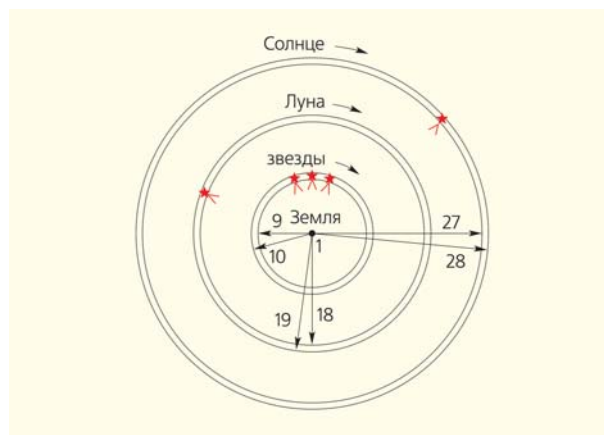


Рис.1. Схематическая реконструкция структуры Космоса Анаксимандра. Цифры — число диаметров земного цилиндра.

* См.: Гуриштейн А.А. Минувшие цивилизации в зеркале Зодиака // Природа. 1991. №10. С.57–71.

На расстоянии, равном примерно 18 диаметрам земного цилиндра, расположена сфера Луны. Еще ближе к Земле, на расстоянии около 9 диаметров, находится одна или несколько сфер неподвижных звезд.

Затмения Солнца, Луны и смена лунных фаз объясняются наличием особых механизмов закрытия *окон-иллюминаторов*. Звезды, таким образом, относятся к подлунному миру. Толщина звездной, лунной и солнечной сфер равна диаметру земного цилиндра.

Постулат о том, что сфера звезд — наиболее низкая (подлунная), заимствован, по всей видимости, из «Авесты», священной книги зороастрийцев, написанной на древнеиранском языке. Позже греческая наука преодолела это положение, что стало важным шагом в развитии древней космологии.

Континентальные греки уже не пользовались аналогиями так активно, как это делал Анаксимандр, и строили абстрактные модели, исходя из общих разумных соображений, а не из наблюдений. Другими словами, они ориентировались на теоретические построения, а не на чувственный опыт. Следствием такого подхода стало, в частности, перемещение сферы звезд во внешний контур Космоса.

Наиболее важными достижениями Анаксимандра представляются следующие идеи: Солнце-окно — наблюдаемая часть мирового огня; солнечная сфера — граница нашего геоцентрического Космоса; Земля существует в пространстве как свободное, ни с чем не связанное тело.

Говоря о наивности модели Анаксимандра с точки зрения современных знаний, можно, тем не менее, усмотреть некоторую логику в расположении сферы звезд как наиболее низкой. Так, если считать Землю неподвижной, то скорость движения звездной сферы окажется наиболее высокой по сравнению с Солнцем и Луной, которые относительно нее будут постоянно запаздывать.

Запаздывание Луны, в свою очередь, будет превосходить запаздывание Солнца. Во время затмений Луна закрывает Солнце, следовательно, дневное светило находится дальше.

Низкое положение сферы звезд могло быть обосновано не только скоростью движения, но и количеством излучаемого света, сообразно расстоянию от мирового огня — от более яркого к менее яркому.

Запаздывание Луны можно непосредственно наблюдать на небе. Оно должно было бы повлечь за собой обнаружение покрытия звезд Луной, но этого, по-видимому, не произошло. Наблюдения еще не могли преодолеть авторитет мифологического наследия.

Аргумент невозможности наблюдения движения Солнца среди звезд кажется малообоснованным. Евсевий Кесарийский (ок. 263–340 гг.) писал: *Он [Анаксимандр. — А.К.] первым соорудил гномоны*

для распознавания солнцеворотов, времени, времен года и равноденствия [5, с.116].

Аналогичное подтверждается и сообщением Плиния: *Передают, что наклонение зодиака первым постиг Анаксимандр Милетский в 58-ю олимпиаду [548–545 гг. до н.э.], тем самым открыв двери [к познанию] вещей* [5, с.116].

Таким образом, была впервые создана абстрактная модель, объясняющая первопричину света Солнца и Луны, а также солнечные и лунные затмения и изменения лунных фаз, которые характеризует положение Земли в пространстве. Звезды в модели Анаксимандра принадлежат подлунному миру. Причина их света не раскрывается.

Прикладные и мифологические истоки модели Анаксимандра

Взаимное расположение сфер в модели Анаксимандра отсылает к авестийской мифологической картине мира. Так, по словам советского и российского историка античной и эллинистической науки и философии И.Д.Рожанского, *не имеющая аналогов в Греции последовательность расположения небесных светил у Анаксимандра — сначала неподвижные звезды, затем Луна и дальше всех — Солнце — является отличительным признаком древнеиранских (но не вавилонских!) космологических концепций* [6, с.52]. И далее: *Образ вращающихся огненных обручей или колец, на которые распадается огненная сфера, первоначально окружавшая Вселенную, — тоже уникальная черта анаксимандровской космологии — неожиданным образом находит свой аналог в библейском видении Иезекииля (Иез., 1, 5–24, 3, 13, 10, 8–22). Возможно, что и у Анаксимандра, и у Иезекииля был какой-то общий источник, о котором мы теперь не знаем* [6, с.52].

Скорее всего, этот общий источник носил прикладную, техническую природу. Описание Космоса Анаксимандра и элементы видения Иезекииля во многом совпадают с обликом реконструированного устройства металлургического цеха. Действительно, в устройстве его печи древние философы могли видеть аналог построения системы Небо—Космос (рис.2). Об этом свидетельствуют так называемые детерминативы (идеогаммы) в виде четырех зверей-лиц, представляющих символы зодиакальной четверки созвездий эпохи бронзы. Они служили символами мирового порядка Зодиак—Космос [3, 4].

Заметим, что именно из материала, рождающегося в печи (меди или бронзы, а впоследствии — железа), возможно изготовить армиллярную сферу. Производимые обручи колесничных колес могли изначально сыграть роль прототипа армиллярной сферы, а крепежные детали и узлы соединений колесницы и конской сбруи могли быть



Рис.2. Фрагменты круговой металлоплавильной печи (реконструкция).

преобразованы в детали и узлы соединений этих обручей для создания модели небесных кругов.

В основе современной армиллярной сферы лежит конструкция из градуированных обручей (как правило, металлических) — разных, но соразмерных форм и диаметров, которые соединяются между собой. Они как бы помещаются на поверхность воображаемой сферы и моделируют небесный экватор, эклиптику, тропики, нулевой небесный меридиан, горизонт и т.д. Вся конструкция размещается на подставке или подвесе, ориентируется по сторонам горизонта, регулируется согласно заданной географической широте и центрируется (за исключением горизонта) относительно оси мира (рис.3). Угол между ней и плоскостью горизонта устанавливается соответственно положению на определенной широте поверхности Земли [7, с.25–27].

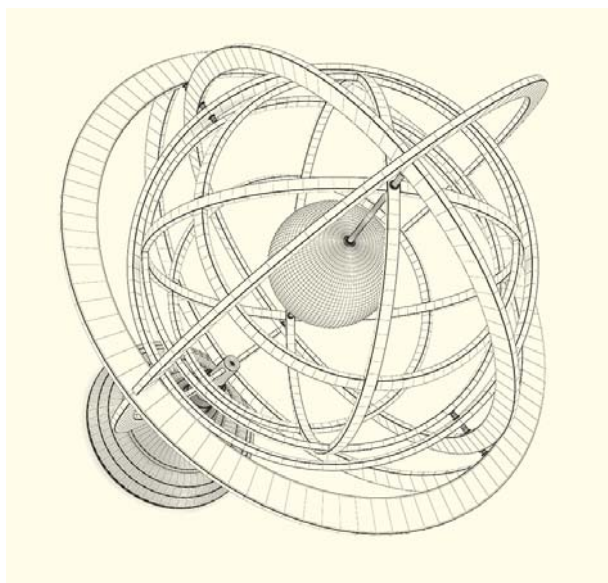


Рис.3. Эскиз-прорисовка комплекса смонтированных обручей классической армиллярной сферы.

Современное название такой модели — армиллярная сфера (ранее XVIII в. ее именовали просто армиллой) — происходит от латинского существительного *armilla* — обруч, кольцо, браслет. В греческой античной литературе для этого прибора использовали иной термин. Птолемей, подробно описывая армиллярную сферу в разделе «Об устройстве астролэбии» книги V «Альмагеста», называет ее *astrolabon organon* — инструмент для взятия звезд [1, с.527].

Своей вершины искусство создания армиллярных сфер достигло в мастерской Тихо Браге во второй половине XVI в. Там всевозможные специализированные армиллы создавались как для непосредственных наблюдений, так и для преобразования различных координатных систем. Положения звезд, зафиксированные в экваториальных координатах, с помощью той же армиллы легко преобразовывались в эклиптические координаты — для более рационального определения прецессионных поправок. Таким образом, армиллярная сфера была не только прибором для непосредственного наблюдения положений небесных объектов, но и своего рода прообразом аналоговой вычислительной машины [8].

Космология Анаксимандра

Обратимся теперь более подробно к предположению о возможности заимствования механических элементов армиллярной сферы из конструкции колесницы.

Рассмотрим связь между описанием космологической модели Анаксимандра и ранних способов производства металлов (меди, бронзы, железа). Обнаруживаются аналогичные признаки и, более того, аналогичные мифологемные принципы, реализуемые как в модели анаксимандровского Космоса, так и в модели выплавления и обработки меди, бронзы, серебра, золота, железа. Кузнечное и кузнечно-ювелирное ремесло технологически первенствовало во времена возникновения древних космологических моделей милетской школы.

Из интерпретации археологических реконструкций известно, что с производством металлов связан *ритуал сотворения нового при помощи огня*. Огонь ассоциировался с Солнцем, а конь представлялся одним из основных солнечных символов. Кроме того, верховая лошадь появляется в скифское время, значительно позже колесницы (рубеж 4–3-го тысячелетий до н.э.).

В свою очередь, открытие процесса производства меди хронологически связано с изобретением колесницы. Освоение более сложного процесса производства железа синхронно с появлением верховой лошади. Именно к этому времени (VI–V вв. до н.э.) относятся наиболее ранние космологические модели милетской школы.

Обратим внимание на такую нетривиальную деталь, как открывающиеся сопла, которые присутствуют как в реконструкции модели Анаксимандра, так и в реконструкции печи, предназначенной для плавления железа (см. рис.2).

В то время велась оживленная торговля греков со скифами, главными предметами которой были железо (со стороны скифов) и виноградные вина (со стороны греков). Многие железные изделия дополнялись ритуальным золотым декором на основе греческих мифологических сюжетов. Медь, сплавы меди и золота греки производили в те времена самостоятельно.

Железный щит с инкрустированным изображением Солнца наделял владельца (вероятнее всего — вождя) космической властью на земле. Реконструкция (1716 г.) С.Грибелена «Щит Ахилла, выкованный богом Гефестом», несмотря на ее определенную спорность, может служить хорошим символическим примером. По периметру античного щита изображены батальные сцены, а в центре представлены следующие элементы: небо (облака), Земля, Луна, звезды, фигуры созвездий Большой (или Малой) Медведицы и Персея. Всю композицию обрамляет круг созвездий зодиака [9, с.118].

Итак, в печи теория творения опредмечивалась (реализовывалась кузнецом) в реальных вещах и формах. Создание мастером некой формы из металла (земной руды) ассоциируется с работой платоновского Демиурга. Подчеркнем, что форма привлекается как бы из небытия. Такая теория творения формы из земли при помощи огня могла быть заимствована и из технической области и перенесена в космологическую. Именно этим можно объяснить присутствие в космологической модели Анаксимандра элементов явно технических.

Поскольку исконные, наиболее ранние известные кузнецы-медеплавильщики были носителями авестийской религиозной традиции, естественно, что в ранние космологические модели, вместе с элементами и символами медеплавильного процесса, приходят и элементы мифологического мироописания зороастрийцев.

В «Авесте» соотношенная с божественной иерархией структура космоса представлена четырьмя сферами — орбитой звезд, соответствующей благим мыслям; более удаленной орбитой Луны, соответствующей благим словам; Солнца — благим делам. Высшая сфера — область бесконечного света — принадлежит Ахурамазде. Греческий философ Анаксимандр воспринял эту схему в начале VI в. до н.э. [10, с.283].

Есть еще одна точка зрения, по которой расположение звезд ниже Луны и Солнца продиктовано теоретическими соображениями: *самое горячее (Солнце) должно находиться выше всего, а самое холодное (звезды) — ниже всего, ибо огонь всегда стремится вверх [11, с.118].*

Так, весьма вероятно, человечество бронзового века стремилось увидеть элементы процесса творения

Космоса в металлургической печи. Символы, лежащие в основе процесса плавления (огонь, воздух, вода, земля, бурление, преобразование, творение), могли стать основой и для первой — не мифологической, а научной космологической модели. Последняя исходила из земных реалий и стремилась найти объяснение (по крайней мере, дать описание) наблюдаемым физическим процессам. Такая модель на основе глобальной реализации этих процессов должна была бы объяснить происхождение всего мира, т.е. Земли и Космоса.

Именно этой гипотезой можно объяснить наличие в реконструкции анаксимандровской модели таких странных атрибутов, как огненные обручи, отверстия и заслонки [12, с.167]. Рассогласованность различных элементов в модели мира Анаксимандра показывает, что она как бы собрана из частей разных моделей, совместное существование которых представляется противоречивым.

Глобус Архимеда и часовой механизм Турриани

По сообщению Паппа Александрийского, математика и механика позднего эллинизма, *Карп Антиохийский где-то говорит, что сиракузянин Архимед составил только одно механическое сочинение, а именно об устройстве небесного глобуса, не найдя из других предметов ничего достойного сочинения [13, с.370].*

Согласно современным представлениям и реконструкциям, небесный глобус представлял собой достаточно совершенный механический планетарий [14], т.е. он не был только сферой и не был только моделью Космоса. Он был театром-планетарием, демонстрирующим видимые движения небесных тел. Конструкция представляла собой звездный глобус, центрированный по оси мира и ориентированный по широте места. Край глобуса, погруженный в чашу, показывает горизонт. Эта модель позволяла демонстрировать восходы и заходы светил. Вдоль эклиптики перемещались планеты и светила, моделирующие свои движения относительно звезд. Макет Луны показывал изменение фаз. Фрагментарные сообщения, сохранившиеся в достоверных источниках, позволяют достаточно детально реконструировать механизм этого открытия Архимеда [14, с.275–279].

Так Космос впервые становится техническим механизмом. Стало возможным представить его в виде единой системы математически выверенных циклов, в том числе раскрыть природную тайну преобразования движений — задачи, которую продолжили решать механики и математики раннего Нового времени и которую решил Исаак Ньютон (1642–1787 гг.), открыв закон всемирного тяготения. Во времена Архимеда (ок. 287 — ок. 212 гг. до н.э.) и вплоть до первой половины XVII в. многие философы строили различные теоретические

механизмы, способные передать (преобразовать) энергию (движение) *Первого двигателя* в наблюдаемое движение неба и небесных тел.

Здесь нужно отметить, что устройство небесного глобуса Архимеда в своей основе, безусловно, содержит армиллярную сферу. Однако Архимед открыл и описал контуры реального технического механизма, способного осуществить движения, которые армиллярная сфера только символизировала. Теперь же появилось устройство, которое могло воспроизводить предвычисления, требуя лишь некий источник энергии (и, разумеется, двигатель и привод), необходимый для его приведения в движение. Архимед превращает математику в технику, математическую модель в автономный (не требующий постоянного участия человека) технический механизм. Заметим, что в своей интеллектуальной части действие такого механизма в участии человека не нуждается вовсе. Задача человека — его энергообеспечение и техническое обслуживание. Разумеется, мы, представители так называемого Новейшего времени, привыкли к тому, что всякий механизм требует постоянного усовершенствования. Здесь мы рассмотрели некий случай создания идеального механизма. С другой стороны, для своих современников он таковым и был.

Весьма интересный заочный спор о том, чья модель неба совершеннее — Архимеда или великого механика XVI в. Джуанелло Турриани (1500—1585 гг.), служившего при дворе Карла V, — содержит записи современников Турриани: Амброзио Моралеса и донна Луиса де ла Эскозур [15, с.126].

В связи с этим следует отметить, что одним из значимых вдохновляющих элементов открытия безупречного часового механизма, которое совершил Турриани, была известная ему из книг информация о создании Архимедом небесного глобуса.

В частности, Моралес сообщает, что наибольшую трудность представляла задача создания узлов, моделирующих движения Меркурия и Луны. По словам самого Турриани, *искусство здесь выведено им за пределы цифр*. Ему, по-видимому, удалось получить механическим способом (путем интуитивного доведения до совершенства системы зубчатых передач, в том числе с элементами асимметрии) соотношения периодов, которые было невозможно представить в рамках известных на тот момент математических теорий.

Турриани высоко оценил собственные заслуги. На своем изделии он поместил надпись:

Qui sim scies, par opus facere conaberis (Ты поймешь, кто я, если попробуешь сделать то же самое, что и я) [15, с.127]. Несколько позже Эскозура упрекнул Джуанелло в нескромности, указав на то, что тот претендует на славу, превосходящую славу Архимеда.

Вряд ли можно поставить под сомнение утверждение, что предшественниками механических часов были астрономические приборы. Небесную сферу Архимеда, бесспорно, можно считать звеном, непосредственно связавшим приборы для измерений на небе и часовые механизмы. Историческое знание о небесном глобусе вдохновило создателей (и в какой-то мере воссоздателей) сложных часовых механизмов середины XIV в.

Башенные часы на площади Святого Марка

В качестве довольно позднего сохранившегося до наших дней бытового воплощения идей глобуса Архимеда можно привести башенные часы на площади Святого Марка в Венеции (Италия). Впервые их там установили в 1495 г. Известно имя часовщика — Джованни Рейнальд, он работал вместе со своим сыном Карлом. По-видимому, никаких сведений, дошедших до наших дней, об этих часах не сохранилось. Появились они чуть более чем через 100 лет после установки своих (теперь совсем забытых) предшественников, в самом начале XVII в. (рис.4).

Часы показывают и истинное солнечное время, отсчитываемое от момента нижней кульминации Солнца, и обычное для нас поясное время. Первое,



Рис.4. Башенные часы на площади Святого Марка в Венеции.

Здесь и далее фото автора



Рис.5. Кольцо Зодиака — Солнца (слева) и кольцо Луны на башенных часах в Венеции.

что обращает на себя внимание, это сложный циферблат красивых оттенков темно-синей эмали, который правильнее было бы назвать необычным набором указателей — своеобразных колец-стрелок, несущих на себе символы и макеты небесных объектов. Геометрические символы звезд золотого цвета на синих эмалевых поверхностях имеют только декоративное значение.

Собственно, циферблат этих часов — внешнее мраморное кольцо светло-серого оттенка, разделенное на 24 сектора, пронумерованные римскими цифрами (от I до XXIV) и имеющие половинную метку. Интересно, что цифры стоят именно на секторах, а не на разделительных линиях, как в большинстве современных часов. Каждый из 24 часов суток геометрически представлен отдельным сектором мраморного круга. Эклиптика (зодиак) разделена на пятиградусные участки, т.е. каждый знак зодиака разделен на шесть секторов.

Внутри мраморного циферблата расположено три кольца, совершающих круговые движения с различными скоростями. Четвертое — центральное, окружающее шар, который символизирует Землю, — остается неподвижным. На среднем кольце установлена стрелка, украшенная антропоморфным изображением Солнца. Она показывает не просто номер текущего часа суток, но и положение Солнца на эклиптике или в зодиаке — первом подвижном кольце. Это кольцо (наибольшего диаметра) одновременно показывает положение самого зодиакального круга относительно горизонта в текущий момент времени. Кольцо, несущее зодиак, таким образом, движется несколько быстрее Солнца, которое как бы запаздывает примерно на один градус за каждые сутки из-за своего годового движения среди звезд. Внимательный взор увидит здесь сумму двух движений часовой стрелки (Солнца) — суточного (относительно внешнего циферблата) и годового (относительно первого подвижного кольца) (рис.5).

Возникает не совсем обычная картина: движется не только само светило, но и целое кольцо со знаками зодиака и текущим положением Солнца; т.е. перед зрителем возникает своеобразный планетарий, где в каждый момент времени видно положение относительно горизонта всей эклиптики (зодиака). Следующее кольцо, среднего диаметра, на котором закреплена часовая стрелка с изображением Солнца, показывает, таким образом, и его положение в зодиаке, и номер текущего часа суток.

Третье подвижное кольцо символизирует Луну. Одна половина ее сферы окрашена в золотой цвет, другая — в темно-синий, сливающийся с цветом неба. Поверхность кольца Луны имеет 12 делений. С их помощью простым взглядом легко оценить величину угла, который в данный момент составляют геоцентрические направления на Солнце и на Луну (см. рис.5).

Верхом воплощения мечты о механической модели Космоса можно считать часы Д.Г.Неслфелла (1761 г.), которые под названием «Коперниканский планетный механизм Кайзера Франца I» хранятся в Венском музее естественной истории.

Антикитерский механизм

Антикитера — древний механизм, использовавшийся для расчета движения небесных тел и вычисления дат астрономических событий. Обратившись к коллекции античных артефактов, мы видим, что механизм, подобный описанному Архимедом, действительно существовал. Теперь он находится в Национальном археологическом музее Афин. Согласно современным оценкам, его создали в период от 205 до 85 г. до н.э. в регионе, близком 35-й параллели (вероятно, на о.Родос) [16, 17]. Наиболее ранняя оценка датировки практически совпадает с временем гибели Архимеда в 212 г. до н.э.

Механизм, о котором идет речь, был обнаружен 4 апреля 1900 г. на затонувшем в древности корабле вблизи о.Антикитира. По названию острова он и получил свое современное наименование.

Вместе с коллекцией скульптурных произведений, оказавшейся на этом римском корабле (который, предположительно, шел с Родоса), с глубины около 60 м подняли фрагменты, вначале считавшиеся обломками пластики. Впоследствии обнаружилось, что это сильно подверженные коррозии и покрытые морскими отложениями части механического устройства размером примерно 32×17×6 см, которое включало около 30 бронзовых зубчатых колес, размещенных в деревянном корпусе. Последний был снабжен двумя циферблатами. Это открытие сделал сотрудник Национального археологического музея в Афинах Валериос Стаис 17 мая 1902 г.

Около 1930 г. была сконструирована первая бронзовая модель, основанная только на внешнем осмотре фрагментов. Первое рентгеновское исследование провел британо-американский историк науки Дерек Прайс в 1951 г. Полная схема древнего устройства была создана к 1971 г., в ее состав вошли 32 шестерни.

В реконструкции Прайса циферблат на передней стороне отображал круг зодиака (годового календарного цикла). Два циферблата на другой стороне служили для отражения двух циклов. Первый моделировал соотношение 254:19 (данное соотношение модулирует цикл Метона: 254 сидерических месяца, т.е. 254 периода обращения Луны относительно неподвижных звезд, равны 19 тропическим годам) и использовался для воспроизведения движения Солнца и Луны на фоне неподвижных звезд. Второй цикл составляет 223 лунных (синодических) месяца. По его завершению цикл солнечных и лунных затмений повторяется. Положение Солнца и Луны выводилось на циферблат. Британский часовщик Джон Глив по этой схеме построил демонстрационную копию механизма.

Дальнейшее исследование антикитерского механизма предпринял Майкл Райт. В 1997 г. он впервые использовал методы рентгеновской томографии, что позволило изучать двухмерные срезы устройства. Новый метод сразу выявил ошибки и неточности. В 2002 г. Райт предложил новую реконструкцию, по которой устройство моделировало не только движения Солнца и Луны, но и пяти планет, известных с древнейших времен.

Вскоре после презентации Райта, значительно усилившей интерес к находке (с момента ее обнаружения прошло уже более 100 лет), в 2005 г. под эгидой Министерства культуры Греции был принят греко-британский проект изучения антикитерского механизма (Antikythera Mechanism Research Project). В результате применения новейших методик, кроме реконструкции технических элементов, удалось прочесть около 2 тыс. греческих символов, которые маркировали детали механизма. В 2008 г. в Афинах по результатам исследования представили доклад. В нем, в частности, было показано, что эллиптичность движения Луны моделировалось колесом со смещенным центром [18].

В 2016 г. демонстрировались очередные результаты, связанные с дешифровкой текстовой информации по реконструированным надписям. Из 2 тыс. греческих символов, которые размещались на 82 сохранившихся фрагментах, удалось реконструировать 500 слов. Все описание, по мнению специалистов, состояло приблизительно из 20 тыс. символов. В основном это календарные даты и надписи прогностического содержания относительно погодных явлений. Прибор состоял из 37 шестерен, из них идентифицировали 30. Помимо подробного представления движений Солнца и Луны устройство демонстрировало движения всех известных тогда планет и, кроме того, показывало время наступления Олимпийских игр и других важных периодов общественной жизни.

Антикитерский механизм представлял собой демонстрационную модель, работавшую от ручного привода. Собственного двигателя и регулятора хода он не имел, но позволял в аналоговом режиме синхронно воспроизводить солнечные, лунные, планетные эфемериды согласно принятому календарному счету времени.

* * *

Таким образом, основываясь на исторических сведениях, можно с достаточной уверенностью предполагать, что элементы армиллярной сферы присутствовали в ритуальной практике наблюдений у жителей Средиземноморского региона еще до возникновения милетской школы, наиболее яркие представители которой — Фалес и Анаксимандр. Хорошо известный из литературных источников механический глобус-планетарий Архимеда был предшественником антикитерского механизма, поднятого со дна Средиземного моря и оказавшегося в руках исследователей XX–XXI вв. ■

Литература / References

1. *Птолемей К.* Альмагест. Пер. И.Н.Веселовского. М., 1998. [*Ptolemy K.* Almagest. I.N.Veselovsky (transl.). Moscow, 1998. (In Russ.).]
2. Небо, наука, поэзия. Античные авторы о небесных светилах, об их именах, восходах, заходах и приметах погоды. Ред. Н.А.Федоров, П.В.Щеглов. М., 1992. [Heaven, science, poetry. Ancient authors about the heavenly bodies, their names, sunrises, sunsets and signs of weather. N.A.Fedorov, P.V. Shcheglov (eds). Moscow, 1992. (In Russ.).]

3. Gurshtein A.A. The puzzle of the Western Zodiac: Its wisdom and evolutionary leaps. A painful ascent to the truth. Bloomington, 2017.
4. Арат. Явления. Небо, наука, поэзия. Пер. А.А.Россиуса М., 1992; 40–41. [*Arat. Phenomena. Heaven, science, poetry. A.A.Rossius (transl.). Moscow, 1992; 40–41. (In Russ.).*]
5. Лебедев А.В. Фрагменты ранних греческих философов. Ч.I. От эпических космогоний до атомистики. М., 1989. [*Lebedev A.V. Fragments of the early Greek philosophers. Part I. From epic cosmogonies to atomism. Moscow, 1989. (In Russ.).*]
6. Рожанский И.Д. Развитие естествознания в эпоху Античности. Ранняя греческая наука «о природе». М., 1979. [*Rozhanskiy I.D. The development of natural science in the era of antiquity. Early Greek science "about nature". Moscow, 1979. (In Russ.).*]
7. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. М., 1983. [*Bakulin P.I., Kononovich E.V., Moroz V.I. The course of general astronomy. Moscow, 1983. (In Russ.).*]
8. Белый Ю.А. Тихо Браге 1546–1601. М., 1982. [*Belyi Yu.A. Tycho Brahe 1546–1601. Moscow, 1982. (In Russ.).*]
9. Саплин А.Ю. Небо. Т.I. Тула, 2016. [*Saplin A.Yu. Sky. V.I. Tula, 2016. (In Russ.).*]
10. Элиаде М. Космос и история. М., 1987. [*Eliade M. Space and history. Moscow, 1987. (In Russ.).*]
11. Жмудь Л.Я. Пифагор и его школа (ок. 530 — ок. 430 г. до н.э.). Л., 1990. [*Zbmud L.Ya. Pythagoras and his school (about 530 — about 430 BC). Leningrad, 1990. (In Russ.).*]
12. Чайковский Ю.В. Долатоновская космология и Коперник. Историко-астрономические исследования. Вып. XXX. М., 2005; 159–200. [*Tchaikovsky Yu.V. Preplatonian cosmology and Copernicus. Historical and astronomical studies. V.XXX. Moscow, 2005; 159–200. (In Russ.).*]
13. Архимед. Сочинения. Перевод, вступительная статья и комментарии И.Н.Веселовского. Перевод арабских текстов Б.А.Розенфельда. М., 1962. [*Archimedes. Writings. I.N.Veselovsky (translation, introductory article and comments). B.A.Rosenfeld (translation of Arabic texts). Moscow, 1962. (In Russ.).*]
14. Житомирский С.В. «Небесный глобус» Архимеда. Историко-астрономические исследования. Вып. XIV. М., 1978; 271–302. [*Zhitomirsky S. "Heavenly Globe" Archimedes. Historical and astronomical studies. V.XIV. Moscow, 1978; 271–302. (In Russ.).*]
15. Бэк Т. Очерки по истории машиностроения. Т.I. Пер. Е.Левковича, В.Прозорова. М.; Л., 1930. [*Back T. Essays on the history of mechanical engineering. V.I. E.Levkovich, V.Prozorov (transl.). Moscow; Leningrad, 1930. (In Russ.).*]
16. Hadrava P., Hadravova A. Anticky predchudce stredovekych orloju? Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, rocnik. 2009; 54: 38–324.
17. Henriksson G. Thales of Miletus, Archimedes and the solar eclipses on the Antikythera Mechanism. XXI SEAC conference. Astronomy: Mother of Civilization and Guide to the Future. Athens, 2013; 47–48.
18. Moussas Xenophon. The Antikythera Mechanism: the signature of Archimedes on the eclipses, operation of the instrument, planetary pointers and Kepler before Kepler? XXI SEAC conference. Astronomy: Mother of Civilization and Guide to the Future. Athens, 2013; 76–77.

Ancient Astrometric Devices

A.V.Kuzmin

Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS (Moscow, Russia)

Since ancient times, people have been interested in the structure of the Cosmos, both for practical needs — for orientation in space and in composition of calendars — and in the philosophical, scientific, and theoretical sense. The article discusses the applied, mythological and religious prototypes and technical features of the armillary sphere, as well as the mechanical globes and planetarium of Archimedes, and its practical implementation. An important place in the work is given to the Antikythera mechanism and its modern reconstructions.

Keywords: astrometry, Anaximander, Miletus school, ancient cosmology, armillary sphere, Archimedes globe, Antikythera mechanism.

Беззубый предок усатых китов

Я.А.Попов

Государственный Дарвиновский музей (Москва, Россия)

e-mail: yaroslav453@gmail.com

Кратко освещены дискуссионные аспекты происхождения цедильного аппарата усатых китов. Рассказано о последней палеонтологической находке, рассматриваемой специалистами как переходное эволюционное звено между зубатыми и усатыми китами.

Ключевые слова: Mysticeti, усатые киты, китовый ус, эволюция китообразных.

Китообразные (Cetacea) — один из самых своеобразных и специализированных отрядов млекопитающих животных. В их происхождении и эволюции пытаются разобраться уже несколько поколений морфологов, генетиков и палеонтологов. Постепенно удалось приоткрыть завесу тайны в вопросе о том, как предки китов перешли к водному образу жизни. Генетические исследования и уникальные палеонтологические находки позволили сделать вывод: ближайшие родственники китообразных — парнокопытные (Artiodactyla), в частности гиппопотамы [1]. Существенным прорывом в изучении эволюции китообразных стало описание в 1981 г. остатков одного из древнейших представителей отряда — *Pakicetus inachus* [2]. В настоящее время сформировалась следующая концепция: парнокопытные предки китов перешли к полуводному образу жизни в пресных водоемах, затем перебрались в морские акватории, где окончательно превратились в водных животных [3]. Каждая новая палеонтологическая находка помогает лучше понять, как развивался этот процесс.

Однако понимание эволюции других особенностей китообразных связано с трудноразрешимыми вопросами. Например, как предки современных усатых китов (Mysticeti) перешли к питанию планктоном, как и когда сформировался китовый ус? Длинные роговые пластинки, которые развиваются в верхней челюсти морского исполина, свисают с нёба и помогают отсеивать из воды планктонных моллюсков, ракообразных и мелких рыб — одна из научных загадок. Дело в том, что этот так называемый цедильный аппарат отсутствует в ископаемых остатках.

Вещество, из которого состоят фильтрующие пластинки, — кератин — обладает высокой механической прочностью, но со временем довольно легко разлагается под действием микроорганизмов. Поэтому палеонтологам приходится обращать особое внимание на костные структуры, поддерживающие китовый ус, а также на характерные для современных усатых китов отверстия

сосудов и нервов в верхней челюсти их ископаемых предков. Самая древняя достоверная находка окаменевшего китового уса, обнаруженная на юге Перу, имеет возраст 15 млн лет [4]. Однако, косвенные следы существования такого цедильного аппарата можно обнаружить в существенно более древних черепах, датируемых хатским веком позднего олигоцена (28–23 млн лет назад) [5]. Это — наиболее вероятное время формирования китового уса. Но остается вопрос: как он возник?

Выдвигалось множество версий происхождения китового уса в связи с различными (часто фрагментарными) палеонтологическими находками. В 2017 г. исследователи из США Карлос Передо, Николас Пьенсон и Александра Боэрсма предложили четыре главных гипотезы [6]. Согласно первой, предки китов изначально использовали для фильтрации воды зубы и лишь затем обзавелись китовым усом. Зубы должны были претерпеть серьезные изменения, чтобы из инструмента захвата добычи превратиться в цедильный аппарат. Вторая и третья гипотезы предполагают одновременное существование зубов и постепенно заменившего их китового уса, но предусматривают разные механизмы «вытеснения»: боковое по всей длине рта либо от челюстного сустава — вперед. Наконец, четвертый возможный путь трансформации — вначале полное исчезновение зубов, затем появление нового приспособления для ловли добычи, причем до появления уса киты могли питаться, засасывая добычу, как делают некоторые рыбы. Сами авторы гипотез, опираясь на ряд доказательств, склонялись к последней версии и отмечали, что потеря зубов и формирование уса, вероятнее всего, происходили независимо. Однако до последнего времени не было ископаемого материала для подтверждения этих взглядов.

В ноябре 2018 г. опубликованы результаты многолетнего исследования, приоткрывшего тайну эволюции усатых китов [7]. Внимание группы американских исследователей под руководством Карлоса Передо привлек небольшой хорошо сохранившийся череп, найденный в штате Орегон, в породах возрастом около 33 млн лет (поздний олигоцен). У него полностью отсутствовали зубы,



Горбатый кит (*Megaptera novaeangliae*) из подотряда усатых китов. На фотографии хорошо виден китовый ус.

Фото Е.Г.Мамаева

не сохранилось даже альвеол. В то же время кости верхних челюстей были очень тонкими, что исключало возможность крепления китового уса. Компьютерная томография также показала отсутствие каких-либо свидетельств наличия китового уса. Зато следы крепления мышц черепа указали на формирование мощной мускулатуры щек, а строение гортани — на формирование подвиж-

ного языка. Такое строение ротовой полости позволяло киту питаться путем всасывания добычи. Название новому киту дали гордое — *Maiabalaena nesbittae*, что можно перевести как «Мать китов имени Э.Несбит».

Вот так гипотетически предсказанное переходное звено между зубатыми и усатыми китами приобрело свое материальное воплощение. ■

Литература / References

1. Boisserie J.-R., Liboreau F., Brunet M. The position of Hippopotamidae within Cetartiodactyla. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2005; 102 (5): 1537–1541. Doi:10.1073/pnas.0409518102.
2. Gingerich P.D., Russell D.E. Pakicetus inachus, a new Archaeocete (Mammalia, Cetacea) from the early-middle Eocene Kuldana Formation of Kohat (Pakistan). Contributions from the Museum of Paleontology, the Museum of Michigan. 1981; 25 (11): 235–246.
3. Thewissen J.G.M., Cooper L.N., Clementz M.T. et al. Whales originated from aquatic artiodactyls in the Eocene epoch of India. Nature. 2007; 450(7173): 1190–4. Doi:10.1038/nature06343.
4. Esperante R., Brand L., Nick K.E. et al. Exceptional occurrence of fossil baleen in shallow marine sediments of the Neogene Pisco Formation, Southern Peru. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2008; 257: 344–360. Doi:10.1016/j.palaeo.2007.11.001.
5. Sanders A.E., Barnes L.G. Paleontology of the Late Oligocene Ashley and Chandler Bridge Formations of South Carolina, 3: Eomysticetidae, a new family of primitive mysticetes (Mammalia: Cetacea). Paleobiology. 2002; 93: 313–356.
6. Peredo C.M., Pyenson N.D., Boersma A.T. Decoupling tooth loss from the evolution of baleen in whales. Frontiers in Marine Science. 2017; 4: 67. Doi:10.3389/fmars.2017.00067.
7. Peredo C.M., Pyenson N.D., Marshall C.D. et al. Tooth loss precedes the origin of baleen in whales. Current Biology. 2018; 28: 1–9. Doi:10.1016/j.cub.2018.10.047.

Toothless Ancestor of Baleen Whales

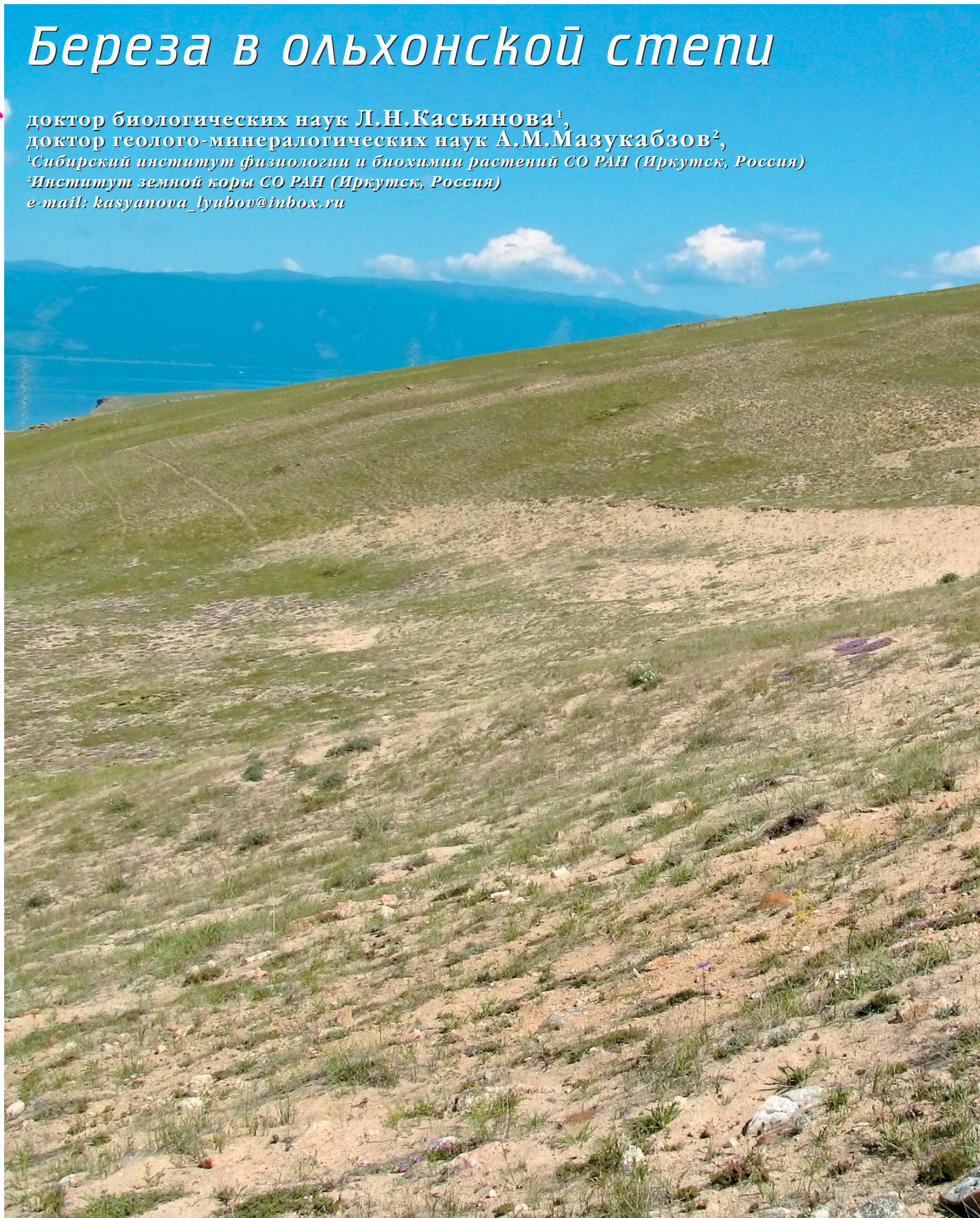
Ya.A.Popov
State Darwin Museum (Moscow, Russia)

The debatable aspects of the origin of the baleen whales' filter-feeder system are briefly discussed. The article describes the latest paleontological discovery, considered by experts as a transitional form between toothed and baleen whales.

Keywords: Mysticeti, baleen whales, baleen, whales evolution.

Береза в ольхонской степи

доктор биологических наук Л.Н.Касьянова¹,
доктор геолого-минералогических наук А.М.Мазукабзов²,
¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН (Иркутск, Россия)
²Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)
e-mail: kasyanova_lyubov@inbox.ru





Здесь и далее фото авторов

В сообщении рассказывается об уникальной березе, обнаруженной исследователями в степной части о.Ольхон на Байкале. Во все времена года одинокое дерево выдерживает натиск сильных байкальских ветров и иссушающую жару песчаной степи. Несмотря на экстремальные условия, березе удалось сформировать идеальную внешнюю форму, присущую прямостоящему лесному дереву. Классический облик березы сохраняется благодаря высокому адаптивному потенциалу вида.

Ключевые слова: Байкал, остров Ольхон, песчаные степи, береза, экологические условия.

На протяжении многих лет мы изучаем растительность и геологическую историю Ольхона — крупного острова на Байкале. За это время нам не раз приходилось убеждаться в самобытности местных ландшафтов и уникальности отдельных природных объектов. Особенности же климатических условий острова, которые выражаются в нестерпимом летнем зное, исходящем от безводных степных пространств, и в пронизывающем холодном, неистовом байкальском ветре, мы часто испытываем на себе во время наших многочисленных экспедиций.

В одном из маршрутов, при обследовании участка степи на юго-западном побережье острова, мы неожиданно повстречали уникальный объект. В тот день мы медленно продвигались по намеченному пути, преодолевая высокие холмы и широкие котловины. Спустившись с очередного возвышения в низину, мы заметили вдалеке темную точку, нарушающую монотонность приземистой степной растительности. Исследовательское любопытство заставило нас изменить маршрут и направиться к загадочному объекту. Чем ближе мы подходили к нему, тем все более возрастало наше нетерпение. Приблизившись, мы ахнули от удивления. Перед нашим взором предстала береза. Сразу вспомнились слова известной песни «Во поле береза стояла»...

Стройная красавица одиноко возвышалась в степи, являя собой чудесное творение природы. Ее внешний облик, отразившийся в форме ствола и структуре побегов, согласно существующим в биологии экологическим и морфологическим признакам, был совершенен.

Почему же этот экземпляр березы вызвал у нас такое восхищение? Дело в том, что на Ольхоне береза мало распространена. Небольшие вкрапления березняков можно встретить лишь среди лесных фитоценозов в гористой, наиболее увлажненной восточной части острова. Например, банный березовый веник в обиходе жителей Ольхона — большая редкость. Чтобы достать такой, надо не только знать места произрастания березы, но и иметь возможность и большое желание добраться туда.

© Касьянова Л.Н., Мазукабзов А.М., 2018

Заметки и наблюдения

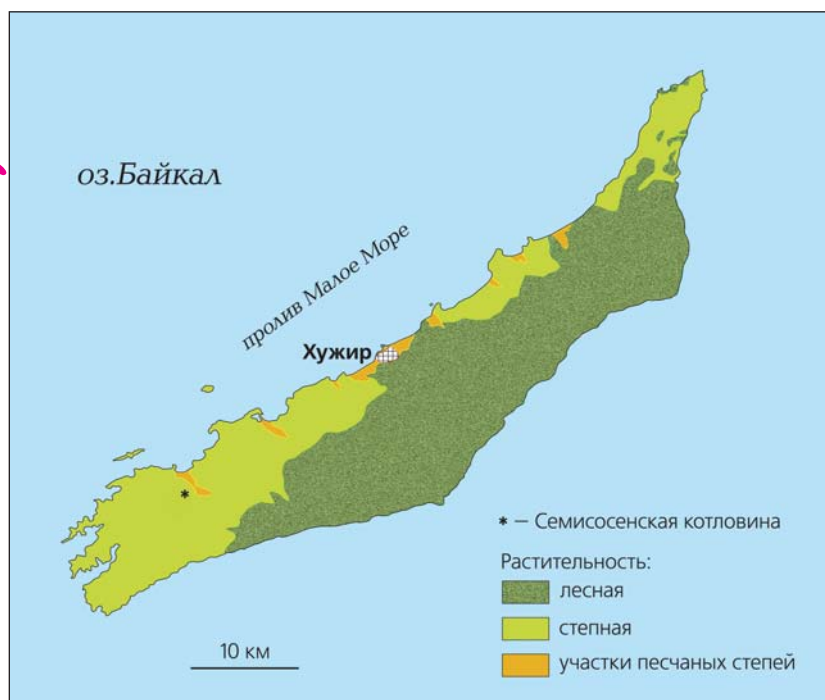


Схема растительности о.Ольхон.

Встреченный нами экземпляр — береза повислая (*Betula pendula* Roth). Этот вид произрастает в разных природных зонах Евразии. В европейской части России он наиболее распространен в лесной и лесостепной зоне. За Уральскими горами, в Западной и Средней Сибири, ареал бе-

резы повислой протягивается с севера на юг, от тундры до степи. Восточная граница распространения вида находится у Байкала [1].

Наша береза растет в западной, степной, части Ольхона, в Семисосенской котловине, расположенной на берегу одноименной губы и пролива Малое Море. Дереву приблизительно 50 лет. Оно имеет один ствол высотой около 10 м и обхватом 90 см (на высоте 1.3 м). Кора ствола преимущественно белая, но на высоте примерно 1 м от поверхности имеет желтоватый оттенок из-за прикосновений рук любопытных туристов и тел домашнего скота, пасущегося поблизости. Крона березы расположена высоко — в 210 см от поверхности почвы. Структуру кроны образуют живые скелетные ветви, растущие в двух направлениях, вверх и немного в стороны. Боковые

скелетные ветви ориентированы от ствола под острым углом вверх, верхушечные — почти вертикально вверх. При этом верхушечные ветви немного толще боковых.

В летний период ветви березы с развернувшимися полностью листьями образуют компактную,



Одинокая береза на просторах Семисосенской котловины. На заднем плане — голубая гладь Семисосенской губы.

почти овальную крону. За десятки лет одиночного развития среди безводного пространства ольхонской степи березе удалось сформировать идеальную внешнюю форму, характерную для лесных деревьев. В широко известной системе жизненных форм растений И.Г.Серебрякова береза повислая относится к одноствольным кронообразующим деревьям с листопадным ритмом развития листвы и полностью одревесневающими удлинёнными побегами [2, 3]. Ствол березы данной жизненной формы способен интенсивно наращивать длину и толщину до 50–60 лет, при общей продолжительности жизни дерева 100–120 лет.

По нашему мнению, одинокая береза выросла из семени, которое было случайно занесено в степную часть острова ветром, птицами, животными, рыбаками или туристами. Сам по себе факт попадания семян деревьев на степные участки — обычное явление. Однако благополучное развитие дерева в ольхонской степи в течение нескольких десятков лет из семени до взрослого растения — случай для природы острова уникальный.

Попробуем разобраться в особенностях биологического развития березы повислой, живущей на острове в экстремальных условиях. Из публи-



Степная юго-западная часть о.Ольхон. Значком показано месторасположение березы.

www.google.com/earth

каций по экологической морфологии растений мы знаем, что у березы на протяжении жизни обычно наблюдается несколько возрастных периодов, которые связаны с развитием главного ствола и формированием кроны [2].



Жизнестойкая береза повислая в песчаной степи Ольхона в разные сезоны года. Снимок справа хорошо передает идеальную структуру вегетативных органов дерева.

Самый ранний период охватывает промежуток времени от пяти до восьми лет. В это время проростки березы обычно находятся в травяном покрове, под пологом кустарников и среди подроста деревьев, образуя одностебельную структуру. Благодаря теневыносливости молодое дерево успешно развивается и при ограниченном количестве солнечного света. К 10–15 годам березы перерастают травостой и выходят из затенения. В условиях высокой освещенности подрост березы образует многочисленные быстрорастущие побеги. Из-за их слабой соподчиненности молодые особи приобретают облик куста. В возрасте от 10–15 до 40–50 лет у дерева усиливается рост главной (лидерной) оси и пробуждается соподчиненность между главной осью и боковыми побегами. В результате у березы формируется древовидная форма с островершинной кроной, в которой хорошо выражена главная ось. По толщине она превосходит все боковые ветви. После 50 лет у дерева изменяется общее направление роста ветвей в кроне. В зависимости от климатических условий у одних экземпляров деревьев ветви продолжают расти вверх, а у других свешиваются вниз, придавая дереву так называемую плакучесть. Это явление считается следствием ослабления камбиальной деятельности в органах березы, ведущего к формированию в кроне тонких побегов с длинными междоузлиями. Однако плакучесть у березы появляется не только под влиянием внутренних процессов. Она может возникнуть и в конкурентной борьбе за воздушное пространство, а также вследствие постоянного воздействия сильного ветра.

В позднем возрастном периоде березы, от 50–70 до 100–120 лет, ростовые процессы

в главной оси дерева постепенно затухают. Постепенно она утрачивает лидирующее положение среди ветвей верхней части кроны. Перестройка в организме березы приводит к прекращению роста дерева в высоту, но при этом прирост в толщину у ствола и ветвей сохраняется. Крона зрелых деревьев постепенно приобретает раскидистый куполообразный облик. Со временем в ней увеличивается доля усыхающих ветвей, причем возрастные явления не вызывают полной атрофии деревьев. Они продолжают развиваться за счет образования вторичной кроны из спящих почек ветвей и ствола.

Следует подчеркнуть, что в формировании жизненной формы дерева как единого организма важную роль выполняет главная ось. Она регулирует интенсивность роста всех боковых ветвей, обеспечивая им соподчиненность и расположение на побегах ассимилирующих органов (листьев). Данную соподчиненность, как известно, создает камбий в результате своей деятельности, стимулирующей приток ростовых веществ к верхушке.

Очевидно, что растущая в ольхонской степи одинокая береза повислая находится в необычных для этого вида экологических условиях. Ее местобитание представляет собой котловину, простирающуюся от пляжа вглубь суши на 2 км. У берега ширина котловины составляет 1,5 км, а по мере удаления от озера она снижается до 0,6 км.

Дно и частично склоны котловины покрыты золовыми песками, источником которых служит пролив Малое Море [4]. Следует пояснить, что отдельные песчаные массивы встречаются по всему западному побережью острова. Их формирование началось около 0,7 млн лет, продолжается

оно и в настоящее время. Эти процессы тесно связаны с мелководными заливами, поскольку транзит песчаного материала и его осаждение на суше начинается с пляжей. Под воздействием волн песок выбрасывается в береговую зону, где подхватывается ветром. Часть материала осаждается в прибрежной части острова, здесь формируются золовые дюны различной мощности. Дюнные пески на Байкале, и в частности на Ольхоне, встречаются лишь локально, тем не менее по генезису они близки береговым песчаным дюнам, образующимся вне пустынных зон, на побережьях морей и океанов.

На подвижных дюнах Ольхона развивается растительность, считающаяся для острова азональной. Она складывается фитоценозами степного и лесного ти-



Псаммофитная растительность, формирующаяся в котловине на золовых песках.

пов. Лесной комплекс представлен остепненными сообществами из сосны обыкновенной с участием лиственницы сибирской, а также сосны и лиственницы необычных жизненных форм, растущих поодиночке или группами. Степной комплекс состоит из псаммофитных фитоценозов, в нем доминируют растения, приспособленные к жизни на песках.

Как известно, в формировании азональной растительности главную роль играет почвенный фактор [5]. Песчаный субстрат, несомненно, определяет формирование этих комплексов на берегах Байкала и на Ольхоне. Но немаловажную роль играет и климат. Особенности природной среды песчаного побережья Ольхона дополняют сильные ветры и небольшое годовое количество атмосферных осадков.

Огромное влияние на островной климат оказывает водная масса Байкала, определяющая формирование необычного температурного и ветрового режима, а также горные хребты, перераспределяющие воздушные массы над побережьем и акваторией. Так, Приморский хребет, окаймляющий впадину Байкала с запада, представляет собой громадный климатический барьер, на котором осаждается влага воздушных масс, движущихся к озеру. По этой причине Ольхон и Приольхонье получают осадков меньше (191–203 мм), чем все остальное побережье Байкала [6].

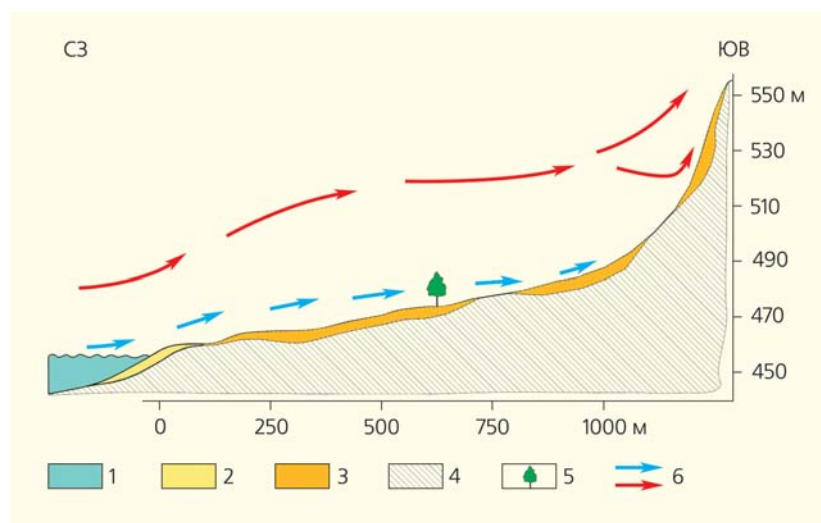
Растительность территории во многом определяется радиационным индексом сухости, т.е. соотношением тепла и влаги. Установлено, что для бореальных лесов этот показатель составляет 0,5–1, для степей — 1–2, для полупустынь — 2–3, для пустынь — >3. Индекс сухости ольхонских степей составляет 1,86, что примерно соответствует степной зоне умеренных широт, годовое увлажнение которой оценивается как умеренно-недостаточное и скудное [7–10].

Семисосенская котловина на востоке, западе и юге ограничена холмами разной высоты, в то время как северная ее часть открыта ветрам из акватории Байкала. Как уже говорилось, силь-



Растительность песчаного пляжа.

ные ветры способствуют транспортировке песка с пляжа через все пространство котловины вглубь острова [11, 12]. Песчинки проносятся высоко над земной поверхностью, и по пути из воздушного потока сначала выпадают тяжелые фракции, тонким слоем покрывающие дно котловины. Легкие и средние фракции песка отлагаются на бортах котловины в виде невысоких гряд.



Продольный профиль Семисосенской котловины. Условные обозначения: 1 — оз. Байкал, 2 — галечно-песчаный пляж, 3 — современные покровные эоловые пески, 4 — коренные породы, 5 — местоположение березы, 6 — направление воздушных потоков (синяя стрелка — насыщенных водяными парами, красная — транспортирующих песчаный материал).



Сосна на Сарайском песчаном массиве на берегу одноименного залива. На дереве заметны ветви без хвои, оголившиеся в результате механического воздействия песка, переносимого сильным ветром.

Воздушные потоки, несущие песок, по всей видимости, проносятся над кроной дерева. На стволе и ветвях березы мы не обнаружили следов механических повреждений, обычно остающихся на деревьях от воздействия песчинок, переносимых ветром. При этом в аналогичных песчаных массивах Ольхона, где ветер со стороны Байкала имеет иное направление и более высокую мощность, встречаются сосны и лиственницы со сбитой хвоей.

Гармоничный внешний облик березы указывает на то, что она развивается в условиях оптимального увлажнения. Вероятно, дерево получает влагу из грунтовых вод, которые накапливаются в трещинах подстилающих горных пород. Об их наличии говорят небольшие участки луговин, поросшие влаголюбивыми осоками.

Кроме того, дополнительным источником воды для березы, как и для других степных растений ос-

трова, служит конденсационная влага, которая оседает на листьях и ветвях из росы и тумана. Туманы здесь в теплый период года — обычное явление. Они зарождаются над акваторией Байкала и проникают вглубь суши настолько, насколько позволяет орография и погодные условия [13]. Туманы насыщают листья влагой, и таким образом растения частично удовлетворяют свои потребности в воде [14–17].

Вопреки тому, что во все времена года ольхонская береза подвергается напору сильных байкальских ветров, ствол ее не согнулся, не наклонился, а ветви не разметались в разные стороны. Правильная и компактная внешняя форма дерева свидетельствует о его значительном адаптивном потенциале. В настоящее время береза одиноко стоит среди обширного пространства степи. Она не угнетена. Ее облик идеален.

Одиноко стоящие деревья издревле привлекали внимание людей и почитались в культуре разных народов. Так и эта береза овеяна легендами. В одной из них рассказывается о шаманке, погибшей, а затем вернувшейся к людям в виде одинокого дере-

ва. Местные жители уверяют, что издали в кроне можно заметить очертания женского лица.

В течение долгого времени береза была известна лишь местным пастухам, и дерево росло без помех. Однако в последние годы с развитием туризма на острове окрестности стали многолюдными, отчего травяной покров вокруг ствола начал деградировать. Сейчас, чтобы защитить одинокое дерево, неравнодушные люди пытаются соорудить ему достойное ограждение.

Желая сберечь этот экземпляр березы от вандалов, мы подали запрос в сертификационную комиссию Всероссийской программы «Деревья — памятники живой природы», занимающуюся вопросами сохранения природного наследия нации. Решением этой комиссии жизнестойкая береза повислая на острове Ольхон признана уникальной и включена в Национальный реестр деревьев России. ■

Литература / References

1. Конспект флоры Сибири. Новосибирск, 2005. [Abstract of flora of Siberia. Novosibirsk, 2005. (In Russ.).]
2. Серебряков И.Г. Экологическая морфология растений. М., 1962. [Serebryakov I.G. Ecological morphology of plants. Moscow, 1962. (In Russ.).]

3. Серебряков И.Г. Жизненные формы высших растений и их изучение. Полевая геоботаника. М.; Л., 1964: 146–205. [Serebryakov I.G. Life forms of higher plants and their study. Field geobotany. Moscow; Leningrad, 1964; 146–205. (In Russ.).]
4. Агафонов Б.П., Акулов Н.И. О природе песчаных потоков на Ольхоне. Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2006; 5: 101–108. [Akulov R.G., Agafonov N.I. About the nature of quick-sand streams on Olhone. Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2006; 5: 101–108. (In Russ.).]
5. Вальтер Г. Растительность земного шара. Эколого-физиологическая характеристика. М., 1975; 3. [Walter G. Vegetation of the Earth. Ecological and physiological characteristics. M., 1975; 3. (In Russ.).]
6. Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств. Новосибирск, 1977. [Climate structure and resources of Baikal and adjacent spaces. Novosibirsk, 1977. (In Russ.).]
7. Иванов Н.Н. Ландшафтно-климатические зоны земного шара. Записки географического общества. М.; Л., 1948. [Ivanov N.N. Landscape-climatic zones of the Earth. Notes of a geographical society. Moscow; Leningrad, 1948. (In Russ.).]
8. Григорьев А.А. Географическая зональность и некоторые ее закономерности. Известия Академии наук СССР. Серия географическая. 1954; 5: 17–39. 1954; 6: 41–50. [Grigoriev A.A. Geographical zonality and some of its laws. News of the Academy of Sciences of the USSR. Geographical series. 1954; 5: 17–39. 1954; 6: 41–50. (In Russ.).]
9. Будыко М.И. Глобальная экология. М., 1977. [Budyko M.I. Global ecology. M., 1977. (In Russ.).]
10. Буфал В.В., Панова Г.П., Стрелочных Л.Г. Радиационный режим и тепловой баланс. Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств. Новосибирск, 1977; 21–50. [Bufal V.V., Panova G.P., Strelochnykh L.G. Radiation mode and heat balance. Climate structure and resources of Baikal and adjacent spaces. Novosibirsk 1977; 21–50. (In Russ.).]
11. Агафонов Б.П. Распространение и прогноз физико-географических процессов в Байкальской впадине. Динамика Байкальской впадины. Новосибирск, 1975; 59–138. [Agafonov B.P. Distribution and prediction of physiographic processes in the Baikal Basin. Dynamics of the Baikal Basin. Novosibirsk, 1975; 59–138. (In Russ.).]
12. Вика С., Снытко В.А., Шчипек Т. Ландшафты подвижных песков острова Ольхон на Байкале. Иркутск, 1997. [Vika S., Snytko V.A., Shchipek T. Landscapes of the moving sands of Olkhon Island on Baikal. Irkutsk, 1997. (In Russ.).]
13. Ладейщиков Н.П. Туманы на Байкале. Известия Восточно-Сибирского отдела Географического общества. Иркутск, 1960; 59(1): 14–37. [Ladeyschikov N.P. Fogs on the Baikal. Proceedings of the East Siberian division of the Geographical Society. Irkutsk, 1960; 59 (1): 14–37. (In Russ.).]
14. Библи Р. Цитологические основы экологии растений. М., 1965. [Bible R. Cytological basis of plant ecology. Moscow, 1965. (In Russ.).]
15. Милторп Ф.Л. Поступление и расход воды в сухих и засушливых зонах. Растение и вода. Л., 1967; 5–63. [Miltorp F.L. Receipt and consumption of water in dry and arid zones. Plant and water. Leningrad, 1967; 5–63. (In Russ.).]
16. Мирославов Е.А. Структура и функция эпидермиса листа покрытосеменных растений. Л., 1974. [Miroslavov E.A. Structure and function of the epidermis of the leaf of angiosperms. Leningrad, 1974. (In Russ.).]
17. Касьянова Л.Н. Экология растений Прибайкалья. Водный обмен. М., 2004. [Kasyanova L.N. Plant ecology of the Baikal region. Water exchange. Moscow, 2004. (In Russ.).]

Birch in the Olkhon Steppe

L.N.Kasyanova¹, A.M.Mazukabzov²

¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russia)

²Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russia)

The presented report describes a unique birch tree, discovered by researchers in the steppe part of Olkhon Island in Lake Baikal. At all seasons a solitary tree can withstand the onslaught of strong Baikal winds and the drying heat of the sandy steppe. Despite the extreme conditions, the birch tree managed to form an ideal external shape inherent to an erect forest tree. The classical appearance of birch is preserved due to the high adaptive potential of the species.

Keywords: Baikal, island Olkhon, sandy steppe, birch, ecological factories.

Времена и люди **Джон Уилер:** смелый консерватизм в науке

доктор педагогических наук Р.Н.Щербаков (Таллин, Эстония)

e-mail: robert.scherbakov@rambler.ru

Выдающийся американский физик Дж.А.Уилер (1911–2008) знаменит своими работами по квантовой механике и ядерной физике, общей теории относительности и квантовой гравитации, астрофизике и космологии. Он был также известен предсказанием тенденций развития фундаментальных законов Вселенной. Его трудами создана крупная американская научная школа физиков.

Ключевые слова: Теория Бора—Уилера, геометродинамика и квантовая гравитация, информация и законы физики, научная школа Уилера и «семья гравитационистов».

Уилера толкала вперед жажда узнать, что лежит за пределами установленных законов.

К.С.Торн

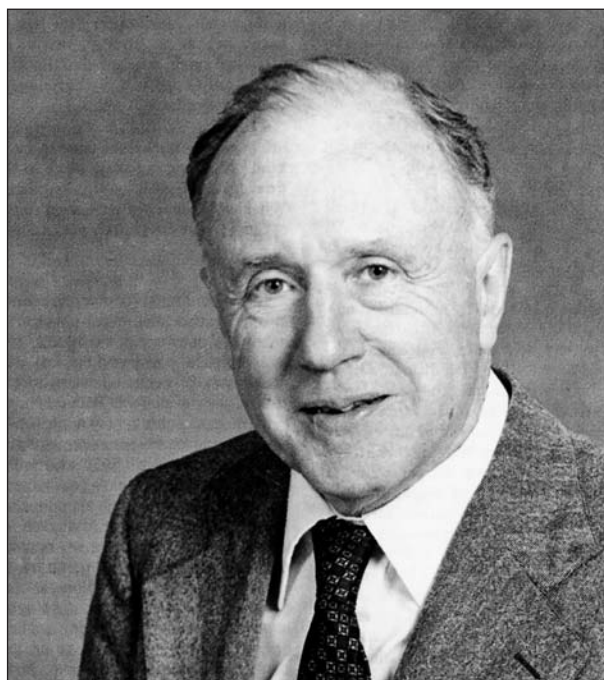
Джон Арчибалд Уилер родился 9 июля 1911 г. в г.Джэксонвилле (Флорида, США). В годы учебы в Университете Джонса Хопкинса он заинтересовался как взрывчатыми веществами и механическими устройствами, так и тонкостями атомно-молекулярного учения. С изучением инженерного дела Уилеру открылась ценность математики при решении задач, за которые он брался в течение последующей работы в области науки и техники.

Его научную деятельность можно разделить на три основных следующих друг за другом этапа. Первый, продолжавшийся до начала 1950-х годов, был посвящен идее, что всё в мире — это частицы. Второй основывался на увлечении общей теорией относительности и вытекающей из нее идеей, что всё определяют поля. На последнем этапе (1990–2008 гг.) своих исследований ученый подошел к пониманию значения логики и информации как основы будущей физической теории.

Окончив в 1932 г. университет, Уилер в возрасте 21 года получил докторскую степень по квантовой физике — как раз в тот момент, когда в науке стала очевидной значимость открытий Э.Р.Й.А.Шрёдингера и В.К.Гейзенберга. В том же году был открыт нейтрон, а Д.Д.Иваненко и В.К.Гейзенберг выдвинули гипотезу, что ядра состоят из протонов и нейтронов. Эти открытия позволили представить ядро так же ясно, как сам атом.

Вот как Джон вспоминал эти годы: 1933–1934 гг. я проработал у Грегори Брейта*, который оказал

* Г.Брейт (1899–1981) — американский физик. Занимался ядерной физикой, квантовой механикой и электродинамикой, физикой высоких энергий и вопросами теории ускорителей. Член Национальной академии наук США (1939).



Дж.А.Уилер.

Фото из коллекции Техасского университета
www.quotationof.com

на меня большое влияние. В эти дни как он, так и вся его группа интуитивно придерживались следующей модели ядра: нейтроны и протоны двигались в общем самосогласованном поле, аналогичном электрическому полю атома. Принятая нами модель была не только «недоработанной», она была во многом неясной [1, с.709].

Получив стипендию для продолжения образования, Уилер по совету Брейта провел 1934 год в Копенгагене, в Институте Нильса Бора при Ко-

пенгагенском университете. Здесь он вместе с датским физиком К.Мёллером* приступил к изучению новых идей относительно атомного ядра, познакомился с экспериментами Э.Ферми на медленных нейтронах, попытался проанализировать их вместе с другими стажерами. Однако без участия Н.Х.Д.Бора у них мало что получалось.

Отсутствие в институте Бора, связанное с его переживаниями по поводу гибели сына, не позволило Уилеру «по-настоящему» встретиться с ним в 1934 г. И лишь к концу стажировки, когда Бор стал приходить в свое привычное творческое состояние, начались беседы с ним. Но было уже поздно. Весной 1935 г. Джон был вынужден возвратиться домой в США, где до 1938 г. работал в Университете Северной Каролины.

Исследования по квантовой механике и делению ядра

Однако еще до этой поездки он вместе с Брейтом создал теорию процесса рождения электрон-позитронной пары при столкновении двух фотонов, который принимает форму взаимодействия γ -квантов в ходе такого превращения. Подобный процесс был предсказан ими для сильных электрических полей и применения лазерных импульсов большой мощности.

Процесс этот — одно из проявлений эквивалентности массы и энергии — не наблюдался на практике из-за сложности фокусировки встречных γ -лучей. Но в 1997 г. в Национальной ускорительной лаборатории удалось реализовать процесс Брейта—Уилера, используя электроны для создания высокоэнергетических фотонов, которые, участвуя в целом ряде столкновений, в итоге превращались в электроны и позитроны.

Продолжая исследования, Джон в 1937 г. для описания взаимодействий ввел в обиход матрицу рассеяния (S-матрицу, элементы которой описывают физические параметры рассеяния), а также понятие унитарной симметрии.

В 1939 г. Бор прибыл в Принстон, где Уилер преподавал уже год. Там, опираясь на открытие деления ядра (сделанное Л.Мейтнер и О.Р.Фришем), он вместе с Джоном разработал квантовую теорию явлений в тяжелых ядрах при их взаимодействии с нейтронами. Согласно ей, механизм деления ядра базируется на капельной модели деления ядра. Эта теория изложена в журнале

* Кристиан Мёллер (1904–1980) — датский физик. Специалист по теории относительности, квантовой механике, квантовой теории поля, а также по физике элементарных частиц и матрице коэффициентов (последняя связывает асимптотическое поведение произвольного частичного решения интегрального уравнения с решениями в стандартной форме). Причем сделал он это независимо от Гейзенберга, который предложил матрицу рассеяния в 1943 г.



Н.Бор и А.Эйнштейн — учителя Дж.Уилера.

«Physical Review» в июле 1939 г. в статье «Механизм деления ядер». В ней же было доказано, что редкий в природе изотоп ^{235}U делится под действием тепловых нейтронов.

Авторы писали: *...объяснение, которое мы можем дать на основе капельной модели ядра не только самой возможности делений, но также зависимости сечения деления от энергии и изменения критической энергии от ядра к ядру, в главных чертах подтверждается сравнением данных наблюдений с теоретическими предсказаниями* [2, с.349]. Последний раз Уилер (с группой историков науки) встретился с Бором в Нью-Йорке в 1961 г. при обсуждении проекта «Архив источников к истории квантовой физики».

Заметка о теории деления тяжелых ядер несколько ранее была опубликована Я.И.Френкелем в «Journal of Physics» (издаваемом в СССР) и «Physical Review». Ее расширенный вариант Френкель отправил и Бору. В примечании к упомянутой совместной с Уилером статье Бор отметил, что у Френкеля *содержится вывод уравнения... описывающего стабильность ядра относительно произвольных малых деформаций, а также некоторые замечания о форме капли в состоянии неустойчивого равновесия...* [2, с.308].

В том же 1939 г. Дж.Уилер с Э.Ферми, Ю.Вигнером и Л.Сцилардом математически обосновал воз-

возможность цепной реакции деления урана, объяснил отрицательное влияние продуктов деления на ход цепной реакции и разработал методы управления ядерным реактором. Сам Джон выдвинул идею об универсальности фермиевого взаимодействия, что помогло практике освоения цепной реакции. Вслед за работами О.Н.Бора и Б.Р.Моттельсона в 1950–1952 гг., Дж.Уилер вместе с Д.Л.Хиллом в 1953 г. разработал коллективную модель ядра и предсказал существование мезоатомов (в которых часть или все электроны заменены на другие элементарные частицы с отрицательным электрическим зарядом).

В 1940 г., когда уже шла Вторая мировая война, американские ученые А.Нир и Дж.Р.Даннинг провели эксперимент, подтвердивший гипотезу Бора—Уилера о делении ядер урана под действием медленных нейтронов, что действительно происходит для изотопа ^{235}U . Это было важно для работ по атомной энергии и в мирных, и в военных целях. Сам Уилер в 1942 г. занялся наладкой, проверкой надежности и устранением неполадок в работе первого в США реактора в Хэнфорде.

Двумя годами ранее его ученик Р.Ф.Фейнман работал над докторской диссертацией. В ходе ее обсуждения была создана теория Уилера—Фейнмана об излучении, описывающая взаимодействие двух заряженных частиц через волны, распространяющиеся вперед и назад во времени (в фейнмановском мире приставка «анти» в названии частицы означала ту, что движется назад во времени). Из-за изменения фаз на заряженных частицах эти волны взаимно уничтожаются везде, кроме области пространства-времени между самими частицами, где они усиливают друг друга.

Авторы теории решили выяснить, что происходило бы в мире, где запаздывающие и опережающие волны существуют на равных основаниях. Если сигналы, посылаемые в прошлое, полностью гасятся своим эхом, то в непрозрачной Вселенной будут только запаздывающие, посылаемые в прошлое электромагнитные волны, даже если каждая заряженная частица будет излучать одинаково как запаздывающие, так и опережающие волны. В итоге обычная радиопередача станет поистине событием космического масштаба.

Уилер предложил гипотезу одноэлектронной Вселенной. Она послужила основой при создании модели Вселенной, в которой все электроны — это один электрон, находящийся попеременно в разных точках пространства. Предпосылкой для создания Джоном этой гипотезы стал принцип тождественности электронов, т.е. невозможность экспериментально различить два электрона. В 1965 г. в своей нобелевской речи Фейнман рассказал о телефонном разговоре с Уилером на эту тему. В разговоре Уилер заметил: «Фейнман, я знаю, почему у всех электронов одинаковый заряд и одинаковая масса». Почему? «Потому что

все они — это один и тот же электрон!». Однако, — продолжил Фейнман, — я ухватился за его мысль о том, что позитроны можно представлять просто как электроны, идущие из будущего в прошлое... Вот это я и присвоил! [3, с.36]. В 1948 г. Фейнман разработал подход к квантовой теории, согласно которому античастица рассматривалась как частица, движущаяся обратно во времени.

В последующие годы квантовая механика в гипотезах и делах Джона воплотилась в ряде исследований и поступков, чему способствовали следующие обстоятельства. Во-первых, квантовая механика (вместе с общей теорией относительности) развивалась и применялась в разных областях физики первой половины XX в., став составной частью астрофизики и космологии (Уилер и его сторонники попытались с ее помощью решить ряд актуальных проблем).

Во-вторых, оказался полезным богатейший опыт, полученный Уилером в ходе работ по созданию атомной и водородной бомб. Он позволил ученому и его ученикам применить накопленные представления о поведении вещества при высочайших давлениях и температурах к изучению процессов, протекающих при образовании во Вселенной черных дыр, а также объяснить их существование как возможных квантовых объектов.

В-третьих, всю жизнь Джон занимался квантовой механикой ради понимания природы квантовых наблюдений и поисков ответа на вопрос: «Откуда взялся квант?», ради разгадки тайн Вселенной и своей идеи изменчивости законов после схлопывания Вселенной, ради выяснения возможной роли информации в постижении законов мира и т.д., прибегая при этом к ставшим известными впоследствии мысленным экспериментам.

И, в-четвертых, в 1960 г. Уилер из чисто гуманитарных соображений возглавил Архивный комитет по сбору информации от создателей квантовой науки. Нужно было спешить, ибо уже в 1954–1960 гг. ушли из жизни Э.Ферми, А.Эйнштейн, Дж. фон Нейман, Э.В.Паули, а в 1961 г. — Э.Р.Й.А.Шрёдингер, так что в рядах исследователей квантовой механики возник зияющий пробел. К счастью, оставались еще в живых В.К.Гейзенберг, Н.Бор, П.А.М.Дирак, М.Борн и многие другие классики, все же позволившие сохранить историю этой науки для общества.

Геометродинамика Джона Уилера

В 1950-х годах развитие квантовой теории продолжалось, и большинство физиков предпочитало заниматься ею. Общая теория относительности тогда уже потеряла свою актуальность, а Эйнштейн с его попытками создать единую теорию поля оказался практически в одиночестве, разбавляемом лишь отдельными учениками. При жизни

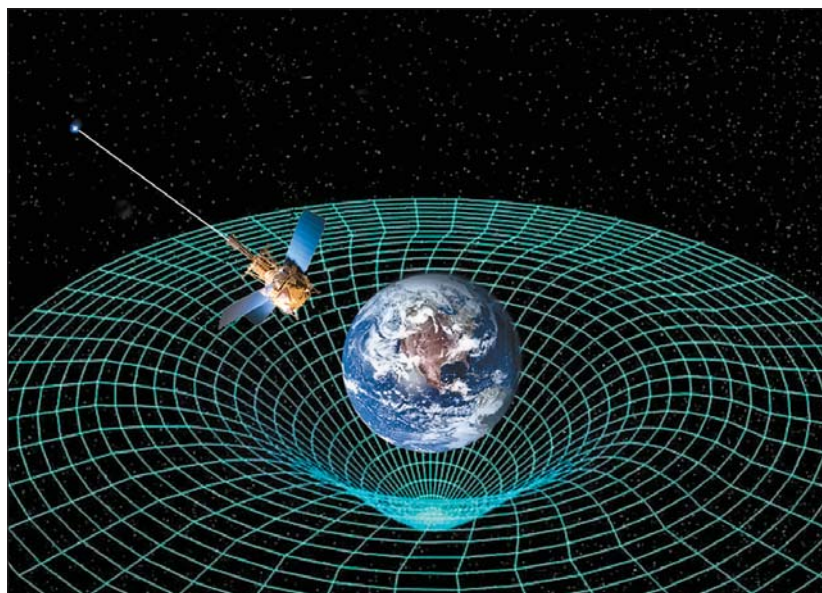
Эйнштейна не было проведено ни одной международной конференции или Сольвеевского конгресса, посвященных обсуждению общей теории относительности и ее роли в существовании Вселенной. Занятие этой проблемой казалось делом малоперспективным, и только отдельные ученые (и среди них профессор Уилер) еще сохраняли веру в ее будущее в науке, и в этом, кстати, была их немалая заслуга.

С 1938 г. Джон надолго обосновался в Принстонском университете. Как и Эйнштейн, служивший там же, он полагал, что путь к законам природы лежит через общую теорию относительности. Но, как ученик Бора, верил также в значительные возможности квантовой механики. Поэтому Уилер не просто занялся теорией гравитации как таковой, но, привлекая квантовую механику Бора и Гейзенберга, попытался примирить две науки и заставить их служить разгадке тайн Вселенной и бытия в целом.

Воплощение в жизнь своей идеи Джон начал в 1952 г. с преподавания теории относительности. В мае 1953 г. он с согласия Эйнштейна пригласил студентов своего курса на встречу с ним, чтобы побудить их к серьезному изучению этой теории. Спустя год он убедил Эйнштейна провести семинар для избранной группы студентов-физиков с надеждой на их увлечение релятивистской гравитацией в ближайшем будущем. Впрочем, и самому Уилеру беседы с Эйнштейном принесли немалую пользу.

Успех Джона в решении этой сложнейшей проблемы — релятивистской гравитации — определили две его особенности. Во-первых, способность интуитивно выбирать такие пути исследования, которые ведут к прогрессу в постижении загадок Вселенной. Во-вторых, энергия личности, которая вызывала у его окружения преклонение перед ним как ученым и безоговорочную веру в его способности пробудить у своих последователей их таланты и волевые качества для изучения поставленных перед ними задач.

Годы спустя Уилер вспоминал об этом как о *первом шаге на территорию, захватившую... воображение и на всю жизнь задавшую направление... дальнейших исследований* [4, с.141]. Подобно А.С.Эддингтону и В.А.Фоку, Джон не считал удачным название *общая теория относительности*, предпочитая называть науку *геометродинамикой*, чтобы подчеркнуть, что сущность этой теории заключена в ее динамической геометрии, изменяющейся в пространстве и времени.



Как материя искривляет пространство-время.

Изображение НАСА

В 1955 г. Уилер предложил геометродинамическую модель объекта, заменяющую массу, — *геон*. По его определению, *геон — это... сгусток электромагнитного или гравитационного излучения или обоих вместе, который удерживается как одно целое гравитационным притяжением* [5, с.22]. Тем самым он пытался перейти к геометризации физики, т.е. к воплощению идеи У.К.Клиффорда об искривлениях и деформациях в ткани пространства как основе явлений и природы реальности в целом.

Отказ ученого от концепции *частиц как точек* и переход его к идее *частиц как дырок* открывал в те годы теоретикам возможности для понимания загадок природы с позиций здравого смысла. С этой целью в работе «Геоны» Джон привел наглядные иллюстрации того, как специфические феномены в искривленной геометрии пространства способны порождать эффекты *массы без массы* и *электрического заряда без заряда*, обеспечивая в итоге ученых объективными знаниями о мире.

Уилер посчитал нужным возвратиться в физику и идею А.Эйнштейна и Н.Розена (1935) о раздвоенной природе электрических зарядов как о двух концах одной и той же трубки-перемычки, проходящей через другое измерение в ткани пространства, по Джону — *кратовой норы*, два конца которой могли бы соответствовать, например, паре электрон-позитрон. Нужны только своего рода *дыры* в пространстве, заполняемые электрическими полями зарядов.

В том же 1955 г. Джон предпринял первую попытку в объединении законов квантовой механики и общей теории относительности. Он пришел к выводу, что в области размерности Планка—Уи-

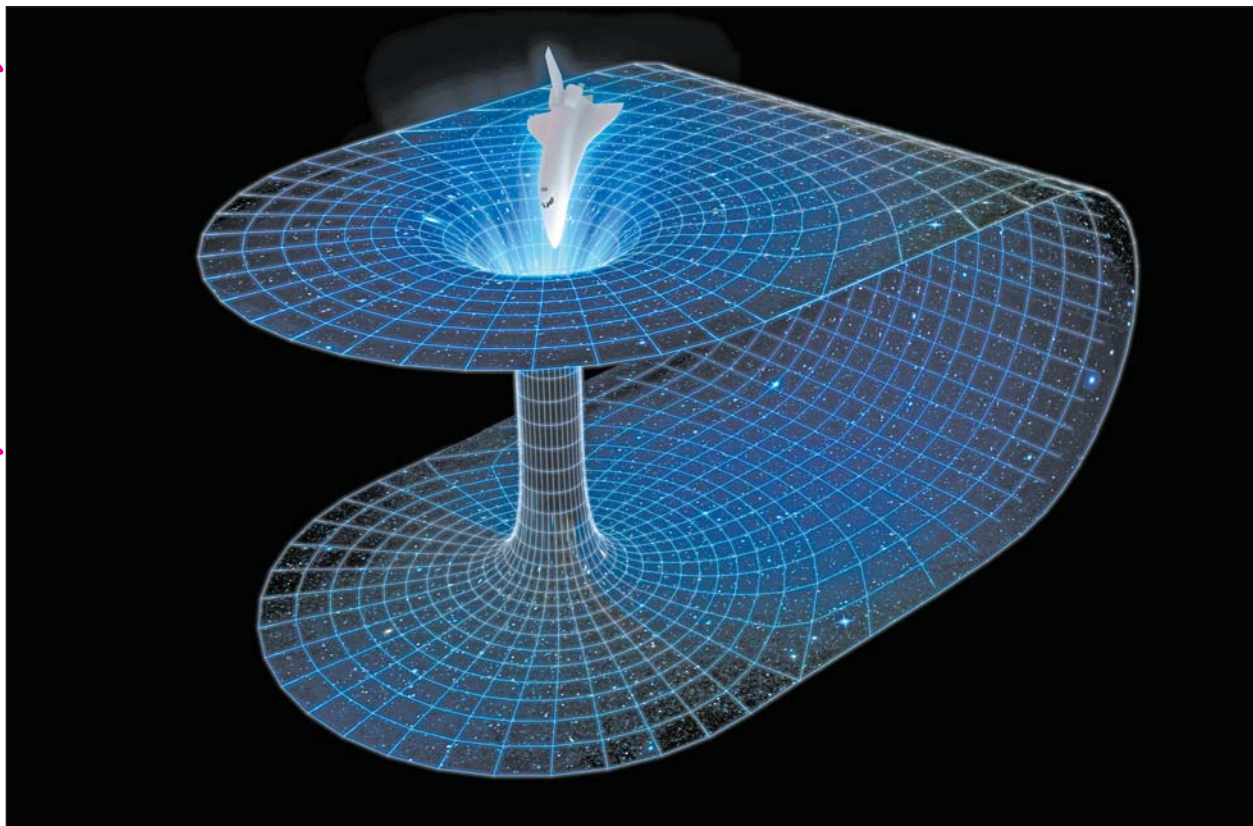
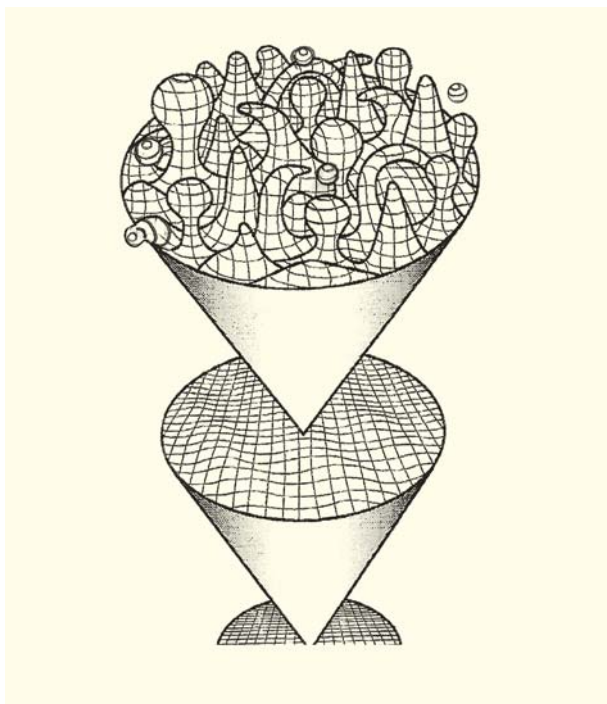


Иллюстрация идеи А.Эйнштейна и Н.Розена. Уилер назвал ее кротовой норой в пространстве-времени.

Рисунок А.Войцицкого (Science Photo Library, Getty Images).
www.thoughtco.com



Рисунок, изображающий флуктуацию вакуума в области размерности Планка—Уилера и образование квантовой пены.

лера ($1.62 \cdot 10^{-33}$ см или меньше) флуктуации вакуума так велики, что само пространство «вскипает», превращаясь в квантовую пену — ядро сингулярности пространства-времени*. Понимая сложность проблемы, он проанализировал пути ее решения, предлагаемые другими учеными.

Впрочем, еще в 1916 г. Эйнштейн понял, что квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации [6, с.522], в 1918 г. он вновь заметил, что построение усовершенствованной квантовой теории должно повлечь за собой и видоизменение теории тяготения [6, с.642], а в 1935 г. М.П.Бронштейн** в своей докторской диссертации уже предложил квантование гравитационных волн.

* Сингулярность — область пространства-времени, в которой его кривизна становится настолько сильной, что нарушаются законы общей теории относительности и вступают в действие законы квантовой гравитации.

** Матвей Петрович Бронштейн (1906–1938) — советский физик-теоретик, доктор физико-математических наук, профессор. Работал в области квантовой теории, астрофизики, теории полупроводников, космологии и теории квантовой гравитации, автор научно-популярных книг. В 1938 г. по решению НКВД был расстрелян.

Вскоре после кончины Эйнштейна в Берне прошла международная конференция, посвященная 50-летию создания теории относительности. Результаты конференции, однако, оказались рядовыми. В 1957 г. в Чепел-Хилле (США) состоялась вторая конференция, на которой собрались лишь ученые, исследовавшие проблемы гравитации. Конференция вдохновила их к осознанию идейного единства и привела к формированию «семьи гравитационистов». Во главе ее стал Уилер с его пониманием классической физики как геометрии.

Однако на практике желаемое развитие космологии шло далеко не просто. Об этом свидетельствует и письмо Фейнмана жене с конференции по общей теории относительности и гравитации, прошедшей в Варшаве в 1962 г.: *Я ничего не получил от этой встречи. Я ничему не научился. Из-за отсутствия экспериментов эта область неактивна, так что лишь немногие из лучших умов занимаются ею. <...> Напомни мне больше не ездить ни на какие гравитационные конференции!* [7, с.46].

Физика есть геометрия

Еще в 1957 г. Уилер пришел к выводу, что *физика есть геометрия* [8, с.544]. Под этим он понимал, что из вопросов, занимавших мыслителей всех времен, ни один не может претендовать на большую значимость, чем вопрос о происхождении Вселенной. Немало сделавший для создания атомного и водородного оружия и понимания теории гравитации, Джон лишь после работы Дж.Р.Оппенгеймера и Х.С.Снайдера (1939) о так называемых черных дырах признал возможность их возникновения при коллапсе ядер звезд достаточно большой массы.

Но свет из таких звезд не сможет вырваться, поэтому Я.Б.Зельдович и И.Д.Новиков назвали их *темными* (или *замороженными*) звездами. Более удачный термин был предложен Уилером, назвавшим их на конференции в Нью-Йорке в 1967 г. *черными дырами* (черными — поскольку они не могут излучать свет, а дырами — ибо всякий объект, приблизившийся к ним на слишком малое расстояние, уже никогда не возвращается назад). С тех пор это название закрепилось и устоялось в научной литературе.

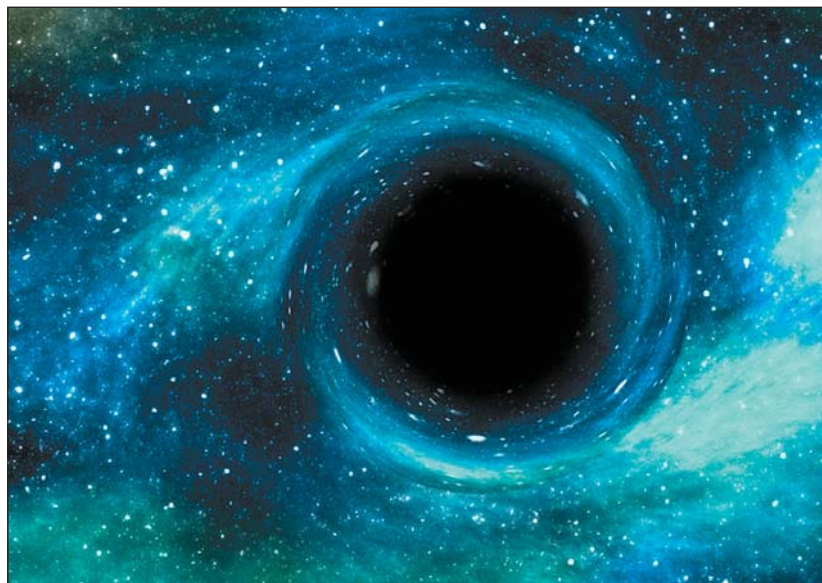
При этом Джон еще в 1964 г. заметил, что *каждый чувствует, что имеет, наконец (в лице схлопывания звезд), явление, где явно выступает общая теория относительности и где может*

осуществиться пламенный союз с квантовой физикой [9, с.260]. О том же говорят предложенные им термины и образы: *квантовая пена* — для искривленного пространства под влиянием квантово-механических флуктуаций гравитационного поля, *у черных дыр нет волос* — т.е. нет силовых линий магнитного поля.

Став крупным экспертом в физике структуры материи, квантовой механике и ядерной физике, Дж.Уилер помог своему ученику Б.К.Гаррисону объяснить, как возрастает давление вещества, если постепенно сжимать его до все больших плотностей. Итогом стало уравнение состояния холодного мертвого вещества — уравнение Гаррисона—Уилера. Затем по его просьбе М.Вакано объединил это уравнение с уравнениями общей теории относительности для баланса гравитации и давления внутри звезды.

Тот же Вакано, применив один из первых цифровых компьютеров в Принстоне, получил из дифференциального уравнения каталог холодных мертвых объектов Вселенной и вместе с Уилером в 1958 г. выяснил, что схлопывание становится неизбежным, если умирает звезда с массой больше двух солнечных, образуя черную дыру. Так, опираясь на свои знания о водородной бомбе, Джон, по словам К.С.Торна, *заполнил провалы в нашем знании о холодных мертвых звездах* [9, с.235].

По П.Дэвису, *квантовая механика для Вселенной, возможно, самая дерзкая экстраполяция физической теории за всю историю науки, и здесь Джон Уилер... играл ведущую роль. <...> Он выдвинул гипотезу, что так же как квантовая механика спасла классическую от расходящихся величин и предсказала существование стабильных атомов конечных размеров, та же квантовая механика могла бы поправить и ситуацию с син-*



Образное изображение черной дыры и окружающего ее диска.

гулярностью Большого взрыва, размыв ее гейзенберговской неопределенностью [10, с.10].

В 1960 г., благодаря усилиям Дж.Уилера и Б.С.Девитта, появилось на свет уравнение для волновой функции Вселенной, своего рода модификация уравнения Шрёдингера, но только для застывшего квантового состояния Вселенной. Оно положило начало квантовой теории гравитации, объединяющей явления и взаимодействия микро- и макромира, и квантовой космологии (Вселенная образовалась в результате квантового процесса). Решение этого уравнения было получено позднее.

В 1970 г. аспирант Уилера Я.Д.Бекенштейн предположил, что черные дыры должны иметь энтропию, пропорциональную площади их поверхности. Бекенштейн сформулировал и обобщенный второй закон термодинамики, применимый в том числе для систем черных дыр. В 1974 г. оба предположения были подтверждены С.У.Хокингом*, который вначале опроверг идеи Бекенштейна, а затем все же согласился с ними.

Со временем Дж.Уилер вместе с Б.С.Девиттом, Ч.У.Мизнером, С.У.Хокингом и Р.Пенроузом стали ведущими специалистами по квантовой космологии, связавшей теорию гравитации с квантовой физикой. Согласно этой теории, во Вселенной отсутствует время, а квантовый космос не развивается и не меняется, не расширяется и не сжимается, он просто есть. Пока квантовая космология остается теорией без надежных экспериментальных подтверждений.

В 1968 г. Джон подчеркнул: *Геометрия, лишь слегка искривленная, описывает гравитацию. Геометрия, искривленная несколько по-другому, описывает электромагнитную волну. Геометрия с новым типом возбуждения дает магический материал — пространство — для построения элементарной частицы. И ничего инородного, «физического» в этом пространстве нет. Все, что есть в мире, состоит из геометрии* [5, с.64].

Пройдут десятилетия, и геометродинамику вытеснит давно известная теория Калуцы—Клейна** (1926), в ней используется уже 11 измерений, при которых заметно возрастает разнообразие и сложность физических структур. Остается надеяться (и первые свидетельства этому уже появились), что и эту геометрию удастся объяснить с помощью квантовых явлений, как это предлагалось программой Уилера.

* Стивен Уильям Хокинг — английский ученый, один из величайших космологов современности, немало сделавший для понимания нашей Вселенной, ее становления и развития. Ушел из жизни 12 марта 2018 г.

** Теория Калуцы—Клейна — теория гравитации, объединившая гравитацию и электромагнетизм. Теория была впервые опубликована в 1921 г. немецким математиком Теодором Калуцей, расширившим пространство Минковского до пятимерного, а обоснование ненаблюдаемости пятого измерения было предложено в 1926 г. шведским физиком Оскаром Клейном.

Его усилия по развитию теории квантовой гравитации были подхвачены учеными. По замечанию Л.Смолина***, *за последние полвека были предложены многочисленные подходы к ее изучению... Но два подхода из пяти-шести вот уже на протяжении 18 лет являются предметом постоянных исследований большого количества физиков и математиков. Это теория струн и петлевая квантовая теория гравитации* [10, с.432].

Со своей стороны, Джон, оценивая роль кванта в понимании самой Вселенной, подчеркнул, что пока мы не увидим квантовый принцип во всей его простоте, мы можем считать, что не знаем самого главного о Вселенной, о нас самих и о нашем месте во Вселенной. И потому окончательный рассказ о связи между квантом и Вселенной не завершен [11, с.546, 556].

От частиц и полей — к информации

Подводя итоги всех трех периодов своего научного творчества, Уилер в 1998 г. выпустил книгу воспоминаний «Геоны, черные дыры и квантовая пена: жизнь в физике». Если вначале главную роль в природе Джон отводил частицам, а затем полям, то последние десятилетия своей жизни посвятил идее: *Всё — это информация. Чем больше я размышляю о квантовых тайнах и об информации как основе физической теории, нашей странной способности постигать тот мир, в котором мы живем, тем больше вижу фундаментальное, вероятно, значение логики* [12, с.63–64].

По Уилеру, объекты следует рассматривать как вторичные, как носители абстрактной и фундаментальной сущности — информации, вещество же и излучение — материальные проявления чего-то более фундаментального. В таком случае информация (а именно, где частица находится, каков ее спин, положителен или отрицателен ее заряд и т.д.) образует целостное ядро самой физической реальности. В 1990 г. ученый высказал предположение, что информация — это фундаментальная концепция физики. Согласно его идее *it from bit* (всё из бита), все сущности в своей основе — информационно-теоретические. От способа измерения Вселенной она меняется и предстает перед нами в новом обличье.

Таким образом, по воспоминаниям его ученика Торна, *Уилера толкала вперед жажда узнать, что лежит за пределами установленных законов. Он постоянно вторгался в области, где не срабатывали известные законы и в игру вступа-*

*** Ли Смолин — американский физик-теоретик, профессор канадского университета Ватерлоо — известен работами по теории струн, петлевой квантовой гравитации, космологии и теории элементарных частиц. Занимал 21-е место в списке 100 выдающихся мыслителей мира (по версии журнала «Foreign Policy», 2008).

ли новые. Он пытался проскочить в XXI век, взглянуть на то, как могли бы выглядеть законы физики за пределами ограничений текущего века. Из всех мест, откуда можно было бросить такой взгляд, ни одно не казалось Уилеру столь многообещающим, как стык общей теории относительности (область большого) и квантовой механики (область малого) [9, с.233].

Вдохновенный провидец в науке — так называли Уилера его ученики и коллеги по квантовой механике и гравитации. Об этом свидетельствуют как его научные исследования, направленные на познание основных запредельных законов природы, так и поддержанные им гипотезы и теоретические построения его учеников, того же Р.Ф.Фейнмана, а также Х.Эверетта III, К.С.Торна, М.Тегмарка и многих других.

Нобелевский лауреат Ф.Вильчек в своей последней книге (в русском издании она вышла под названием «Тонкая физика») написал о Уилере (в то время еще живом) точные и проникновенные слова, отражающие манеру его научного творчества: *«Джон Уилер обладает даром облекать глубокие идеи в броские фразы. «Черная дыра», вероятно, его самое известное творение, однако моим любимым является выражение «все из бита». В этих трех словах заключен вдохновляющий идеал теоретической науки. Мы стремимся найти математические структуры, которые отражают реальность настолько полно, что ни один важный аспект не остается неучтенным»* [13, с.153]. Увы, на английском языке эта книга вышла уже после смерти Уилера*.

Чем дальше уходил Уилер от присущего науке XX в. подхода к гипотезам о скрытых законах при-

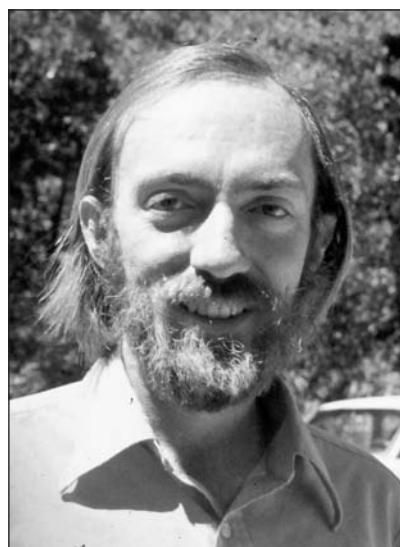
роды, стоящих за уже известными нам законами, и чем больше он приближался к метафизическим размышлениям, тем сомнительнее для коллег выглядели его выводы и предсказания и тем меньше доверия у новых поколений научного сообщества вызывали они и его научная деятельность. Разумеется, Джон ощущал это. Но он беспокоился за свой научный авторитет не столько среди коллег, сколько среди веривших в него учеников и последователей его идей. Уже в 1979 г. он написал о себе: *«Уилер ведет людей за собой... Будущее многих из них зависит от успеха на пути, по которому он ведет. Он не может их подвести. Он отвечает за исполнение взятых на себя обязательств»* [14, с.389].

Ученики и последователи Уилера

За свои открытия Уилер не получил Нобелевскую премию. Но он преуспел в деле воспитания исследователей, что не менее важно для науки XX в. Целый ряд его учеников добился в науке мирового признания, причем в решении как раз тех проблем квантовой физики, астрофизики и космологии, которым Джон посвятил свои лучшие годы.

Вот наиболее выдающиеся его ученики и их главные открытия. Р.Ф.Фейнман — квантовая электродинамика и диаграммы Фейнмана, Х.Эверетт — теория параллельных миров, Ч.У.Мизнер — общая теория относительности, У.Дж.Унру — гравитация, космология, К.С.Торн — гравитация, астрофизика и квантовая теория измерений, Я.Д.Бекенштейн — энтропия черных дыр, Р.Прайс — пульсация черных дыр, М.Тегмарк — гипотеза математической Вселенной. И этот список можно продолжить.

В общении с Джоном ученики могли наблюдать рождение его новых идей и подходов к их реализации. Свои идеи ученый записывал в блокнот, затем



К.С.Торн. 1972 г.



Р.Фейнман. 1957 г.



Х.Эверетт III. 1964 г.

* Wilczek F. The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces. N.Y., 2008.

они обрастали соображениями, служившими стимулом в решении конкретных научных задач. В библиотеке Американского философского общества в Филадельфии хранится более полусотни блокнотов с записями, что он вел с военных времен.

Важным было и обсуждение с таким наставником деталей задачи, решением которой предстояло заняться молодому исследователю. Вот как об этом вспоминал Фейнман: *Когда ты даешь такому человеку, как Уилер, задачу, он сразу видит ее целиком. Это мне пришлось проводить расчеты, а Уилер просто все увидел**. Его роль в своей работе позднее Фейнман неоднократно отмечал в нобелевском докладе в 1965 г. [3].

В такие моменты ученики Уилера ощущали на себе всю глубину его мышления. По словам Торна, у него была поразительная способность догадываться о причинах явлений, опираясь на физическую интуицию. Осознание ее мощи и эффективности сильно на меня повлияло. Уилер сделал много больших открытий с помощью интуиции, хотя... — как отмечает Торн, — их следовало про- верить с помощью математики [14, с.320–321].

Образной подачей своих идей Джон вдохновлял молодых, полагая, что каждый из них способен и готов к самостоятельному развитию вопросов общей темы. Поэтому каждому он предлагал для исследования небольшую проблему, решение которой могло бы привести к пониманию того же схлопывания звезд, черных дыр и возможного объединения квантовой механики и общей теории относительности.

Уилер помогал признанию своих учеников как ученых. Созданная в 1957 г. Эвереттом многомировая интерпретация квантовой механики (которая предполагает существование в некотором смысле «параллельных вселенных») не получала должного отклика от ученых более десяти лет. Уилер, поддерживая эту теорию, содействовал встрече ученика с Бором, но на того интерпретация Эверетта не произвела впечатления. Хотя со временем Джон перестал ее поддерживать, тем не менее, сегодня она активно обсуждается многими учеными.

Р.И.Чоа написал под руководством Дж.Уилера курсовую, а затем и дипломную работу (она была посвящена квантованию общей теории относительности). Он отметил: *Уилер учил меня, что наука больше чем наполовину состоит из того, чтобы задать правильный вопрос, а меньшую половину посвящают получению правильного ответа, хотя это и не всегда так!* [10, с.215].

Ученики испытывали к своему наставнику самые теплые чувства, о чем свидетельствует признание Тегмарка: *Я привык делить физиков на титанов и простых смертных... Для меня Уилер был «последним титаном»... Он стал одним из моих супергероев благодаря своему пристрастию*

к безумным идеям... Я показал ему самую безумную свою статью об идее математической Вселенной, и она ему понравилась [15, с.300–301].

Одновременно Джон с коллегами и учениками создавал учебники для начинающих («Предвидение Эйнштейна» и «Физика пространства-времени») и для аспирантов («Черные дыры, гравитационные волны и космология»), а также книгу для ученых («Гравитация, нейтрино и Вселенная») и монографию для студентов и физиков-специалистов («Гравитация»). Все они были переведены на русский язык и до сих пор пользуются спросом.

Особую ценность представляют собой три тома «Гравитации» [16], подготовленной им совместно с Мизнером и Торном. «Гравитация» и сегодня не только служит учебником для студентов, но и задает нужный уровень понимания гравитации как явления природы у самих исследователей, определяя их дальнейшие победы в разрешении фундаментальных проблем теории квантовой гравитации и космологии.

Гражданин, ученый и человек

В жизни Джон был консерватором, свято верящим в американское общество, его образ жизни и обязательность его защиты. Подобно своим российским коллегам по космологии Я.Б.Зельдовичу, Л.Д.Ландау и А.Д.Сахарову, Дж.Уилер занимался созданием атомной бомбы, работая над нужными для получения плутония реакторами.

В 1951–1953 гг. Уилер был директором секретного проекта «Маттерхорн», организованного с целью создать реактор стеллаторного типа и получить управляемую термоядерную реакцию. С 1952 г., будучи членом Национальной академии наук США, он возглавлял группу по разработке первых водородных бомб, осуждая поведение Оппенгеймера, выступившего против их создания.

Во времена холодной войны и балансирования на грани возможной термоядерной катастрофы Уилер, продолжая заниматься созданием водородного оружия, после запуска в 1957 г. первого спутника в СССР выступил с инициативой организации мозговых штурмов ученых, нацеленных на успешное решение наиболее актуальных задач в интересах Министерства обороны и американских спецслужб.

Но если в политике Джон отличался консерватизмом, то в науке, в зависимости от решаемой проблемы, он, по определению Ф.Дж.Дайсона, проявлял себя как прозаик, стоящий на твердой почве, или как поэт, который задает вызывающие вопросы и подвергает все сомнению [10, с.XVI]. На этот счет Уилер в дневниках изложил выводы и соображения о будущей физике и дальнейших путях ее развития.

В одном из своих писем он подчеркнул: *Вот уже двадцать лет я занимаюсь физикой гравита-*

* Фейнман Р. Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман! М., 2008. С.100.



Физики, собравшиеся в Копенгагене в июле 1963 г. после смерти Н.Бора. Дж.Уиллер стоит в центре в верхнем ряду.

Фото Ф.Хунда

ции и теорией относительности. В результате я пришел к выводу, что тайна мироздания кроется глубже, в квантовом принципе; что квантовый принцип связан на каком-то фундаментальном уровне с логикой и исчислением предложений... строение Вселенной связано с нашим собственным существованием... [14, с.395–396].

В работе международных конференций по гравитации Уилер участвовал постоянно. Начавшись в 1957 г. в Чапел-Хилле, конференции затем проводились в Руайомоне близ Парижа (1959), в Варшаве (1962), Лондоне (1965), Тбилиси (1968), Копенгагене (1971), Тель-Авиве (1974) и т.д. На них Уилер с учениками выступал с размышлениями о свойствах гравитации и ее роли в существовании Вселенной.

Джон был критически настроен к СССР и его власти, но признавал важный вклад Л.Д.Ландау, В.Л.Гинзбурга, А.Д.Сахарова, Я.Б.Зельдовича, И.Д.Новикова, Е.М.Лифшица, И.М.Халатникова в науку о гравитации и был знаком с большинством из них. Авторы книги «Гравитация» отметили, что очень многим обязаны нашим советским коллегам, которые помогли глубже проникнуть в целый ряд проблем... [16, с.18].

В СССР конференции по гравитации начали проводить с 1961 г. Ранее работали школы-семинары М.А.Маркова (с 1978 г.) и семинар Д.Д.Иваненко при МГУ (с 1960 г.). Из зарубежных ученых их посещали Дж.Уилер, Ч.У.Мизнер, К.С.Торн, Дж.Вебер и другие. Уилер переписывался с Иваненко, а в его кабинете мелом написал на доске: *Не может быть теории элементарных частиц, имеющей дело только с элементарными частицами. Ученик Н.Бора* [17, с.123].

В 1960–1970-х годах в СССР и США прошло 10 симпозиумов по теоретической физике, в которых участвовал и Джон. Близко узнав его, академик Халатников писал, что он *личность яркая,*

сыгравшая значительную роль в современной теоретической физике. <...> Он человек с необычайным воображением, всегда занимал очень высокое положение в научном сообществе, был советником президента США*.

Известный российский специалист по классической и квантовой гравитации Ю.С.Владимиров, знавший работы Уилера и нередко общавшийся с ним, отметил: *По нашему мнению, в последней трети XX века Уилера следует считать физиком номер один в области фундаментальной теоретической физики* [18, с.117].

* * *

Имя Уилера вписали в историю науки XX в. не только сделанные им открытия, предложенные удачные термины и взращенные талантливые ученики, но и, по мнению новых поколений исследователей, его уникальная способность ставить вопросы, в поиске ответов на которые физическая наука может изменить фундаментальные представления об устройстве природы.

В 1966 г. Уилер был избран президентом Американского физического общества, а в 1976 г. его пригласили на должность директора Центра теоретической физики Техасского университета в Остине. Он был награжден медалями А.Эйнштейна (1965), Э.Ферми (1968), Б.Франклина (1969), Н.Бора (1982), Х.Эрстеда (1983), О.Клейна (1992) и другими наградами.

19 апреля 1986 г., перед тревожным ожиданием операции на сердце, по дороге в больницу Уилер написал уже определенно: *В основе физики, пространства-времени, самого существования лежит нечто информационно-теоретического характера. Этой короткой фразой я бы ответил*

* Халатников И.М. Дау, Кентавр и другие (Top nonsecret). М., 2008. С.141.

на просьбу о последнем слове, прежде чем я оставлю эту Землю [14, с.417]. К счастью, операция прошла удачно и он прожил еще 20 с лишним лет.

В марте 2002 г. в Принстоне прошел симпозиум «Наука и предельная реальность» посвященный 90-летию юбилею Уилера — выдающегося физика с пророческим даром, поэта научных поисков, пропагандиста союза квантовой механики и теории гравитации как средства разгадки тайн Все-

ленной. На симпозиуме обсуждалось, как воплотились в науку его открытия и предсказания. Последние годы жизни Джон с женой Жанетт (в браке они прожили 72 года!) провел в доме престарелых в г.Хайтстауне, недалеко от Принстона. Почерк в его дневнике становился все неразборчивее, записей — все меньше, а в январе 2008 г. они прекратились и вовсе. Умер ученый от пневмонии 13 апреля 2008 г. в возрасте 96 лет. ■

Литература / References

1. Уилер Дж. Механизм деления ядер. Успехи физических наук. 1968; 96(4): 708–715. [Wheeler J. Mechanism of nuclea division. Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). 1968; 96(4): 708–715. (In Russ.).]
2. Бор Н., Уилер Дж.А. Механизм деления ядер. Бор Н. Избранные научные труды. Т.2. М., 1971; 299–349. [Bohr N., Wheeler J.A. Mechanism of nuclea division. Bohr N. Selected Scientific Publications. V.2. Moscow, 1971; 299–349. (In Russ.).]
3. Фейнман Р. Развитие пространственно-временной трактовки квантовой электродинамики. Успехи физических наук. 1967; 91(1): 29–48. [Feynman R. Development of existential interpretation of quantum electrodynamics. Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). 1967; 91(1): 29–48. (In Russ.).]
4. Феррейра П. Идеальная теория. Битва за общую теорию относительности. СПб., 2015. [Ferreira P. The Perfect Theory. A Centure of Geniuses and the Battle over General Relativity. Saint-Petersburg, 2015. (In Russ.).]
5. Уилер Дж. Предвидение Эйнштейна. М., 1970. [Wheeler J. Einstein's Foresight. Moscow, 1970. (In Russ.).]
6. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т.1. М., 1965. [Einstein A. Collection of scientific publications. V.1. Moscow, 1965. (In Russ.).]
7. Хокинг С. Моя краткая история. СПб., 2014. [Hawking S. My Brief History. Saint-Petersburg, 2014. (In Russ.).]
8. Альберт Эйнштейн и теория гравитации. Сборник статей. М., 1979. [Albert Einstein and theory of Gravitation. Collection of articles. Moscow, 1979. (In Russ.).]
9. Торн К.С. Черные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна. М., 2009. [Thorne K.S. Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy. Moscow, 2009. (In Russ.).]
10. Наука и предельная реальность: квантовая теория, космология и сложность. М.; Ижевск, 2013. [Science and ultimate reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity. Moscow; Izhevsk, 2013. (In Russ.).]
11. Уилер Дж. Квант и Вселенная. Астрофизика, кванты и теория относительности. М., 1982; 535–558. [Wheeler J. Quantum and Universe. Astrophysics, quanta and theory of relativity. Moscow, 1982; 535–558. (In Russ.).]
12. Wheeler J.A. Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics. N.Y., 1998.
13. Вильчек Ф. Тонкая физика. Масса, эфир и объединение всемирных сил. СПб., 2018. [Wilczek F. The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces. Saint-Petersburg, 2018. (In Russ.).]
14. Гейфтер А. На лужайке Эйнштейна. Что такое ничто, и где начинается все. М., 2016. [Gefter A. Trespassing on Einstein's Lawn: A Father, the Mearning of Nothing, and the Beginning of Everything. Moscow, 2016. (In Russ.).]
15. Тегмарк М. Наша математическая Вселенная. В поисках фундаментальной природы реальности. М., 2017. [Tegmark M. Our Mathematical Universe. My Guest for the Ultimate Nature of Reality. Moscow, 2017. (In Russ.).]
16. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. В 3 т. М., 1977. [Misner C., Thorne K.S., Wheeler J. Gravitation. V.1–3. Moscow, 1977. (In Russ.).]
17. Владимиров Ю.С. Между физикой и метафизикой. Кн.2: По пути Клиффорда—Эйнштейна. М., 2011. [Vladimirov Yu.S. Between Physics and Metaphysics. Book 2: Towards Klifford—Einstein. Moscow, 2011. (In Russ.).]
18. Владимиров Ю.С. Между физикой и метафизикой. Кн.3: Геометрическая парадигма: испытание временем. М., 2012. [Vladimirov Yu.S. Between Physics and Metaphysics. Book 3: Geometrical paradigm: test time. Moscow, 2012. (In Russ.).]

John Wheeler's Courageous Conservatism in Science

R.N.Shcherbakov
(Tallinn, Estonia)

The eminent American physicist John Archibald Wheeler (1911–2008) is famed by his works in Quantum mechanics and Nucleus physics, General Theory of Relativity and Quantum Gravitation, Astrophysics and Cosmology. He was known so by prediction of fundamental laws evolution of the Universe. He created a big Physics American Scientific school.

Keywords: Bohr—Wheeler theory, Geometrodynamics and Quantum Gravitation, Information and physic laws, Wheeler Scientific school and family of Gravitational men.

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2018 ГОДА

По физике — А.Эшкин, Ж.Муру, Д.Стрикланд

Лауреатами Нобелевской премии по физике в этом году стали Артур Эшкин (США), Жерар Муру (Франция) и Донна Стрикланд (Канада). В решении Нобелевского комитета Шведской академии наук отмечается, что их открытия произвели революцию в лазерной физике и «сегодня чрезвычайно маленькие объекты и невероятно быстрые процессы можно наблюдать в новом свете». А.Эшкин изобрел лазерный пинцет, с помощью которого можно манипулировать частицами, живыми клетками и даже атомами посредством лазерного луча. Ж.Муру и Д.Стрикланд решили проблему, долго считавшуюся нерешаемой: они сообща нашли способ, как многократно усилить лазерный импульс путем его растяжения и сжатия. Практические результаты этого открытия используются в офтальмологии, металлообработке, в фундаментальных исследованиях.

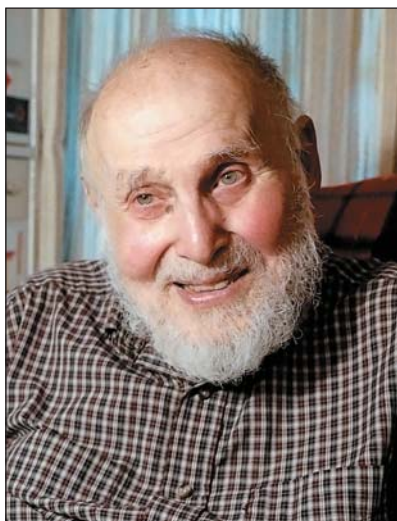
Ключевые слова: Нобелевская премия, лазер, пинцет Эшкина, усиление чирпованных импульсов, стретчер, компрессор Треси, компрессор Мартинеза.

Нобелевская премия по физике за 2018 г. присуждена за новаторские изобретения в области лазерной физики. Ее получили Артур Эшкин (1/2 премии) за изобретение оптического пинцета и его приложений в биологических системах, а также Жерар Муру (1/4) и Донна Стрикланд (1/4) за метод генерации ультракоротких оптических импульсов высокой интенсивности.

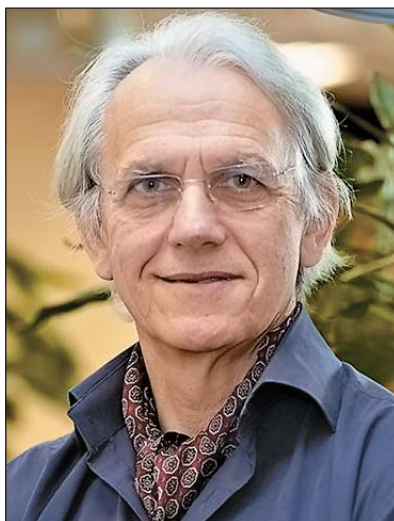
Американский физик и изобретатель **Артур Эшкин** (Arthur Ashkin) родился в 1922 г. в Нью-Йорке. В 1947 г. получил степень бакалавра в Колумбийском университете, а в 1952 г. — докторскую степень по физике в Корнельском университете. В 1952–1992 гг. работал в компании Bell Telephone Laboratories, где в 1963–1987 гг. возглавлял отдел лазерной оптики. В 1978 г. изобрел

оптический пинцет. Автор 47 патентов. В 1996 г. избран членом Национальной академии наук США. В числе его наград премия по квантовой электронике IEEE (1987), премия Таунса (1988), премия Ранка (1993), премия Харви (2004), медал Фредерика Айвса (1998).

Французский ученый **Жерар Муру** (Gérard Mourou) родился в 1944 г. в Альбервиле (Франция). В 1967 г. окончил Университет Гренобля. В 1973 г. получил докторскую степень по физике в Парижском университете. В 1977 г., уехав в США, работал в Институте оптики Рочестерского университета. В 1988 г. получил должность профессора в Мичиганском университете, где основал Лабораторию сверхбыстрой оптики и долгое время руководил ею. В 1985 г. вместе с Донной Стрик-



Артур Эшкин.



Жерар Муру.



Донна Стрикланд.

ланд предложил новую технику сверхмощных лазерных импульсов — усиление чирпированных импульсов. В настоящее время возглавляет Лабораторию прикладной оптики в Национальной высшей школе передовых технологий (Франция). В 2010 г. по программе грантов Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах, Муру был приглашен на работу в Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И.Лобачевского, где на средства выигранного мегагранта была создана лаборатория экстремальных световых полей. В 2008 г. Муру избран иностранным членом РАН (Отделение физических наук, секция общей физики и астрономии). Он также член Национальной инженерной академии США, Американского оптического общества, Института инженеров электротехники и электроники США, иностранный член Австрийской академии наук, Академии наук и словесности Италии. Удостоен многих престижных международных научных наград, в том числе премии Министерства науки Франции, премии по квантовой электронике IEEE (2004), премий Уиллиса Лэмба (2005) и Таунса (2009).

Канадский физик **Донна Стрикланд** (Donna Strickland) родилась в 1959 г. в городе Гуэлфе (Канада). В 1981 г. окончила канадский Университет МакМастера по специальности «инженерная физика». В 1989 г. получила докторскую степень по физике в Рочестерском университете (США), где ее научным руководителем был Муру. С 1997 г. — старший преподаватель физического факультета Университета Ватерлоо (Канада), с 2002 г. — адъюнкт-профессор (associate professor), с 2007 г. — заведующая кафедрой. В 2008 г. стала членом Оптического общества США, избиралась его вице-президентом.

В чем же суть идей, столь высоко оцененных Нобелевским комитетом? Лазерный пинцет Эшкина, позволяющий перемещать предметы с помощью лазера [1], — изобретение остроумное, но довольно простое. Наглядную аналогию этого эффекта демонстрирует шарик для настольного тенниса, помещенный под струю воды. На первый взгляд, струя должна отбросить шарик в сторону, однако происходит противоположное: шарик устойчиво остается под струей, а при ее перемещении следует за ней. Еще в 1970-х годах прошлого века Эшкин обнаружил, что небольшие объекты в поле лазерного луча перемещаются в зону наибольшей интенсивности. Это позволяет манипулировать с помощью лазера даже биологическими объектами, но, естественно, его мощность в этом случае должна быть ограниченной.

Два другие лауреата Нобелевской премии этого года поставили перед собой в некотором смысле противоположную задачу: достичь максималь-

ной интенсивности лазерного луча, выражаемой в мощности, приходящейся на единицу площади.

С момента создания в 1960 г. американским физиком Теодором Мейманом первого лазера [2] одно из магистральных направлений физики лазеров — гонка за сверхсильными полями, т.е. за рекордной интенсивностью излучения в фокусе, которую можно оценить по формуле

$$I = \frac{W}{\tau S} = \frac{W}{\tau \lambda^2} \left(\frac{\theta_{\text{dif}}}{\theta} \right)^2,$$

где W — энергия импульса, τ — его длительность, S — площадь фокального пятна, λ — длина волны, θ — расходимость, θ_{dif} — дифракционная расходимость, примерно равная λ/D , D — диаметр пучка.

Сразу стало понятно, что у лазеров здесь нет конкурентов ни со стороны микроволнового излучения, ни со стороны некогерентных источников света и коротковолнового излучения еще меньшей длины. Микроволновые источники, имея значительно большую энергию импульса, безнадежно отстают, проигрывая несколько порядков из-за большей длины волны, а также из-за длительности импульса, которая ограничена периодом колебания поля λ/c (c — скорость света). Некогерентные источники, даже при меньшей, чем у лазеров, длине волны (УФ, рентген) все равно проигрывают из-за большой расходимости — на несколько порядков больше, чем θ_{dif} .

Уже в 1960-х годах лазеры продемонстрировали свои преимущества: интенсивность их излучения достигла 10^{14} Вт/см². Однако в последующие два десятилетия она практически не росла (рис.1). Причина состояла в том, что лазерные усилители достигли предела, связанного с лучевой прочностью лазерных сред. Другими словами,

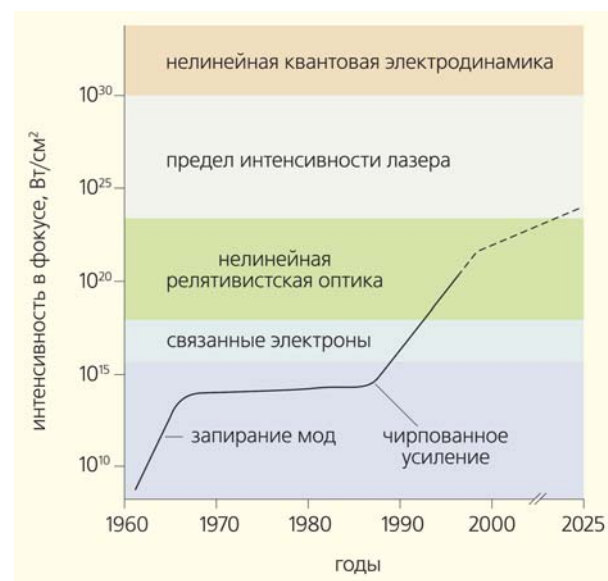


Рис.1. Интенсивность в фокусе (Вт/см²) с рождения лазеров до наших дней.

при попытке дальнейшего масштабирования лазерного излучения оно вместо усиления разрушало сам усилитель. Таким образом, представлявшееся неразрешимым противоречие заключалось в том, что, с одной стороны, для усиления импульс должен черпать энергию из среды, т.е. распространяться в среде, а с другой стороны, он сам эту среду разрушал.

Для наглядности вместо лазерного импульса в качестве аналогии можно рассмотреть биологическую модель. Допустим, это червяк, которого мы хотим откормить, располагая неограниченным количеством корма, размещенного в очень длинной трубке. Ползя по трубке, червяк (импульс) ест и увеличивает свою массу (энергию). Очевидно, ничто особо ее не ограничивает, если червяк растет в длину. Однако увеличение его толщины (мощности импульса) возможно лишь до диаметра трубки. Дальнейшее утолщение в ее пределах невозможно, а вне трубки еды нет.

Как же удалось решить эту, на первый взгляд, неразрешимую проблему? Выход предложили Муру и Стрикланд в 1985 г. [3]. Если не уходить от нашей модели, он состоит в том, что сначала червяк растягивается в длину с соответствующим уменьшением толщины. После этого длинный и тонкий червяк ползет в трубке, уничтожая еду, и толстеет до диаметра трубки, а далее выползает из нее и сжимается до исходной длины с соответствующим увеличением толщины. Хитрость заключается в том, что при сжатии червяка (импульса) его масса (энергия) не увеличивается, т.е. сжимать можно без еды, а следовательно, вне трубки (среды). Таким образом удастся уменьшить длительность импульса на 4–5 порядков и, в соответствии с приведенной формулой, на столько же увеличить интенсивность.

Итак, для реализации идеи нужны четыре устройства: первое — генератор коротких импульсов; второе — стретчер, который растягивает импульс, уменьшая интенсивность без изменения энергии; третье — усилитель, увеличивающий его энергию и мощность, не меняя длительности; и четвертое — компрессор, который сжимает импульс без увеличения энергии, но с увеличением мощности.

Такая концепция получила название CPA (Chirped Pulse Amplification) — усиление chirпованных импульсов. Неочевидное в этой аббревиатуре слово «chirped» (переводится как «чириканье») отражает тот факт, что для растяжения коротких лазерных импульсов используются дисперсионные устройства, за-

держивающие разные длины волн на разное время. В результате короткий лазерный импульс, в котором все длины волн синхронны, расплывается во времени: «красные» длины волн летят впереди, а «синие» — сзади, или наоборот — в зависимости от знака дисперсии. В переводе на звуковые волны это соответствует плавному увеличению или уменьшению высоты музыкального звука — так звучит гамма или, точнее, струна скрипки, если палец исполнителя движется вдоль грифа. Считается, что похожий звук издает чирикающий воробей, отсюда и chirped pulse — «чирикающий» импульс.

Заметим, что chirпованные (или частотно-модулированные) импульсы распространены и в других областях физики — от радиолокации до поиска гравитационных волн: именно chirпованный сигнал гравитационных волн был недавно детектирован коллаборацией LIGO, за что была присуждена Нобелевская премия по физике 2017 г.

Вернемся к Нобелевской премии 2018 г., обратив внимание на ключевой рисунок статьи Стрикленда и Муру, опубликованной в 1985 г. (рис.2) [3]. Легко заметить, что все основные элементы CPA были к тому времени известны: и генератор коротких импульсов (лазер с синхронизацией мод), и стретчер (длинное одномодовое волокно с положительной дисперсией), и усилитель (обычный лазерный усилитель на неодимовом стекле), и компрессор с отрицательной дисперсией на основе дифракционных решеток, в котором только отражательные элементы, и свет не попадает внутрь среды. Но если главные элементы CPA были уже известны, тогда в чем же состояла идея нобелевского уровня? На первый взгляд, ее революционность заключалась исключительно в том, чтобы расположить известные элементы в пра-

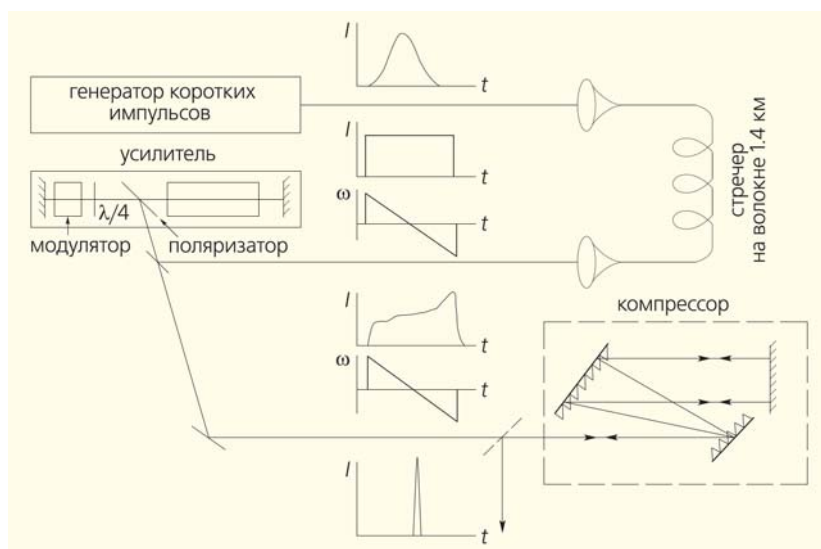


Рис.2. Первое предложение CPA: генератор, стретчер с положительной дисперсией (на волокне), усилитель, компрессор с отрицательной дисперсией на двух параллельных решетках.

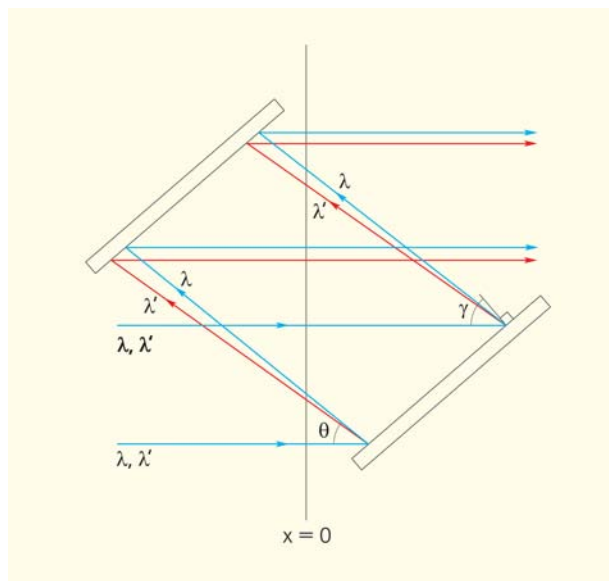


Рис.3. Компрессор с отрицательной дисперсией на двух параллельных решетках.

вильном порядке. Однако это не совсем так. В своем первоначальном виде (см. рис.2) концепция CPA не получила бы столь широкого распространения. Дело в том, что, хотя у стретчера и компрессора разные знаки дисперсии, суммирование этих дисперсий не дает строго нулевого значения. Иными словами, вносимая задержка не строго пропорциональна длине волны, а оказывается сложной функцией от нее, причем из-за разной природы дисперсии в волокне и в решетках функции принципиально разные. Это значит, что нулевой суммарной дисперсии можно добиться только на одной длине волны, а пренебрежимо малой — лишь в узком спектральном диапазоне, что противоречит получению сверхкоротких импульсов.

Обращаясь к истории вопроса, укажем, что компрессор с отрицательной дисперсией на ос-

нове дифракционных решеток предложил в теперь уже довольно далеком 1969 году Эдмонд Треси (рис.3) [4]. Компрессор Треси был многократно использован именно для сжатия chirпованных импульсов, но не для CPA. Новая идея заключалась в том, чтобы укоротить исходный импульс (без усиления) и тем самым увеличить его мощность. Для этого в процессе нелинейной фазовой само-модуляции спектр исходного спектрально-ограниченного импульса расширялся, приобретая положительную дисперсию, после чего импульс компрессировался благодаря отрицательной дисперсии компрессора Треси. Тот факт, что все элементы компрессора работают на отражение и он способен выдержать большую мощность, значения не имел — мощности были скромные. Здесь требуется ремарка: в упоминавшейся статье Муру и Стрикленд [3], в которой предлагалась концепция CPA (см. рис.2), говорилось о волоконном стретчере, а он, как указано выше, составляет плохую пару компрессору Треси.

В январе 1987 г. Оскар Мартинез нашел решение [5], как поменять знак дисперсии у решеточного компрессора — нужно сделать его дисперсию положительной, что требовалось для CPA на длинах волн около 1.5 мк, где дисперсия волокна отрицательна. Мартинез полагал, что обобщил идею CPA, распространив ее на другой оптический диапазон, в котором компрессор Треси не работает, так как имеет неподходящий знак дисперсии. Компрессор Мартинеза (рис.4) отличается от компрессора Треси тем, что между решетками установлен однократный телескоп, благодаря которому дисперсия меняет знак.

Через пять месяцев, в июне 1987 г., была опубликована статья [6], в которой Муру и соавторы пришли к выводу, что компрессор Мартинеза является... стретчером (рис.5), причем идеальным стретчером для работы в паре с компрессором Треси, потому что у них не просто разные знаки дисперсии, но и модуль дисперсии одинаков во всем диапазоне длин волн, если используются одинаковые решетки.

Таким образом, идея CPA обрела окончательный вид, благодаря которому в настоящее время все без исключения мощные лазеры включают в себя четыре элемента: генератор коротких импульсов, стретчер Мартинеза* на дифракционных решетках с положительной дисперсией, усилитель, компрессор Треси на дифракционных решетках с отрицательной дисперсией.

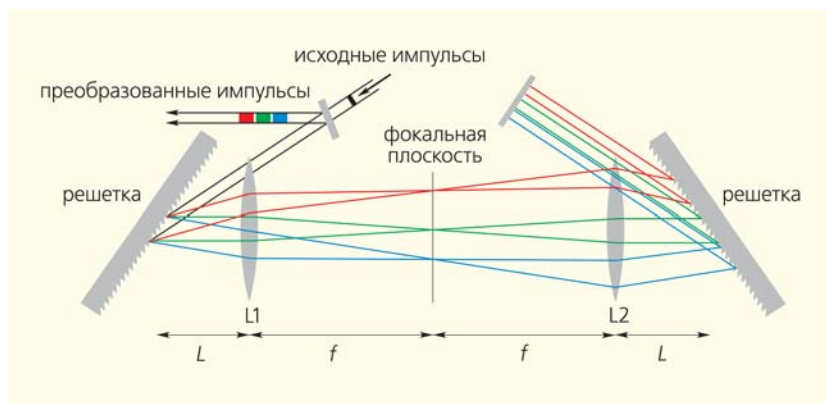


Рис. 4. Стретчер (компрессор) с положительной дисперсией на двух антипараллельных решетках и с софокусным телескопом на линзах L1 и L2.

* Строго говоря, используется так называемый стретчер Офнера [5], в котором линзовый телескоп заменен на зеркальный, чтобы исключить дисперсию, вносимую линзами.

Надо сказать, революционное влияние СРА на лазерную технику признано в науке далеко не сегодня, Нобелевская премия ее разработчикам ожидалась давно. К настоящему времени ученые «выжали» из концепции СРА все возможное: мощность (и интенсивность) современных лазеров ограничивает уже не то, что лазерный импульс нельзя далее усиливать, а то, что его нельзя компрессировать. Дифракционные решетки, хотя и работают на отражение, обладают большой, но вполне конечной стойкостью к сверхмощному излучению. Предельная интенсивность ограничена. Увеличение мощности за счет увеличения габаритов также близко к пределу: сегодня изготавливаются уникальные решетки метрового размера, они позволят в ближайшие год-два создать лазеры с мощностью 10 ПВт и интенсивностью 10^{23} Вт/см², но трудно представить сколько-нибудь значительное увеличение мощности в будущем. Таким образом, в цепочке генератор—стретчер—усилитель—компрессор самым слабым звеном теперь оказывается компрессор. Рост интенсивности излучения (черная линия на рис.1) остановился, появилось новое плато (синяя линия). Что же дальше?

Один из возможных путей увеличения интенсивности излучения до 10^{24} Вт/см² и далее подсказывает идея увеличения мощности импульса уже после компрессора. По указанным выше причинам увеличить энергию (усилить) импульс нельзя, так что остается только уменьшать его длительность. Для этого необходимо увеличить спектральную полосу, т.е. растянуть спектр импульса (не длительность, как при СРА, а именно спектр). Для его растяжения применяется фазовая самомодуляция при распространении света в нелинейной среде. После прохождения мощного лазерного импульса через такую среду его спектр расширяется и становится chirпованным. Для компрессии нужно внести дисперсию, величина которой значительно меньше вносимой стретчером или компрессором для СРА. С этой целью используются дисперсионные зеркала. Они не могут использоваться в СРА вместо решеток, так как вносят очень маленькую дисперсию, но зато их стойкость значительно выше, чем у решеток. Благодаря этому увеличивается предельная мощность им-

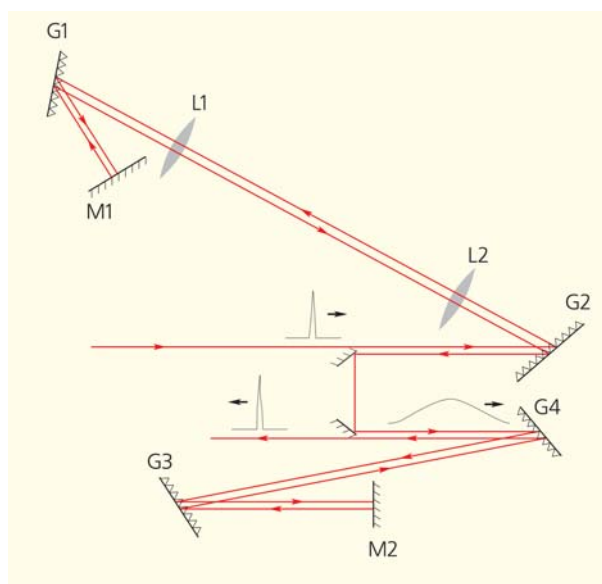


Рис. 5. Схема стретчера (решетки G1 и G2) с положительной дисперсией и компрессора (решетки G3 и G4) с отрицательной дисперсией. Зеркала M1 и M2 обеспечивают два прохода (для удвоения дисперсии).

пульса. В отличие от СРА, сжатие возможно не на много порядков, но в 5–20 раз вполне реально.

Для растяжения спектра, в том числе с целью последующего укорочения импульса, с 1980-х годов широко применяется фазовая самомодуляция при распространении света в волокне. Однако до недавнего времени эта технология была ограничена только лазерами с мощностью менее 1 ТВт из-за, казалось бы, неизбежных паразитных эффектов. И вот теперь появился ряд идей, как эти ограничения можно обойти, и было экспериментально продемонстрировано [3] укорочение импульса с 56 до 24 фс с соответствующим увеличением мощности со 100 до 200 ТВт. Принципиальных ограничений для дальнейшего масштабирования вплоть до 100 ПВт нет.

© член-корреспондент РАН **Е.А.Хазанов**
Институт прикладной физики РАН
(Нижний Новгород, Россия)
e-mail: efimkhazanov@gmail.com

Литература / References

1. *Asbkin A.* Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1997; 94: 4853–4860.
2. *Maiman T.* Stimulated optical radiation in ruby. Nature. 1960; 187: 493–494.
3. *Strickland D., Mourou G.* Compression of amplified chirped optical pulses. Optics Communications. 1985; 56: 219–221.
4. *Treacy E.B.* Optical pulse compression with diffraction gratings. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1969; 5: 454–458.
5. *Martinez O.E.* 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in 1,3–1,6 μ m region. IEEE Journal of Quantum Electronics. 1987; 23: 59–64.
6. *Pessot M., Maine P., Mourou G.* 1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification. Opt. Commun. 1987; 62: 419–421.

2018 Nobel Prize Laureates in Physics: Arthur Ashkin, Gerard Mourou, and Donna Strickland

E.A.Khazanov

Institute of Applied Physics, RAS (Nizhny Novgorod, Russia)

Arthur Ashkin (USA), Gerard Mourou (France), and Donna Strickland (Canada) became Nobel Prize winners in physics this year. The decision of the Nobel Committee of the Swedish Academy of Sciences notes that their discoveries made a revolution in laser physics and “today extremely small objects and incredibly fast processes are now been seen in a new light”. A.Ashkin invented laser tweezers, with which you can manipulate particles, living cells, and even atoms with a laser beam. J.Mourou and D.Strickland solved a problem that had long been considered unsolvable: together they found a way to multiply the laser pulse by its stretching and compressing. The practical results of this discovery are used in ophthalmology, metalworking, and basic research.

Keywords: Nobel Prize, laser, Ashkin tweezers, chirped-pulse enhancement, stretcher, Treacy compressor, Martinez compressor.

По химии — Ф.Арнольд, Дж.Смит, Г.Винтер

В 2018 г. Нобелевская премия по химии присуждена за открытия в области белкового дизайна, важность которого сложно переоценить в наши дни. В медицине уже используются десятки разных «дизайнерских» антител, которые были созданы на основе методик, разработанных Ф.Арнольд, Дж.Смитом, Г.Винтером.

Ключевые слова: Нобелевская премия, биокатализ, молекулярное узнавание, белковый дизайн, фаговый дисплей, направленная эволюция ферментов.

Нобелевская премия по химии 2018 г. присуждена Фрэнсис Арнольд (США) «за направленную эволюцию ферментов» и Джорджу Сми-ту (США) с Грегори Винтером (Великобритания) «за фаговый дисплей пептидов и антител».

Фрэнсис Арнольд (Frances Hamilton Arnold) родилась 25 июля 1956 г. в г.Эджвуде (штат Пенсильвания, США) в семье физика Вильяма Говарда

Арнольда (William Howard Arnold). В 1974 г. окончила государственную среднюю школу Тэйлора Олдердайса (Питтсбург, штат Пенсильвания, США) и поступила на физический факультет Принстонского университета (штат Нью-Джерси), при этом параллельно с занятиями по основной специальности посещала курсы по экономике, осваивала русский и итальянский языки и даже задумывалась



Фрэнсис Арнольд.



Джордж Смит.



Грегори Винтер.

о карьере дипломата. После второго курса она отправилась в Италию, где работала на фабрике, производящей детали для атомных реакторов. Вернувшись в Принстон, продолжила учебу в университете, специализируясь на кафедре аэрокосмической техники, где под руководством физика-теоретика Р.Соколоу разрабатывались источники возобновляемой энергии. Эта тема стала ключевой в дальнейшей работе Арнольд после окончания университета в 1979 г. В частности, она занималась проектированием солнечных батарей в Научно-исследовательском институте солнечной энергии (ныне Национальный институт возобновляемой энергии). Затем она заинтересовалась биохимией и поступила в аспирантуру в Калифорнийский университет (Беркли), где под научным руководством Х.У.Бланча в 1985 г. защитила диссертацию, посвященную методам аффинной хроматографии. После окончания постдокторантуры по биофизической химии в 1986 г. Арнольд пригласили в Калифорнийский технологический институт, где она трудится до сих пор. В настоящее время Арнольд, профессор химической инженерии, биоинженерии и биохимии имени Лайнуса Полинга, возглавляет Калифорнийский центр биотехнологий имени Донны и Бенджамина Розенов. Кроме того, Арнольд избрана во все три национальные академии США — Национальную академию инженерных наук (2000), Национальную медицинскую академию (2004) и Национальную академию наук (2008), а также стала членом Американского философского общества, Американской ассоциации содействия развитию науки, Американской академии искусств и наук, Американской академии микробиологии, Американского института медицинской и биологической инженерии и международным стипендиатом Королевской инженерной академии Великобритании. Работы Арнольд отмечены множеством международных и национальных наград, в том числе премией Чарльза Старка Дрейпера (2011), Национальной медалью технологий и инноваций (2011), Технологической премией тысячелетия (2016), Премией Реймонд и Беверли Саклер Национальной академии наук (2017) и др.

Джордж Смит (George Pearson Smith) родился 10 марта 1941 г. в г. Норуолке (штат Коннектикут, США). Степень бакалавра по биологии он получил в 1963 г. в колледже Хаверфорда (штат Пенсильвания), степень PhD по бактериологии и иммунологии — в 1970 г. в Гарвардском университете. После пятилетней постдокторантуры в лаборатории Оливера Смитиса* в Университете штата Вискон-

син (г.Мадисон) переехал в г.Колумбию для работы в Университете штата Миссури и постепенно продвигался по карьерной лестнице: с 1975 г. — доцент (assistant professor), с 1981 г. — адъюнкт-профессор (associate professor), с 1990-го — профессор биологических наук (professor of biological sciences), в настоящее время — почетный профессор университета (professor emeritus of biological sciences). В 2000 г. члены правления Университета штата Миссури присудили ему звание выдающегося профессора (curators professor), в 2001 г. он избран действительным членом Американской ассоциации содействия развитию науки, в 2007 г. награжден за биотехнологические исследования премией Американского микробиологического общества. Большую часть работы, которая привела Смита к Нобелевской премии, он выполнил в 1983–1984 гг. в лаборатории Роберта Вебстера Медицинской школы Университета Дьюка.

Сэр Грегори Винтер (Sir Gregory Paul Winter) родился 14 апреля 1951 г. в Лестере (Восточный Мидленд, Великобритания). Среднее образование получил в Королевской гимназии в г.Ньюкасле (графство Тайн-энд-Уир). Вся дальнейшая жизнь Винтера связана с Кембриджем. В 1973 г. он окончил Тринити-колледж Кембриджского университета, в 1977 г. защитил степень PhD в знаменитой Лаборатории молекулярной биологии (одного из подразделений британского Совета медицинских исследований, или MRC — от англ. Medical Research Council). В 1981 г., после докторантуры в Имперском колледже (Лондон) и Институте генетики (Кембридж), Винтер вернулся в Лабораторию молекулярной биологии, где впоследствии получил должность заведующего отделом химии белков и нуклеиновых кислот (1994–2006) и заместителя директора (2006–2011), а также был назначен заместителем директора Центра инженерии белков MRC (1990–2010). В Кембридже он основал три биотехнологические компании: Cambridge Antibody Technology (1989), Domantis (2000) и Bicycle Therapeutics (2009). Научные заслуги Винтера отмечены международными наградами, в том числе премией имени К.В.Шееле (1994), которая учреждена Шведской академией фармацевтических наук; Международной премией имени Короля Фейсала (1995); премией имени Уильяма Коли (1999), которую ежегодно присуждает Институт исследований рака «за выдающиеся достижения в области фундаментальной иммунологии и иммунологии опухолей»; медалью Королевского общества (2011) «за новаторскую работу в области белковой инженерии и терапевтических моноклональных антител» и т.д.

На первый взгляд может показаться, что Нобелевская премия по химии 2018 г. имеет мало отношения к химии, как это часто происходило в предыдущие годы. Действительно, эту премию нередко присуждали исследователям, которые исполь-

* Оливер Смитис (Oliver Smithies) — лауреат Нобелевской премии по физиологии или медицине 2007 г., награжденный «за открытие принципов введения специфических генных модификаций у мышей с использованием эмбриональных стволовых клеток». Подробнее см.: *Киселев С.Л.* Лауреаты Нобелевской премии 2007 года. По физиологии или медицине — М.Капеччи, О.Смитис, М.Эванс // Природа. 2008. №1. С.78–83. — *Примеч.ред.*

зовали химические подходы для изучения биологических систем. Однако в 2018 г. случилось обратное: премией отмечено приложение главного биологического принципа — эволюции — к таким химическим понятиям, как катализ и молекулярное узнавание.

Эволюция за одну ночь

В живой природе все реакции катализируются ферментами, почти все из которых — вещества белковой природы. Преимущества природных катализаторов перед традиционными химическими стали очевидны с момента открытия ферментов в конце XIX в.: они не образуют побочные продукты, работают в мягких условиях, обладают высокой специфичностью и эффективностью.

Как только стала понятна природа белков (длинных аминокислотных цепочек, свернутых в сложную пространственную конфигурацию), у исследователей возник вопрос: можно ли спроектировать новые аминокислотные последовательности с заданными свойствами, нужными человеку? Для этих целей стали использовать одно из направлений биоинженерии — рациональный дизайн белков, т.е. метод компьютерного анализа их структур и механизмов действия, позволяющего определить, какие именно изменения в первичной структуре должны привести к желаемому результату. Попытки рационального дизайна белков иногда бывают успешны, но имеют, по-видимому, непреодолимое ограничение: число возможных вариантов астрономически велико. Комбинируя 20 аминокислот всего в семи позициях белка, можно получить вариантов больше, чем было синтезировано и исследовано веществ за всю историю науки, и на расчет этих вариантов не хватит никакой вычислительной мощности.

Как ни странно, созданием новых вариантов белков неосознанно занимаются многие люди — например, когда не доводят до конца курс приема антибиотиков, прописанный врачом при инфекции. Антибиотики убивают подавляющее большинство бактерий, но единицы из них могут нести мутации устойчивости, проживут в организме дольше и, если прекратить курс лечения раньше положенного, размножатся. Не каждый случай устойчивости объясняется мутацией в гене, кодирующей белок-мишень антибиотика, но все равно такие события обычны. Так, при изучении мутагенеза часто применяют метод устойчивости к антибиотикам рифампицину: если взять колонию бактерий и растить ее ночь в жидком питательном бульоне, а потом посеять каплю этой взвеси на питательную среду, содержащую рифампицин, то в чашке Петри вырастет несколько колоний, не реагирующих на это лекарство. Рифампицин подавляет фермент РНК-полимеразу, необходи-

мый для жизни клетки, и в устойчивых бактериях за ночь роста происходит спонтанная мутация в гене *rpoB*, который кодирует одну из субъединиц РНК-полимеразы. Если же в бульон, где ночью растут бактерии, добавить какой-то мутаген, таких устойчивых колоний вырастет гораздо больше. Таким образом, в присутствии антибиотика отбираются новые формы РНК-полимеразы, в которых изменено место связывания с рифампицином. Как видно, селекция — выживание приспособленных бактерий из огромного числа их вариантов с нормальным геном и геном с другими мутациями — позволяет придать белку нужные для бактерии свойства всего за одну ночь.

«Эволюционная машина» для дизайна белков

Первоначально для получения белков с новыми свойствами Фрэнсис Арнольд, как и многие исследователи в конце 1980-х, пыталась использовать рациональный дизайн, который уже в те годы довольно хорошо работал для создания малых молекул, в частности новых лекарств. Но для таких больших молекул, как белки со своим разнообразием и сложными пространственными структурами, эта задача оказалась неподъемной. Даже сегодня, когда используются современные методы компьютерного моделирования, успехи рационального дизайна очень ограничены. И Арнольд отказалась от этой идеи.

В 1984 г. знаменитый химик М.Эйген, один из отцов современной химической кинетики и лауреат Нобелевской премии 1967 г.*, опубликовал теоретическую работу о возможности использования «эволюционной машины» для дизайна белков [1]. В ней он отметил и сложности, с которыми придется столкнуться. Главная из них — разобщение генотипа и фенотипа: поскольку они связаны с разными молекулами (ДНК и белка соответственно), поиск очень редких удачных вариантов белков будет крайне сложным или вообще невозможным. Однако Арнольд эти трудности не испугали: 10 лет спустя вышла ее статья с описанием успешных экспериментов по направленной эволюции белка субтилизина — протеазы, секретируемой бактерией *Bacillus subtilis* [2]. Арнольд получила вариант субтилизина, который был активен в крайне неестественной среде — при высоких концентрациях (вплоть до 60%) органического растворителя диметилформамида. После четырех последовательных циклов направ-

* В 1967 г. Манфред Эйген (Manfred Eigen) совместно с Рональдом Норришем (Ronald Norrish) и Джорджем Портером (George Porter) стали лауреатами Нобелевской премии по химии «за исследование механизма очень быстрых химических реакций, протекающих при нарушении равновесия за счет очень коротких импульсов энергии». — *Примеч. ред.*

ленной эволюции был получен белок, в 256 раз более активный в растворителе, чем природный белок в водной среде.

Эту статью Арнольд можно по праву считать краеугольным камнем всей области направленной эволюции ферментов, потому что в ней полностью описана схема таких исследований. Она состоит из нескольких этапов:

- 1) определение подходящего исходного фермента для выбранной задачи;
- 2) обеспечение изменчивости белка посредством создания библиотеки ДНК-последовательностей, кодирующих его варианты;
- 3) скрининг или селекция, которые позволят отобрать варианты белков с улучшенными в нужном направлении свойствами;
- 4) повторное создание изменчивости — новые ДНК-библиотеки, но уже исходящие из успешных вариантов после первого раунда отбора;
- 5) новый отбор, но уже с повышенной строгостью;
- 6) повторение 4-го и 5-го этапов до желаемого результата.

С тех пор и в группе Арнольд, и в других лабораториях во всем мире было придумано и оптимизировано множество вариаций каждого из этих этапов. Как, например, они были реализованы в первой статье Арнольд? Этап 1 очевиден: протеаза субтилизин служит исходным вариантом для получения активного фермента, расщепляющего белковый субстрат (казеин) в диметилформамиде. Для создания библиотек вариантов ДНК (этап 2) в первых раундах направленной эволюции был использован набор из четырех одиночных мутаций, а в более поздних раундах (этап 4) — метод высокоошибочной ПЦР. Критерием отбора (этап 3) был гидролиз казеина молока, а методом селекции служил посев бактерий, несущих разные варианты субтилизина, на чашки, содержащие органический растворитель и казеин. Активные варианты субтилизина, секретируемые бактериями, создавали видимые прозрачные зоны гидролиза вокруг колоний на чашках с казеином. Из таких клонов выделяли плазмидную ДНК и подвергали дальнейшим раундам мутагенеза и отбора в присутствии возрастающих концентраций диметилформамида (этап 5). Конечный вариант фермента нес комбинацию из 10 различных мутаций, влияние которых по отдельности предсказать невозможно. Еще более впечатляющим достижением Арнольд стало получение термостабильного субтилизина. Природный белок инактивируется при 65°C в среднем за 5 мин, однако всего за пять этапов направленной эволюции удалось получить вариант субтилизина, выдерживающий эту температуру целых 17 ч.

Именно отсутствие необходимости предсказания последствий каждой конкретной мутации для активности белка — важнейшее преимущество метода направленной эволюции перед другими способами усовершенствования белков.

Не обязательно даже знать структуру белка или его каталитический механизм. Если удачно выбран размер библиотеки и метод скрининга или селекции, направленная эволюция позволит получить белок с желаемыми свойствами, даже при ограниченных знаниях о механизме его работы.

Важно понимать, что эволюция в природе, несмотря на удивительное разнообразие созданных ею живых организмов, далеко не всегда выдает оптимальное решение. Природа — не инженер, держащий в голове схему хорошо работающего устройства, а приспособленец, каждый раз выбирающий лучшее решение из доступных вариантов. Эволюцию часто иллюстрируют картиной адаптивного ландшафта (рис.1): в плоскости располагается некое условное пространство вариантов белка (или любого другого признака), а высота «холмиков» соответствует приспособленности организма. Если постепенный отбор на повышение приспособленности в ближайшем окружении вариантов завел нас на низкий холмик, спуститься оттуда уже очень трудно: при спуске приспособленность будет понижаться, и отбор ликвидирует носителей таких вариантов. Чтобы «перепрыгнуть» в более высокую точку, нужно сразу несколько изменений — мутаций. Именно поэтому ученые и могут улучшать природные белки: сами по себе они обычно неидеальны даже для своего естественного окружения, не говоря уже о каких-то совершенно новых условиях.

Откуда начинать и как отбирать — вот два, без сомнения, важнейших вопроса для направленной

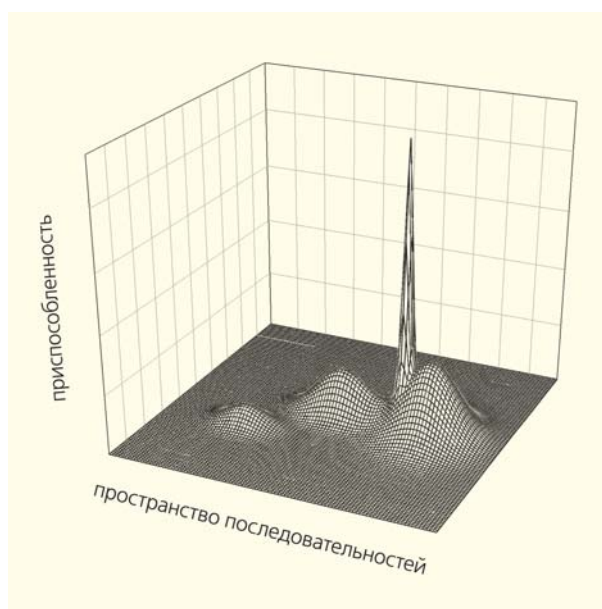


Рис.1. Адаптивный ландшафт. Плоскость представляет некие условные координаты вариантов белка. Чем выше «горка», тем выше приспособленность организма с этим вариантом.

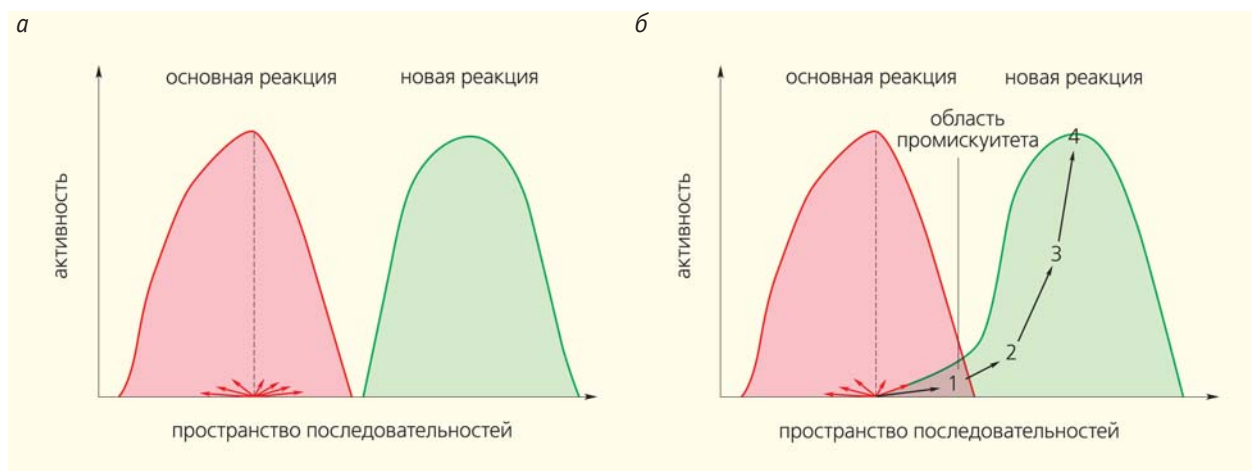


Рис.2. Каталитическая активность ферментов в различных реакциях. Если фермент не способен катализировать какую-то реакцию вообще (а), никакая эволюция в этом направлении не изменит его естественную субстратную или реакционную специфичность. Такое возможно только в случае каталитического промискуитета (б): если фермент катализирует реакцию не оптимальным образом, можно сместить его оптимум в новую область.

www.nobelprize.org

ной эволюции белков. Арнольд и ее коллеги неоднократно доказывали, что можно получить ферменты с улучшенной активностью, в новых растворителях, на новых субстратах, при новой температуре и даже катализирующие другую реакцию. Все это возможно до тех пор, пока фермент, выбранный в качестве исходного, обладает активностью для предполагаемой реакции — сколь угодно низкой, но все же не нулевой. На самом деле практически любой фермент может совершать ошибки: обычно катализируя реакцию с «неправильными» субстратами, реже — реакцию другой химической природы. Биохимики даже изобрели для этого явления специальный, несколько некорректный, термин «каталитический промискуитет». К примеру, ДНК-полимераза — фермент, основная роль которого заключается в синтезе новых молекул ДНК, — может, хоть и редко (с частотой один раз на 10 тыс.), включать в растущую цепь некомплементарные нуклеотиды или даже нуклеотиды РНК. Такой очень низкий уровень активности в отношении нужной реакции обеспечивает начальное состояние для направленной эволюции (рис.2). Из ДНК-полимеразы уже были получены полимеразы, синтезирующие РНК и даже нуклеиновые кислоты с не встречающимися в природе остатками сахаров, при этом часто для увеличения активности необходимо всего несколько мутаций [3]. Одни из любимых объектов Фрэнсис Арнольд — белки семейств цитохрома P450 и цитохрома c — осуществляют в клетке многие реакции трансформации разных малых молекул. На их основе были получены белки, катализирующие даже такие реакции, для которых природных ферментов нет вообще — например, синтеза связи между углеродом и кремнием или углеродом и бором.

Селекция и скрининг

Вторая главная задача при создании новых белков — это способ отбора нужных нам вариантов. Все возможные способы можно поделить на две группы: собственно отбор (селекция) и скрининг, и разница между этими подходами принципиальная. При скрининге исследователь должен получить в каком-то осязаемом виде все созданные варианты и для каждого из них решить, подходит он ему или нет. Например, типичный пример скрининга — тот самый поиск работающих в диметилформамиде вариантов субтилизина, с которого все началось: Арнольд должна была просмотреть все колонии и для каждой решить, достаточно ли широка зона лизиса вокруг нее. При селекции, напротив, исследователь сам не решает, достоин ли конкретный вариант продолжения в потомстве, — за человека это делают условия, которые созданы для организма, в котором синтезируется этот вариант, как в примере с устойчивостью к рифампицину.

Селекция гораздо выгоднее скрининга, поскольку не требует особых усилий от экспериментатора, но для нее намного сложнее, чем для скрининга, придумать условия из-за разобщения генотипа и фенотипа, упомянутого еще Эйгеном. Джордж Смит, второй лауреат этого года, получил известность именно благодаря тому, что придумал очень гибкий и мощный вариант селекции, пригодный для отбора белков, взаимодействующих почти с любым другим веществом — вторым белком, нуклеиновыми кислотами и многими другими лигандами.

Внимание Смита привлекли хорошо изученные к середине 1980-х годов нитчатые бактериофаги (или просто фаги). Эти вирусы, поражающие бактерии, отличаются от фагов других групп относи-

тельной простотой строения и жизненного цикла, поэтому активно используются в качестве инструментов для генетической инженерии. В геноме такого вируса всего девять генов. Вирусная частица (вирион) представляет собой длинный гибкий цилиндр, образованный несколькими тысячами копий белка g8p, длина вириона в 100–300 раз превышает его ширину, поэтому он действительно похож на нить (рис.3). На одном конце вириона находятся несколько молекул белков g3p и g6p, на другом — g7p и g9p, а внутри цилиндра упакована ДНК. Фаг прикрепляется белком g3p к специальной внеклеточной структуре бактерий — к F-пилю. Разумеется, бактериям он нужен не для того, чтобы их заражали фаги, а для обмена генетической информацией между собой, но вирусы в ходе эволюции научились эксплуатировать естественные бактериальные процессы в своих целях. Когда бактерия втягивает F-пиль обратно в клетку, вместе с ней проникает и вирусная ДНК. Дальше — как у всех вирусов: внутри клетки происходит репликация их генома, синтезируются фаговые белки, и потомки вируса выходят наружу. В отличие от более привычных нам вирусов, нитчатые фаги не убивают бактерии, а могут существовать внутри них долгое время и продуцировать все новые и новые вирусные частицы. Смит понял (и в том главная его заслуга), что бактериофаг предоставляет идеальное для селекции сочетание генотипа и фенотипа, т.е. модифицированного поверхностного белка и кодирующей его ДНК.

Смит обратил внимание на тот самый белок g3p, который фаг использует для прикрепления к бактериальному пилю. Фаговая частица несет всего пять копий этого белка. С помощью простых генно-инженерных манипуляций можно включить в ген, который отвечает за синтез g3p, какую-нибудь последовательность, кодирующую любой другой белок или его участок. Ограничения здесь только в размере: слишком большую вставку чужеродной ДНК вирус все-таки «не потянет», хотя нитчатые фаги могут включать в свой геном вставки размером до трети его длины. В собранном вирионе g3p оказывается слитым с интересующим нас белком (такая конструкция из двух разных белков называется химерной), и все это находится на одном конце вирусной частицы. Инкубируя фаг с сорбентом, на котором находится какая-то другая молекула, можно связывать вирионы, содержащие химерный белок. А если существует библиотека

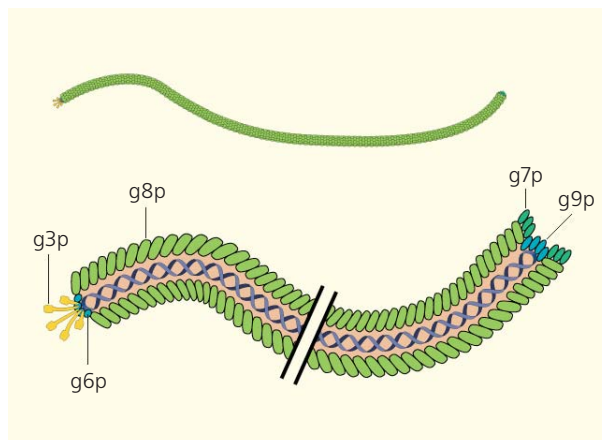


Рис.3. Строение нитчатого бактериофага M13 — одного из вирусов, применяемых в фаговом дисплее.

viralzone.expasy.org/558

множества мутантных вариантов такого белка, то можно отбирать только те из них, которые связываются с сорбентом, а остальные смывать — например, раствором соли. Связанные вирусные частицы можно смыть с сорбента в более жестких условиях, заразить ими бактерии и размножить — тут-то и пригодится физическая привязанность генотипа к фенотипу в вирусной частице. Повторив несколько раз такой цикл, мы получим набор вирусов, которые несут химерные белки, связывающиеся с нужной нам молекулой, и, соответственно, набор вирусных ДНК, кодирующих эти белки. Этот метод назван фаговым дисплеем (рис.4) [4, 5].

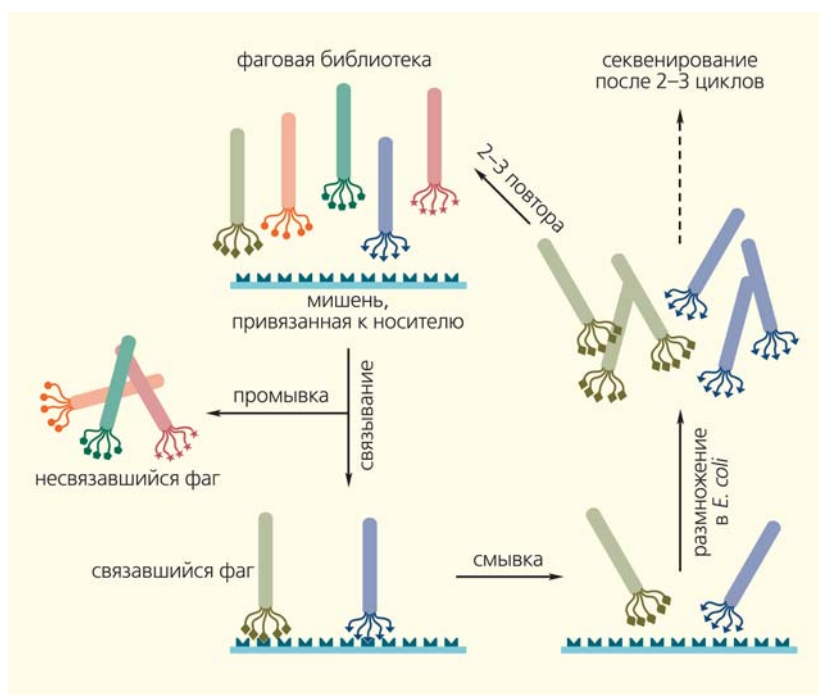


Рис.4. Общая схема фагового дисплея.

Фаговый дисплей

В своей пионерной работе Смит не устраивал эволюцию, а просто показал, что, если взять известный белок (он использовал фрагмент рестриктазы EcoRI) и слить его с g3p, полученные фаги можно отбирать, используя антитела к этому белку [6]. Уже в начале 1990-х появилось множество статей про отбор коротких пептидов из библиотек мощностью в десятки миллионов вариантов. Фаговый дисплей быстро усовершенствовался и оказался эффективным для селекции взаимодействий белков, в основном между пептидами и антителами. Стоит отметить, что один из широко используемых в наши дни вариантов фагового дисплея — получение химерных белков не с g3p, а с g8p, основным белком, из которого состоит вирион, — был предложен в конце 1980-х годов советскими учеными из центра «Вектор» под Новосибирском. Поскольку копий белка g8p в вирионе не пять, а несколько тысяч, этот способ позволяет отбирать варианты с более слабыми взаимодействиями, чем химерный белок g3p.

Конечно, несмотря на свою красоту, фаговый дисплей применяется далеко не в каждой молекулярно-биологической лаборатории, в этом ему не угнаться за такими методами, как полимеразная цепная реакция или сайт-направленный мутагенез, разработчики которых также награждены Нобелевской премией по химии*. Возможно, главную роль в решении Нобелевского комитета в этом году сыграли достижения третьего лауреата — Грегори Винтера, который на основе изобретенного Смитом метода фактически создал новое направление в фармакологии и индустрии с оборотом в десятки миллиардов долларов.

В то время как Смит и многие его коллеги встраивали в фаговый белок пептиды и отбирали их на связывание с антителами, Винтер в своих первых работах пошел прямо противоположным путем и попытался сделать так, чтобы фаг нес на своей поверхности антитела, а отбирался по связыванию с соответствующими антигенами. Это далеко не так просто, как может показаться на первый взгляд. Во-первых, антитела у человека и многих других животных — это не одиночные молекулы, они состоят из четырех белковых цепей: двух тяжелых и двух легких, соединенных мостиками из двух атомов серы (рис.5). Во-вторых, они достаточно большие и в геном бактериофага не поместятся. Но для связывания антигена не нужна вся молекула антитела: каждая тяжелая и каждая легкая цепь содержит так называемые переменные участки, в которых и располагаются фрагменты, узнающие антиген. Можно взять гены, кодирующие цепи антитела, соединить их переменные части во-

едино, и получить искусственный ген, из которого образуется одна белковая молекула, несущая обе части, узнающие антиген, и способная его связывать. Такие мини-антитела называются одноцепочечными переменными фрагментами, или scFv (от англ. single chain fragment, variable). Винтер показал, что можно получать фаги, несущие отдельные scFv-фрагменты, и успешно вести селекцию на связывание с антигеном [7]. С этого момента открылась новая страница в фармакологии, позволявшая наконец в полной мере реализовать потенциал антител как лекарств.

Вообще говоря, первые терапевтические антитела в медицине появились ровно в тот момент, когда были открыты антитела как таковые: в 1890 г. японский бактериолог К.Сибасабура получил в морских свинках и кроликах сыворотку против столбнячного токсина и предположил, что в ней содержатся какие-то вещества, связывающие чужеродный антиген. После того, как в 1970-х годах Ц.Мильштейн и Г.Кёлер научились производить моноклональные, т.е. чистые, генетически однородные и одинаковые по структуре, антитела**, казалось, что не за горами момент, когда антителами можно будет лечить почти все. Увы, ученые, получившие первые лекарства на основе антител, столкнулись с проблемой: организм человека воспринимает антитела, полученные в организмах других видов (например, мышинные, как большинство моноклональных антител первого поколения), как чужеродные и вырабатывает к ним свой

** В 1984 г. Нильс Ерне (Niels Jerne), Цезарь Мильштейн (Cesar Milstein) и Георг Кёлер (Georges Köhler) были награждены Нобелевской премией «за изучение специфичности в развитии и контроле иммунной системы и открытие принципов выработки моноклональных антител с помощью гибридом». Подробнее см.: Незлин Р.С. Лауреаты Нобелевской премии 1984 года. По физиологии или медицине — Н.Ерне, Ц.Мильштейн, Г.Кёлер // Природа. 1985. №1. С. 98–101. — Примеч. ред.

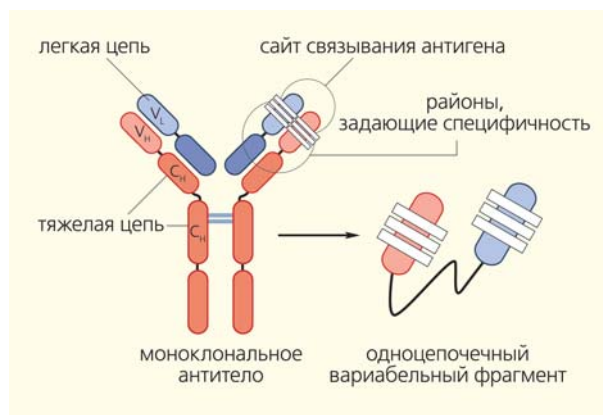


Рис.5. Строение полноразмерных антител и scFv-фрагментов. Прямоугольниками схематически обозначены гипер-переменные участки, связывающиеся с антигеном.

www.genscript.com

* Подробнее см.: Берлин Ю.А., Белянова Л.П. Лауреаты Нобелевской премии 1993 года. По химии — М.Смит, К.Муллис // Природа. 1994. №1. С.104–110. — Примеч. ред.

иммунный ответ. Фаговая система дает прекрасную возможность обойти эту проблему. Еще раньше Винтер разработал способ гуманизации антител, обнаружив, что основная их изменчивость сосредоточена всего в шести небольших гипервариабельных участках (три на вариабельном фрагменте тяжелой и три на вариабельном фрагменте легкой цепи), и что можно, получив моноклональные антитела от иммунизированных мышей, перенести эти участки в соответствующие места человеческих антител и создать молекулу, которая узнает нужный антиген, но воспринимается человеческой иммунной системой как своя собственная [8]. Поэтому можно иммунизировать мышью, сделать из нее библиотеку вариабельных доменов, отобрать лучшие при помощи фагового дисплея и перенести вариабельные участки в «каркас» человеческого антитела. Или вообще обойтись без иммунизации, сразу синтезировав фаговую библиотеку гипервариабельных участков на основе структуры человеческого антитела.

Свои результаты по гуманизации антител Винтер довел до практического использования еще до того, как вплотную занялся фаговым дисплеем. Специально для этого он основал компанию Cambridge Antibody Technology, которая занимается инженерией антител. В 1983 г. в лаборатории Дж.Гейла Кембриджского университета были получены крысиные антитела против лимфоцитов человека. Как выяснилось впоследствии, они связывают пептид CD52, присутствующий на поверхности всех зрелых лимфоцитов. Эти антитела казались хорошими кандидатами для терапии состояний, в которых нужно снизить иммунитет, — например, при аутоиммунных заболеваниях, пересадке органов или при злокачественных заболеваниях иммунной системы. Но из-за иммунного ответа со стороны человеческого организма использовать их было опасно. Винтер пересадил гипервариабельные участки антител крысы в ген легкой цепи человеческих антител и получил алемтузумаб — легкую цепь антитела, узнающую CD52. Алемтузумаб сейчас используют для терапии хро-

нического лимфолейкоза, а за рубежом он одобрен и для лечения распространенного аутоиммунного заболевания — рассеянного склероза.

Первым терапевтическим антителом, полученным с использованием метода фагового дисплея, стал адалимумаб, направленный на фактор некроза опухолей — важный регулятор иммунного ответа; это средство занимает сейчас важное место в лечении многих тяжелых аутоиммунных болезней. В 2015–2016 гг. адалимумаб был самым прибыльным лекарством в мире с продажами около 15 млрд долл. США. Счет разных «дизайнерских» антител в медицине сегодня идет на десятки.

* * *

Лауреаты этого года показывают нам прекрасный пример того, как фундаментальная наука может быстро давать прикладные результаты, приносить пользу человечеству. Искусственные ферменты, созданные Ф.Арнольд и ее последователями, трудятся в промышленности, их можно найти в составе стиральных порошков и чистящих жидкостей для контактных линз. Антитела, разработанные Г.Винтером, на наших глазах совершают революцию в медицине. И все же нелишне будет еще раз отметить, что все это выросло из чисто фундаментальных исследований, из научного любопытства: можем ли мы сделать фермент лучше, чем в природе? Как антитела узнают свои антигены? Как придумать белок, который бы связывал то, что мы хотим? В науке так почти всегда и бывает: самые полезные вещи, изменяющие нашу жизнь, рождаются не тогда, когда их пытаются изобрести специально, а из, казалось бы, совершенно непрактичных попыток узнать, как же устроена природа.

© А.В.Юдкина¹,

доктор биологических наук Д.О.Жарков^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

²Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН (Новосибирск, Россия)

e-mail: dzharkov@niboch.nsc.ru; ayudkina@niboch.nsc.ru

Литература / References

1. *Eigen M., Gardiner W.* Evolutionary molecular engineering based on RNA replication. *Pure Appl. Chem.* 1984; 56(8): 967–978.
2. *Chen K., Arnold F.H.* Tuning the activity of an enzyme for unusual environments: sequential random mutagenesis of subtilisin E for catalysis in dimethylformamide. *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 1993; 90(12): 5618–5622.
3. *Pinheiro V.B., Taylor A.I., Cozens C. et al.* Synthetic genetic polymers capable of heredity and evolution. *Science.* 2012; 336(6079): 341–344. Doi:10.1126/science.1217622.
4. Кузьмичева Г.А., Белявская В.А. Пептидный фаговый дисплей в биотехнологии и биомедицине. *Биомедицинская химия.* 2016; 62(5): 481–495. Doi:10.18097/PBNC201. [Kuzmicheva G.A., Belyavskaya V.A. Peptide phage display in biotechnology and biomedicine. *Biochem. Moscow Suppl. Ser. B.* 2017. 11(1): 1–15. Doi:10.1134/S1990750817010061.]
5. Тикунова Н.В., Морозова В.В. Фаговый дисплей на основе нитчатых бактериофагов: применение для отбора рекомбинантных антител. *Acta Naturae.* 2009; 1(3): 22–31. [Tikunova N.V., Morozova V.V. Phage Display on the Base of Filamentous Bacteriophages: Application for Recombinant Antibodies Selection. *Acta Naturae.* 2009; 1(3): 20–28.]

6. *Smith G.P.* Filamentous fusion phage: novel expression vectors that display cloned antigens on the virion surface. *Science*. 1985; 228(4705): 1315–1317. Doi:10.1126/science.4001944.
7. *McCafferty J., Griffiths A.D., Winter G. et al.* Phage antibodies: filamentous phage displaying antibody variable domains. *Nature*. 1990; 348(6301): 552–554. Doi:10.1038/348552a0.
8. *Jones P.T., Dear P.H., Foote J. et al.* Replacing the complementarity-determining regions in a human antibody with those from a mouse. *Nature*. 1986; 321(6069): 522–525. Doi:10.1038/321522a0.

2018 Nobel Prize Laureates in Chemistry: Frances Arnold, George Smith, and Sir Gregory Winter

A.V.Yudkina¹, D.O.Zharkov^{1,2}

¹*Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia)*

²*Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine, Siberian Branch of RAS (Novosibirsk, Russia)*

The 2018 Nobel Prize in Chemistry was awarded for discoveries in the field of protein design, which importance is difficult to overestimate these days. Dozens of different “designer” antibodies are used in medicine today, which were created on the basis of the methods developed by Frances H.Arnold, George P.Smith, and Sir Gregory P.Winter.

Keywords: Nobel Prize, biocatalysis, molecular recognition, protein design, phage display, directed evolution of enzymes.

По физиологии или медицине — Дж.Аллисон и Т.Хондзё

В 2018 г. Нобелевская премия по физиологии или медицине присуждена за «открытие терапии онкологических заболеваний путем подавления негативной работы иммунной системы» американцу Дж.Аллисону и японцу Т.Хондзё. Однако в этом году нобелевскими лауреатами стали еще два иммунолога — Дж.Смит и Г.Винтер, получившие премию в номинации «химия» за открытие новых подходов к созданию белков с заданными свойствами, в том числе и терапевтических антител.

Ключевые слова: Нобелевская премия, рак, иммунотерапия, иммунологические контрольные точки, моноклональные антитела.

Нобелевские лауреаты в номинации «физиология или медицина» были объявлены 1 октября 2018 г., ими стали Дж.Аллисон и Т.Хондзё, которых наградили за пионерные работы, приведшие к успехам в иммунотерапии рака. Иммунологи начали ликовать. На следующий день присудили Нобелевскую премию по химии, и при внимательном рассмотрении оказалось, что двое из трех лауреатов этой премии — Дж.Смит и Г.Винтер — тоже иммунологи. За что же их всех отметили? Давайте разбираться.

Джэймс Аллисон (James Patrick Allison) родился в 7 августа 1948 г. в г.Алисе (штат Техас, США). О карьере ученого он задумался еще школьником и, закончив обучение в биологическом классе средней школы в Алисе, поступил в Университет штата Техас (Остин), где в 1969 г. получил степень бакалавра в области микробиологии, а в 1973-м — PhD по биологии. Затем три года (до 1977 г.) работал в знаменитом Научно-исследова-

тельском институте имени Скриппса (Сан-Диего, штат Калифорния), следующие шесть лет (до 1984 г.) — в Онкологическом центре имени А.Д.Андерсона Техасского университета — одном из самых знаменитых раковых центров США. Главная часть его научной карьеры прошла в Калифорнийском университете в Беркли, где с 1985 по 2004 г. он руководил лабораторией изучения рака. Именно там были сделаны исследования, которые привели к Нобелевской премии. В начале века значение открытия Аллисона стало широко известным, и его наперебой стали приглашать в различные университеты и центры и предлагать золотые горы. В 2004 г. он переехал Нью-Йорк и возглавил вновь созданный Центр иммунотерапии рака имени Д.К.Людвига в одном из самых престижных раковых институтов США — Онкологическом центре имени А.П.Слоуна и Ч.Ф.Кеттеринга на Манхеттене. Однако в 2012 г. профессор Аллисон вернулся в родной Техас и сейчас руководит кафед-

рой иммунологии в Онкологическом центре имени Андерсона в Хьюстоне. Аллисон избран в Национальную академию наук США и Национальную медицинскую академию. Его научные достижения отмечены международными и национальными наградами.

Теперь немного о его науке. Много лет Аллисон — специалист в области фундаментальной иммунологии — изучал молекулярные механизмы передачи сигнала в Т-лимфоцитах. Его лаборатория в Калифорнийском университете в Беркли еще в 1980-х годах внесла значительный вклад в открытие Т-клеточного рецептора [1]. Кстати, это важнейшее открытие так и не было отмечено Нобелевской премией — не исключено, что было очень трудно выбрать трех достойнейших из более чем пяти главных участников этого открытия. Таким образом, минимум одна Нобелевская по иммунологии еще «в уме».

В 90-х годах Аллисон стал изучать (открытую не им!) молекулу CTLA-4 (от англ. cytotoxic T-lymphocyte associated protein 4) на Т-клетках, которая подавляет (ингибирует) главный сигнал костимуляции (сигнал 2) [2, 3]. Без него Т-лимфоциты не активируются и не могут выполнять эффекторные функции: в частности, в применении к иммунотерапии рака, они не могут убить перерожденную клетку. Моноклональные антитела — наиболее распространенный «инструмент» иммунолога в исследовательской работе — в случае с CTLA-4 ими блокируют действие этой ингибиторной молекулы, и значит (минус на минус дает плюс), позволяют активировать Т-клеточный иммунный ответ. Более того, оказалось, что в экспериментальной раковой модели на мышах антитела к CTLA-4 проявили яркий противоопухолевый эффект [4]. На пальцах это можно объяснить так: для Т-клеток был открыт некий молекулярный тормоз, и если систему с ручного тормоза не снять, то иммунный ответ «не поедет». При этом ученые заодно ответили и на вопрос, как снимать с тормоза — надо ввести антитела к CTLA-4.

Про Нобелевскую премию Аллисон тогда не думал, он просто много и плодотворно трудился, чтобы понять, «как оно работает». Но нет ученого, который бы не мечтал о пользе своих научных результатов для людей. И так получилось, что примерно через десятилетие на основании этого, чисто фундаментального, открытия было создано (не Аллисоном!) лекарство ипилимумаб — тоже моноклональное антитело, но против CTLA-4 человека, которое, хотя и не вылечило рак (об этом важно помнить и честно говорить!), но привело к новой



Джэймс Аллисон.



Тасуку Хондзё.

концепции «иммунологических контрольных точек» (чекпойнтов) и к революции в иммунотерапии опухолей [5].

Может ли вообще иммунная система защищать нас от опухолей? Начнем с того, что этот вопрос далеко не тривиален. Считается, что иммунная система возникла в эволюции и совершенствовалась для абсолютно других целей — в первую очередь, для защиты от патогенных бактерий, вирусов и т.д. Действительно, если у женщины в 50 лет возникнет опухоль, то эволюция этого не заметит, каким бы неприятным ни было это утверждение. Тем не менее за последние 30 лет установлено, что во многих случаях иммунная система все же может распознать переродившуюся опухолевую клетку, так как на ее поверхности появляются некоторые новые молекулы. В частности, из-за нарушений целостности генома, многочисленных мутаций и потери ряда контрольных механизмов опухолевая клетка начинает экспрессировать на поверхности кусочки раковых молекул, так называемые неоантигены. Это создает основу для их распознавания Т-лимфоцитами. Вообще, распознавание — важнейший, но только первый этап иммунной реакции, при этом в опухолях часто находят главные эффекторные клетки иммунной системы — цитолитические («убивающие») Т-лимфоциты. Почему они туда пришли? Там же нет инфекционного процесса! Загадка...

Итак, по какой-то (до недавнего времени непонятой) причине Т-клетки явились, распознали, но убивать не стали — что-то их остановило. Еще в середине 80-х годов прошлого века американский врач-исследователь С.Розенберг (Steven Rosenberg) научился выделять такие Т-лимфоциты из опухолевого материала пациентов, культивировать и нарабатывать их в пробирке в больших количествах, обрабатывать всякими веществами, чтобы стимулировать их активность как убийц рака, а затем вводил их обратно пациенту [6]. И у этой пер-

сонализированной (и очень дорогой) терапии были определенные успехи. (Кстати, Розенберга многократно упоминали как кандидата на Нобелевскую премию за иммунотерапию рака.) Но работа эта методика далеко не всегда. Так вот, открытие лауреатов премии этого года и помогло объяснить с позиции молекулярных механизмов, чего не хватало Т-лимфоцитам для того, чтобы принять правильное решение — атаковать опухолевые клетки.

Тут стоит сделать еще одно лирическое отступление. Иммунная система возникла и отточила свои механизмы в эволюции для того, чтобы защищать нас от постоянно меняющегося окружающего мира микробов (в широком смысле слова), среди которых немало наших смертельных врагов — патогенов. Так для чего же тогда все эти контрольные механизмы, к которым следует добавлять еще и супрессорные или регуляторные Т-лимфоциты (еще одна будущая Нобелевская премия)? Конечно, не для борьбы с раком, а для того, чтобы не возникло нежелательного иммунного ответа, в первую очередь против своих собственных антигенов (т.е. аутоиммунных реакций). Кстати, CTLA-4 находится и на поверхности регуляторных Т-клеток, и есть теория, что эффект анти-CTLA-4-терапии связан с удалением из системы этих самых супрессорных клеток. В любом случае, блокировка сдерживающих механизмов («снятие с тормозов») может привести не только к противоопухолевой иммунной реакции, но и к росту аутоиммунитета. Понятно, что фармакологической блокировкой можно «играть»; и в ходе клинических испытаний были найдены оптимальные условия «снятия с тормозов». Тем не менее, как и предсказывала фундаментальная иммунология, среди наиболее серьезных побочных эффектов новой терапии оказались именно аутоиммунные реакции. Ну и надо подчеркнуть, что одни виды опухолей хорошо «отвечают» на ипилимумаб, а другие — практически нет.

Итак, с Алиссоном и со значением его открытия разобрались. Правда, до сих пор не ясно, где же (в каком месте организма) эта терапия снимает Т-клетки с тормоза, ведь сама опухолевая клетка и ее микроокружение, видимо, не связаны конкретно с этим механизмом торможения. И тут самое время рассказать о втором лауреате.

Тасуку Хондзё (Tasuku Honjo) родился 27 января 1942 г. в г. Киото (Япония). В 1960 г. поступил на медицинский факультет Киотского университета, где в 1966 г. получил степень бакалавра, в 1971-м — магистра (клиническая биохимия), в 1975-м там же защитил диссертацию под руководством Н.Ясутоми (Nishizuka Yasutomi) и О.Хаяиши (Osamu Hayashi) и получил степень PhD в области медицинской химии. Для научной и врачебной карьеры в Японии очень важна длительная стажировка в США, поэтому с 1971 по 1973 г. Хондзё работал в отделе эмбриологии Института Карнеги в Вашингтоне, а затем в 1973–1974 гг. — в лабора-

тории молекулярной генетики Национального института детского здоровья и развития человека (Бетесда, штат Мэриленд). После возвращения на родину Хондзё стал доцентом медицинского факультета Токийского университета (1974–1979), потом — профессором кафедры генетики Университета Осаки (1979–1984), и уж затем вернулся на медицинский факультет Киотского университета в качестве профессора кафедры медицинской химии (до 2005 г.) и кафедры иммунологии и геномной медицины. Для любителей рейтингов стоит сказать, что в области биомедицины именно университеты Киото, Осаки и Токио считаются самыми лучшими в Японии. В настоящее время Хондзё — заместитель генерального директора и заслуженный профессор Института перспективных исследований Киотского университета (с 2017 г.). Он — член Японского общества иммунологов (которое возглавлял с 1999 по 2000 г.) и Японской академии наук, а также почетный член Американской ассоциации иммунологов и иностранный член Национальной академии наук США.

В отличие от Алиссона, специалиста по Т-лимфоцитам, Хондзё — классик В-клеточной иммунологии. Напомним, что В-лимфоциты делают антитела и, как и Т-лимфоциты, относятся в адаптивной части иммунной системы. Лаборатория Хондзё примерно 30 лет назад открыла несколько очень важных молекул, которые регулируют иммунную систему, самая интересная и оригинальная из которых — дезаминаза AID (от англ. activation-induced deaminase) [7]. Без нее невозможно понять, как образуется все разнообразие антител (их как раз и делают В-лимфоциты), которые защищают нас от вирусов, бактерий, токсинов и многих других неприятностей. Хотя AID — вполне «нобелевская» молекула, свою премию Хондзё получил не за нее. Просто он между делом охарактеризовал еще и рецептор лимфоцитов PD-1, который тоже относится к категории ингибирующих рецепторов и функционально схож с CTLA-4, хотя имеет другой молекулярный механизм действия [8]. Открытие этого рецептора (а затем и его лиганда, т.е. молекулы, которая передает сигнал через этот рецептор) привело к созданию новых лекарств, основанных на терапевтических антителах (в частности, ниволумаба), которые оказались еще более эффективными, чем пионерный ипилимумаб. И вроде бы у них меньше побочных эффектов.

Поскольку CTLA-4 и PD-1 используют разные механизмы ингибирования, комбинация лекарств ипилимумаба и ниволумаба привела к наиболее полному высвобождению Т-лимфоцитов. Избавившись от сдерживающих их уз, они начинают атаковать опухолевые клетки, причем, в отличие от ситуации с CTLA-4, опухолевые клетки и опухолевое микроокружение способны напрямую посылать ингибирующий сигнал через PD-1 за счет экспрессии на своей поверхности лиганда для

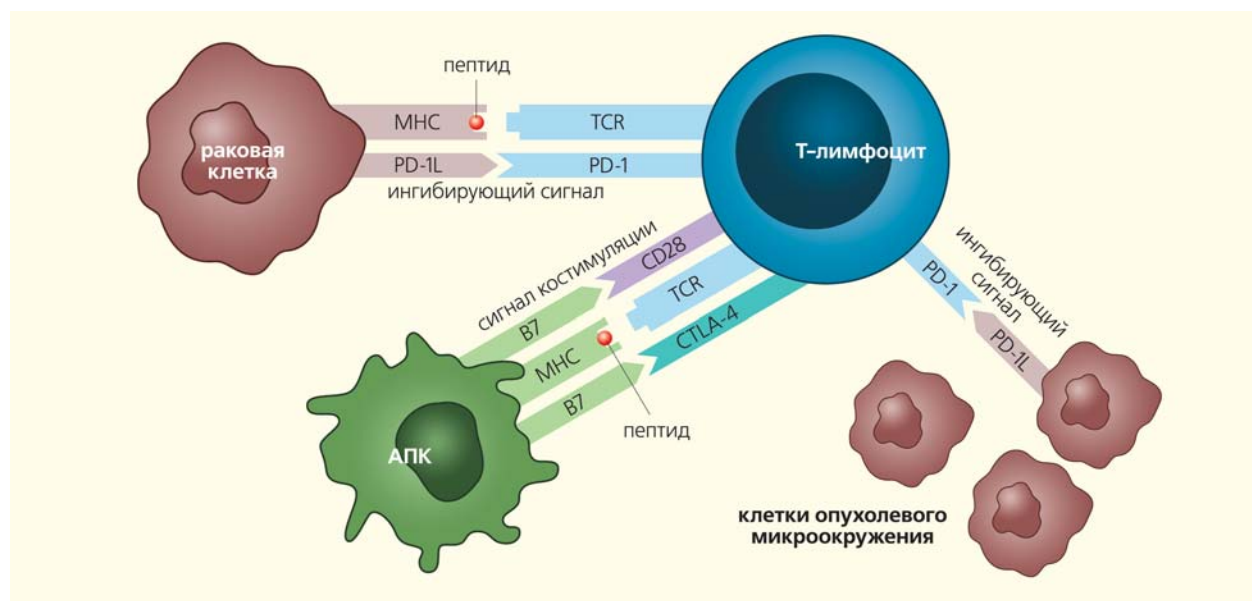


Схема ингибирования иммунологических контрольных точек («чекпойнтов») при иммунотерапии рака. Первым был понят механизм действия CTLA-4, однако со временем стало ясно, что вторая «нобелевская» молекула — PD-1 — более важная, поскольку именно она отвечает на прямой ингибирующий сигнал опухоли. Раковая клетка представляет на своей поверхности неоантиген — новый пептид, возникший в результате мутаций, что позволяет Т-клетке ее узнать. Но клетки опухоли или опухолевого микроокружения (например, миелоидная клетка) и сами могут производить ингибирующие сигналы в виде лиганда PD-1L, который взаимодействует с рецептором PD-1 на Т-клетке. Блокирующие антитела либо к рецептору PD-1 (ниволумаб или пембролизумаб), либо к лиганду PD-1L (авелумаб, атезолизумаб или дурвалумаб) прерывают этот ингибирующий сигнал. Антигенпрезентирующая клетка (АПК; например, дендритная клетка) также может выставить на своей поверхности опухолевый неоантиген (который она получила, «переварив» какую-то другую клетку опухоли), но при этом она посылает сигнал костимуляции B7 через рецептор костимуляции CD28 на Т-клетке. Ее Т-клеточный рецептор (TCR) распознает неоантиген как на опухолевой клетке, так и на АПК (в иммунологии это называется сигнал 1), но для активации и для цитолитической атаки ей нужен сигнал костимуляции — от B7 через рецептор костимуляции CD28 (сигнал 2). Но Т-клетка может начать экспрессировать «нобелевский» рецептор CTLA-4, который является не активирующим (как CD28), а ингибирующим. И поскольку он тоже связывается с B7, то получается, что он «крадет» сигнал костимуляции и Т-клетки не активируются. Предотвращают «воровство» блокирующие антитела к CTLA-4 (ипилиумаб)!

этого рецептора — PD-1L. Таким образом, одни тормоза (через CTLA-4) с Т-клеток снимаются «системно», а вторые (через PD-1) — на местном уровне. В силу этих обстоятельств именно Хондзё и составил компанию Аллисону на церемонии вручения Нобелевских премий в начале декабря. В итоге открытие механизмов подавления негативной иммунорегуляции (т.е. ингибирования ингибиторов) привело к эффективной терапии онкологических заболеваний (минус на минус дает плюс) — и Нобелевской премии (еще один плюс)!

А что же «химики»? Нобелевский комитет отметил премией новые скрининговые технологии, позволяющие отбирать оптимальные катализаторы (ферменты) и — что очень важно! — антитела и антигены. Половина премии присуждена Дж.Смиту и Г.Винтеру, которые внесли решающий вклад в разработку фагового дисплея — одной из самых успешных и инновационных скрининговых технологий современности (о них и об их результатах подробно рассказано в предыдущей статье). По сути — это не химия, а чистая молекулярная

биология, да еще и на классическом объекте — бактериофаге. Смит к тому же защитил 50 лет назад диссертацию, которая была посвящена антителам, т.е. он — молекулярный иммунолог. А Винтер, который участвовал в разработке метода секвенирования ДНК «по Сенгеру»* (Ф.Сенгер был его учителем в Кембридже) и в проекте «Геном человека», стал молекулярным иммунологом и позже иммунобиотехнологом, когда применил новый метод к разработке одного из самых успешных лекарств антицитокиновой иммунотерапии — адалимумаба. Этот препарат помогает миллионам больных ревматоидным артритом, болезнью Бехтерева и некоторыми другими аутовоспалительными заболева-

* Фредерик Сенгер (Frederick Sanger) — английский биохимик, получивший две Нобелевские премии по химии — в 1958 г. за исследования структуры белка, послужившие основой для получения синтетического инсулина и других гормонов, и в 1980 г. (совместно с В.Гилбертом и П.Бергом) — за метод расшифровки первичной структуры ДНК, также известный как «метод Сенгера». — *Примеч. ред.*

ниями. Замечу, что Винтер, как и участники группы «Битлз», был удостоен рыцарского титула и просит при обращении к нему добавлять слово «сэр».

* * *

Нобелевским премиям почти 120 лет. И иммунологам присуждают премии с завидной регулярностью — не реже чем раз в 10 лет, а с учетом премий по химии — и того чаще. Кстати, и самая первая Нобелевская премия по физиологии или медицине* — за иммунологию (за серотерапию, в которой действующим началом были неизвестные тогда науке антитела), и последняя — опять за иммунологию! Закономерность?

Итак, список иммунологов, отмеченных Нобелевскими премиями, пополнился в 2018 г. целыми четырьмя лауреатами. Когда же среди них снова окажется россиянин? Последний наш соотечест-

венник был награжден ровно 110 лет назад, но открытия свои он делал за рубежом (вы поняли, о ком я?). Жаль, что не дали в этот раз — ведь квота на трех лауреатов в премии по физиологии или медицине полностью не исчерпана. К тому же в декабре 2016 г. директор департамента общественного здоровья и коммуникаций Минздрава сообщил: «Новый полностью отечественный препарат эффективен при меланоме, раке мозга, легкого, почки, мочевого пузыря и шеи». Министерство назвало фантастическими результаты испытаний этого препарата. Журналисты спросили: а как он называется? Ответ: «Пока он называется PD-1, однако, скорее всего, его переименуют». Это было два года назад, и когда я это услышал по ТВ, то сказал своим коллегам: вот если за анти-PD-1 когда-нибудь действительно дадут Нобелевскую премию, то, наверное, придется подавать в суд. Мол, где наша Нобелевская премия? Где справедливость? Опять обнесли?

© академик **С.А.Недоспасов**^{1,2}

¹Институт молекулярной биологии
имени В.А.Энгельгардта РАН

²Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова
e-mail: sergei.nedospasov@gmail.com

Литература / References

1. McIntyre B.W., Allison J.P. The mouse T cell receptor: structural heterogeneity of molecules of normal T cells defined by xenoantiserum. *Cell*. 1983; 34(3): 739–46.
2. Brunet J.F., Denizot F., Luciani M.F. et al. A new member of the immunoglobulin superfamily — CTLA-4. *Nature*. 1987; 328(6127): 267–270. Doi:10.1038/328267a0.
3. Leach D.R., Krummel M.F., Allison J.P. Enhancement of antitumor immunity by CTLA-4 blockade. *Science*. 1996; 271(5256): 1734–1736. Doi:10.1126/science.271.5256.1734.
4. Kwon E.D., Hurwitz A.A., Foster B.A. et al. Manipulation of T cell costimulatory and inhibitory signals for immunotherapy of prostate cancer. *PNAS*. 1997; 94(15): 8099–8103. Doi:10.1073/pnas.94.15.8099.
5. Боголюбова А.В., Ефимов Г.А., Друцкая М.С., Недоспасов С.А. Иммуноterapia опухолей, основанная на блокировке иммунологических контрольных «точек» («чекпойнтов»). *Мед. иммунол.* 2015; 17(5): 395–406. [Bogolyubova A.V., Efimov G.A., Drutskaya M.S., Nedospasov S.A. Cancer immunotherapy based on the blockade of immune checkpoints. *Med. Immunol.* 2015; 17(5): 395–406. (In Russ.)] Doi:10.15789/1563-0625-2015-5-395-406.
6. Rosenberg S.A., Lotze M.T. Cancer immunotherapy using interleukin-2 and interleukin-2-activated lymphocytes. *Annu. Rev. Immunol.* 1986; 4: 681–709. Doi:10.1146/annurev.iy.04.040186.003341.
7. Muramatsu M., Kinoshita K., Fagarasan S., Honjo T. Class switch recombination and hypermutation require activation-induced cytidine deaminase (AID), a potential RNA editing enzyme. *Cell*. 2000; 102(5): 553–563. Doi:10.1016/S0092-8674(00)00078-7.
8. Ishida Y., Agata Y., Shibahara K., Honjo T. Induced expression of PD-1, a novel member of the immunoglobulin gene superfamily, upon programmed cell death. *EMBO J.* 1992; 11(11): 3887–3895.

2018 Nobel Prize Laureates in Physiology or Medicine: James Allison and Tasuku Honjo

S.A.Nedospasov^{1,2}

¹Engelhardt Institute of Molecular Biology, RAS (Moscow, Russia)

²Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The 2018 Nobel Prize in Physiology or Medicine was awarded to James Allison and Tasuku Honjo “for their discovery of cancer therapy by inhibition of negative immune regulation”. However, this year two more immunologists — J.Smith and G.Winter — also became the Nobel Laureates. They received the Award in the “Chemistry” nomination for discovering new approaches to creating proteins with desired properties, including therapeutic antibodies.

Keywords: Nobel Prize, cancer, immunotherapy, immune checkpoints, monoclonal antibody.

Памяти В.А.Гончарова

27 ноября после тяжелой болезни скончался Вадим Александрович Гончаров — заместитель главного редактора журнала «Природа» в 1978–1981 гг. Столь недолгий срок службы в редакции был вызван публикацией рецензии Ю.М.Бородея на книгу Л.Н.Гумилева «Этногенез и биосфера Земли» (№4. 1981) — В.А.Гончаров был уволен за «идеологический промах».

Вадима Александровича привел в редакцию и назначил своим заместителем главный редактор «Природы» в 1967–1990 гг. лауреат Нобелевской премии (1964) академик Н.Г.Басов. До этого назначения они успешно сотрудничали в журнале «Квантовая электроника», и в этом сотрудничестве созрело и окрепло их взаимное доверие и глубокое взаимопонимание.

Вадим Александрович хорошо знал историю «Природы» и высоко ценил сложившиеся в журнале традиции. Он тщательно следил за тем, чтобы неукоснительно соблюдался основополагающий принцип издания: междисциплинарный популярный естественнонаучный журнал Президиума АН СССР должен был обеспечивать читателям доступное для понимания и в то же время самое авторитетное изложение специальных проблем и достижений современной науки. Физики и математики, биологи и химики, астрономы и геологи должны были лучше понимать друг друга и находить на страницах «Природы» возможности для междисциплинарных контактов, дискуссий и исследований. Журнал должен был оставаться интересным и членам Академии, и научным работникам, и профессорам, и студентам. Для этого нужно было поддерживать товарищескую и творческую атмосферу взаимодействия членов редколлегии друг с другом и с сотрудниками редакции.

Вместе с тем Гончаров был человеком увлеченным и увлекающимся. Именно он нередко становился инициатором приглашения на страницы журнала авторов, которые, имея определенные заслуги в своей области науки, пытались формулировать и спорные идеи, вызывающие неодобрительную реакцию в академической среде.

Вадим Александрович постоянно был в центре внутриредакционной жизни. Для тех, кому посчастливилось работать в те годы в здании на Маро-новском переулке, навсегда остались памятливы и периодические «летучки», и взаимные оценки свежеразосланных номеров, и непринужденные



Вадим Александрович Гончаров
18.04.1940–27.11.2018

беседы с многочисленными, нередко очень именитыми авторами, и многочасовые заседания редколлегии, и поездки с устными выпусками журнала в московские академические институты и подмосковные научные центры.

С особым вниманием Гончаров относился к кадровому составу редакции. Его особой заботой было сочетание старых, опытных сотрудников и молодых специалистов, имеющих способности к редакторской работе. Далеко не все, кто пробовал силы в редакторском искусстве, успешно проходили испытательный срок, но почти все они оставались потом в дружеских отношениях с сотрудниками «Природы».

История журнала насчитывает уже без малого 107 лет. Она помнит многих главных редакторов, многих авторов, многих сотрудников, отдававших «Природе» знания, талант, разделивших свои биографии с богатой событиями жизнью журнала, честно послуживших и российской, и мировой науке. В этом длинном ряду ученых и популяризаторов науки достойное место занимает и В.А.Гончаров.

Прощайте, Вадим Александрович!

Тематический указатель за 2018 год

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Астрофизика и звездная астрономия

Астрометрические приборы древности. Кузьмин А.В. 12 39

Лауреаты Нобелевской премии 2017 года.

По физике — Р.Вайсс, Б.Бэриш, К.Торн. Липунов В.М. 1 65

Планетные исследования

Комета Чурюмова-Герасименко:

исследования миссией «Розетта».

Базилевский А.Т., Дорофеева В.А. 10 3

Уникальные небесные тела*. Бялко А.В. 1 92

Физика

Вертикально-излучающие лазеры для оптических систем передачи данных*. Блохин С.А., Малеев Н.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Сахаров А.В., Устинов В.М. 9 100

Взаимодействие ударных волн с плазмой

газового разряда*. Басаргин И.В., Сахаров В.А. 9 97

Локализация альфвеновских колебаний

в плазме токамака ТУМАН-3М*. Абдуллина Г.И., Лебедев С.В., Аскинази Л.Г. 9 95

Механизмы генерации синглетного кислорода в водном

растворе радахлорина*. Васютинский О.С. 9 93

Р.Э.Милликен: «Моя работа была работой чистого

экспериментатора». К 150-летию со дня рождения. Щербаков Р.Н. 3 72

Ридберговские состояния экситонов

в полупроводниках*. Глазов М.М., Сёмина М.А. 9 98

Сверхбыстрая динамика электронов и дырок

в полупроводниковых нитевидных нанокристаллах*. Трухин В.Н., Мустафин И.А. 9 99

Физика конденсированного состояния

Лауреаты Нобелевской премии 2017 года. По химии — Ж.Дюбоше, Й.Франк, Р.Хендерсон. Васильев А.Л. 1 74

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Когерентное упругое рассеяние нейтрино обнаружено*. 2 87

Лазерная физика

Лауреаты Нобелевской премии 2018 года. По физике — А.Эшкин, Ж.Муру, Д.Стрикленд. Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

Хазанов Е.А. 12 69

О нас и наших онколитических бактериях.

Суворов А.Н. 8 3

Биохимия

Змеиные яды — от древности до наших дней.

Копылова Н.В., Уткин Ю.Н. 3 3

Лауреаты Нобелевской премии 2018 года.

По химии — Ф.Арнольд, Дж.Смит, Г.Уинтер.

Юдкина А.В., Жарков Д.О. 12 74

Микробы из осадка сточных вод помогут

экономить нефть*. 6 90

Патология Тау-белка — новое связующее звено

между болезнью Альцгеймера и диабетом 2-го типа*. 4 89

Физиология и биохимия растений

Новое о нитрате: сигнальная роль в растениях.

Измайлов С.Ф., Никитин А.В., Родионов В.А. 4 13

Эффект корневых выделений культурных растений

на рост сорных видов. Демина О.С., Ларикина Ю.С., Кондратьев М.Н. 1 59

Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)

Недостаток серотонина снижает привлекательность

риса для вредителей*. 6 92

Технология получения рекомбинантных ферментов:

законы жанра. 6 68

Интервью с А.П.Синицыным¹

Молекулярная генетика

Белковая ловушка: как зеленые химеры «ловят» гены.

Хрущева А.С., Дорогова Н.В., Фёдорова С.А. 8 10

Общая биология

Обитатели Южного берега Крыма.

К 45-летию природного заповедника «Мыс Мартьян».

Плутарь Ю.В., Багрикова Н.А., Костин С.Ю., Крайнюк Е.С., Саркина И.С. 8 70

Ботаника

Взаимодействие растений с окружающим миром*

Лютики, цветущие в морозы. 4 90

Андриянова Е.А., Мочалова О.А. 4 24

Новый виток дискуссии о строении

древнейшего цветка*. 3 84

Эволюционная морфология цветка и проблема

больших данных. Интервью с Д.Д.Соколовым¹ 5 3

Вирусология

Новые подходы к созданию иммуногена

для ВИЧ-вакцины. Взоров А.Н. 11 3

Устойчивость ВИЧ и его взаимоотношения

с иммунной системой. Взоров А.Н. 10 18

Микробиология

О нас и наших онколитических бактериях.

Суворов А.Н. 8 3

Секреты географии микробных сообществ Земли.

Якушев А.В. 12 21

Зоология

Белуха — «морская канарейка». Панова Е.М., Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Агафонов А.В. 10 38

Знаком * отмечены материалы, опубликованные в разделе «Новости науки».

¹ Интервью подготовила Е.В.Сидорова.

Горячие ванны помогают бороться со стрессом не только людям, но и макакам*	5	83	Животные переходят на ночной образ жизни, чтобы не встречаться с человеком*	8	94
Изучение афалин в природе: история с продолжением.			Искусственный свет мешает опылителям*	1	93
Агафонов А.В., Логомина И.В.	7	20	Москва-река сегодня и завтра. Щеголькова Н.М., Козлова М.А., Емельянов А.В., Шмонин К.Н.	10	28
Как общаются афалины? Агафонов А.В., Панова Е.М.	4	3	Обитатели Южного берега Крыма. К 45-летию природного заповедника «Мыс Мартыан». Плутатарь Ю.В., Багрикова Н.А., Костин С.Ю., Крайнюк Е.С., Саркина И.С.	8	70
Монгольские заметки, или В стране древней животноводческой культуры. Столповский Ю.А., Якель Ю.Я.	12	26	Редкость не всегда приводит к вымиранию*	2	90
Мышление птиц: понимают ли попугаи, о чем они говорят? Зорина З.А., Смирнова А.А.	10	58	Степи, естественные и измененные человеком: принципиальное сходство, о котором нельзя забывать. Абатуров Б.Д., Елизаров А.В.	11	12
НОВАЯ ГИПОТЕЗА ДОМЕСТИКАЦИИ ЛОШАДИ: ПРОТИВОРЕЧИЯ И ПРОБЕЛЫ	7	3	Тигры на Хехцире: условия и перспективы существования. Ткаченко К.Н.	11	60
Происхождение лошади Пржевальского: молекулярно-генетические данные. Абрамсон Н.И.	7	5	У кочевых копытных больше паразитов*	6	93
Лошадь Пржевальского: дикий вид или одичавшая домашняя лошадь? Косинцев П.А., Пластеева Н.А.	7	9	Эрозия горных пород увеличивает содержание углекислого газа в атмосфере*	5	86
Лошадь Пржевальского и ботайские лошади. Спасская Н.Н.	7	13	Физиология		
Ботайская культура позднего энеолита: pro et contra существования домашних лошадей. Кузнецов П.Ф.	7	16	Необычный диплом И.П.Павлова и фотоальбом его четвероногих «друзей». Басаргина Е.Ю., Громова Л.И.	2	78
Новые перспективы «лисей модели» в изучении генетики поведения. Интервью с А.В.Кукековой ¹	12	3	Антропология		
Революционеры в систематике пауков: В.А.Вагнер и П.Т.Лехтинен. Михайлов К.Г.	2	37	Завещание Н.Н.Миклухо-Маклая исполнено. Васильев С.В., Веселовская Е.В., Григорьева О.М., Пестряков А.П., Хартанович М.В.	8	40
Собственный черный лебедь Новой Зеландии — Поува*	1	94	Иммунология		
Тигры на Хехцире: условия и перспективы существования. Ткаченко К.Н.	11	60	Лауреаты Нобелевской премии 2018 года. По физиологии или медицине — Т.Хондзэ, Дж.Эллисон. Недоспасов С.А.	12	82
Ястребинная сова — северный кочевник. Кречмар А.В.	7	64	Лауреаты Нобелевской премии 2018 года. По химии — Ф.Арнольд, Дж.Смит, Г.Уинтер. Юдкина А.В., Жарков Д.О.	12	74
Ящерица Щербака — вымирающий эндемик России. Доронин И.В., Туниев Б.С.	11	37	Новые подходы к созданию иммуногена для ВИЧ-вакцины. Взоров А.Н.	11	3
Энтомология			Устойчивость ВИЧ и его взаимоотношения с иммунной системой. Взоров А.Н.	10	18
«Результат химической борьбы блестящий, посевы защищаются, настроение бодрое»: Борис Уваров и борьба с саранчой на Ставрополье в 1911–1914 годах. Федотова А.А., Куприянов А.В.	1	42	Клеточная биология, цитология, гистология		
Генетика			Впервые <i>in vitro</i> выращены зрелые человеческие яйцеклетки*	3	83
Взаимодействие растений с окружающим миром*	4	90	ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ		
Длинные некодирующие РНК SFфазы клеточного цикла — новая терапевтическая мишень в онкологии*	6	90	Роботы, мехатроника и робототехнические системы Криобот для исследования ледяных щитов планет. Зеленчук А.В., Крыленков В.А.	3	12
Монгольские заметки, или В стране древней животноводческой культуры. Столповский Ю.А., Якель Ю.Я.	12	26	Водные пути сообщения и гидрография		
Новые перспективы «лисей модели» в изучении генетики поведения. Интервью с А.В.Кукековой ¹	12	3	Нужны ли тихому Дону новые плотины? Матишов Г.Г.	1	25
Происхождение лошади Пржевальского: молекулярно-генетические данные. Абрамсон Н.И.	7	5	ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ		
Родословная лошади Пржевальского пересмотрена? Сидорова Е.В.	5	84	Археология		
Экология			Ботайская культура позднего энеолита: pro et contra существования домашних лошадей. Кузнецов П.Ф.	7	16
А.П.Павлов о национальных парках: воспоминания и размышления. Стародубцева И.А., Сорока И.Л.	8	82	Дома и улицы древнего Изборска. Лопатин Н.В.	10	80
Броненосцы Бразилии могут заразить лепрой*	8	92	Качи-Кальон. Комаров В.Н., Зарубин З.М.Ф., Бабицкий Е.Ф.	2	70
Влияние птиц на среду обитания. Кулаков Д.В., Крылов А.В.	5	22	Культуры <i>Ното</i> : узловые сюжеты миллионлетней истории. В ледовых тисках плейстоцена. Черных Е.Н.	4	47
			Культуры <i>Ното</i> : узловые сюжеты миллионлетней истории. Голоцен: фейерверк культур и их парадоксы. Черных Е.Н.	5	43

¹ Интервью подготовила Е.В.Сидорова.

Культуры <i>Ното</i> : узловые сюжеты миллионлетней истории. От архантропа до человека разумного. Черных Е.Н.	3	37	По химии — Ф.Арнольд, Дж.Смит, Г.Уинтер. Юдкина А.В., Жарков Д.О.	12	74
Культуры <i>Ното</i> : узловые сюжеты миллионлетней истории. Эпоха железа и полигон Степного пояса. Черных Е.Н.	6	54	По физиологии или медицине — Т.Хондзё, Дж.Эллисон. Недоспасов С.А.	12	82
Культуры <i>Ното</i> : узловые сюжеты миллионлетней истории. Эпоха Нового времени: планетарные метаморфозы. Черных Е.Н.	7	36	«Любопытное время переживаем...»: Германия и Франция в научной биографии В.И.Вернадского. Сорокина М.Ю.	3	53
Неизвестное сильное землетрясение в Иссык-Кульской котловине. Корженков А.М., Абдиева С.В., Рогожин Е.А., Сорокин А.А.	3	24	Н.И.Вавилов и Т.Д.Лысенко в пространстве историко-научных дискуссий. Колчинский Э.И.	1	3
Родословная лошади Пржевальского пересмотрена? Сидорова Е.В.	5	84	Необычный диплом И.П.Павлова и фотоальбом его четвероногих «друзей». Басаргина Е.Ю., Громова Л.И.	2	78
История науки и техники			«Павловиана»: редкие изобразительные материалы из фондов Санкт-Петербургского филиала Архива РАН. Басаргина Е.Ю., Груздева Е.Н., Крапошина Н.В., Шишкина К.Г.	6	75
А.П.Павлов о национальных парках: воспоминания и размышления. Стародубцева И.А., Сорока И.Л.	8	82	Почетный член академии герцог Максимилиан Лейхтенбергский. Груздева Е.Н.	10	85
«Артистическая бронза» герцога Лейхтенбергского. Груздева Е.Н.	11	76	Р.Э.Милликен: «Моя работа была работой чистого экспериментатора». К 150-летию со дня рождения. Щербаков Р.Н.	3	72
Астрометрические приборы древности. Кузьмин А.В.	12	39	Революционеры в систематике пауков: В.А.Вагнер и П.Т.Лехтинен. Михайлов К.Г.	2	37
Завещание Н.Н.Миклухо-Маклая исполнено. Васильев С.В., Веселовская Е.В., Григорьева О.М., Пестряков А.П., Хартанович М.В.	8	40	«Результат химической борьбы блестящий, посевы защищаются, настроение бодрое»: Борис Уваров и борьба с саранчой на Ставрополье в 1911–1914 годах. Федотова А.А., Куприянов А.В.	1	42
История становления геохимии. Наумов Г.Б., Вишневская Н.А.	4	78	Роль визуальных наблюдений в глубоководных исследованиях океана. Сагалевиц А.М.	8	58
Квадрат Патона. К 100-летию со дня рождения академика Б.Е.Патона. Батурич Ю.М.	11	85	Джон Уилер: смелый консерватизм в науке. Щербаков Р.Н.	12	58
КОЛЫБЕЛЬ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ФИЗИКИ. 100 лет Физико-техническому институту имени А.Ф.Иоффе РАН	9	3	Экспедиция за мамонтом на остров Врангеля: правда и вымысел. Урмина И.А.	7	72
Легендарный Физтех: 100 лет служения науке и отечеству. Забродский А.Г.	9	4	Ящерица Щербака — вымирающий эндемик России. Доронин И.В., Туниев Б.С.	11	37
Физтех — Международному термоядерному реактору. Петров М.П., Афанасьев В.И., Мухин Е.Е., Шевелёв А.Е.	9	12	МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ		
Спины в полупроводниковых нанокристаллах. Родина А.В., Яковлев Д.Р.	9	22	Броненосцы Бразилии могут заразить лепрой*	8	92
Технические инновации и газодинамические исследования. Дьяков Б.Б., Кузнецов В.И., Поняев С.А.	9	32	Создан новый онлайн-ресурс для обмена данными о пациентах*	8	92
О теоретиках и теориях. Амусья М.Я.	9	41	Онкология		
Абрам Федорович Иоффе — первый директор Физтеха. Витман Р.Ф., Куницына Е.В.	9	50	Длинные не кодирующие РНК SFфазы клеточного цикла — новая терапевтическая мишень в онкологии*	6	90
Курчатов и Физтех. Забродский А.Г.	9	60	Лауреаты Нобелевской премии 2018 года. По физиологии или медицине — Т.Хондзё, Дж.Эллисон. Недоспасов С.А.	12	82
Два портрета: А.А.Чернышёв и П.П.Кобеко. Витман Р.Ф., Куницына Е.В.	9	72	НА ПЕРЕДОВОЙ БОРЬБЫ С РАКОМ		
Хронология века Физтеха в документах из Архива ФТИ имени А.Ф.Иоффе. Начало. Дьяков Б.Б., Савельева Д.Н.	9	84	К 90-летию НМИЦ онкологии имени Н.Н.Петрова	6	3
Столетие советской физики. Бялко А.В.	9	103	Мы создаем современную медицину. Беляев А.М., Щербаков А.М., Демин Е.В., Столярова И.М.	6	4
ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2017 ГОДА			Противоопухолевые вакцины на основе дендритных клеток. Балдуева И.А., Нехаева Т.Л., Новик А.В., Данилова А.Б., Пипина Н.П., Щербаков А.М., Беляев А.М.	6	14
По физике — Р.Вайсс, Б.Бэрриш, К.Торн. Липунов В.М.	1	65	Свет, старение и рак. Анисимов В.Н.	6	19
По химии — Ж.Дюбоше, Й.Франк, Р.Хендерсон. Васильев А.Л.	1	74	Ожирение и рак: о чем «говорят» экзосомы? Берштейн Л.М., Малек А.В.	6	22
По физиологии или медицине — Дж.Холл, М.Росбаш, М.Янг. Путилов А.А.	1	81	Меланома кожи: новое в лекарственном лечении. Проценко С.А.	6	26
ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2018 ГОДА					
По физике — А.Эшкин, Ж.Муру, Д.Стрикланд. Хазанов Е.А.	12	69			

Биопсия сигнальных лимфатических узлов при раке молочной железы. Криворотько П.В., Табагуа Т.Т., Дашян Г.А., Жильцова Е.К., Емельянов А.С., Семиглазов В.Ф.	6	29	Первая находка углеродных нанотрубок в природе. Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н., Павликов А.В., Шаталова Т.Б.	5	12
Морфологическая диагностика опухолей: сдвиг в сторону молекулярно-генетического анализа. Иванцов А.О., Клещев М.А., Кулигина Е.Ш.	6	32	Секреты большого семейства шликерит-родезит-гюнтерблассит. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М.	1	15
Нутритивная недостаточность у онкологических больных. Жабина А.С., Телстаева Г.М., Семиглазова Т.Ю.	6	36	Ярмарка тщеславия. Минералогическая сказка. Расцветаева Р.К.	4	63
Психологическая реабилитация онкологических пациентов. Чулкова В.А. Семиглазова Т.Ю., Пестерева Е.В., Ключев В.А.	6	39	Литология		
Кардиология			Образцы продолжают рассказывать. Кузнецов В.Г.	5	68
Рефралон: новые возможности антиаритмического препарата III класса*	2	89	Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение		
			Российские мерзловеды на «крыше мира». Галанин А.А.	11	20
			Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых		
			Анатомия древних растений в ископаемых углях. Кизильштейн Л.Я.	3	69
			Бериллий в ископаемых углях: геохимия, ресурсы, экология. Кизильштейн Л.Я.	8	67
			Бурпала — минералогический заповедник? Портнов А.М.	5	73
			Геологи обнаружили новые доказательства кислородной катастрофы*. Медведев П.В., Ромашкин А.Е., Рычанчик Д.В.	6	88
			История становления геохимии. Наумов Г.Б., Вишневская Н.А.	4	78
			Сантиметры истории, или Как тяжелые металлы маркируют события промышленного века в отдельно взятом водоеме. Слуковский З.И.	7	29
			Трудный путь от суши к морю. Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Дара О.М., Лисицын А.П.	6	42
			Уникальная рудно-изотопная аномалия России. Портнов А.М.	2	3
			Что происходит с Волгой? Немировская И.А.	2	45
			Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр		
			Ашхабадская катастрофа 1948 года. Помнить уроки. Никонов А.А.	11	52
			Неизвестное сильное землетрясение в Иссык-Кульской котловине. Корженков А.М., Абдиева С.В., Рогожин Е.А., Сорокин А.А.	3	24
			Сейсмическая угроза мегаполису Стамбулу: возможны варианты. Никонов А.А.	10	46
			Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов		
			Банка Дриженко в озере Байкал. Тахтеев В.В.	5	62
			Береза в ольхонской степи. Касьянова Л.Н., Мазукабзов А.М.	12	50
			Большое путешествие маленькой улитки. Винарский М.В.	2	10
			Черное море: взлеты и падения отечественного рыболовства. Фащук Д.Я.	8	24
				10	65
			Ширванская плотва — закавказский реликт? Артаев О.Н., Лёвин Б.А., Мустафаев Н.Дж., Симонов Е.П.	5	57
			Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география		
			Пляжи Западной Сибири. Андреева И.В.	2	54

Геоморфология и эволюционная география

Российские мерзлотоведы на «крыше мира».

Галанин А.А. 11 20

Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Москва-река сегодня и завтра. **Щеголькова Н.М.,**

Козлова М.А., Емельянов А.В., Шмонин К.Н. 10 28

Океанология

К Северному полюсу на атомном ледоколе

«50 лет Победы». **Матишов Г.Г.** 11 70

Распределение склерактиниевых кораллов в высоких широтах. **Келлер Н.Б., Оськина Н.С.,**

Савилова Т.А. 2 64

Роль визуальных наблюдений в глубоководных исследованиях океана. **Сагалевиц А.М.**

Роль ученых в подготовке договора о защите 8 58

открытого океана* 3 85

Черное море: взлеты и падения

отечественного рыболовства. **Фащук Д.Я.** 8 24

10 65

Физика атмосферы и гидросферы

206-суточный лунный цикл в аномалиях погоды.

Сидоренков Н.С., Чазов В.В., Зотов Л.В.,

Вильсон И. 4 19

Метеорология, климатология, агрометеорология

Биткойн и климат*. **Бялко А.В.** 2 88

Мировое народонаселение и вариации климата.

Бялко А.В. 7 51

Угроза гипоксии Мирового океана*. **Бялко А.В.**

Химия атмосферных осадков: 3 83

60 лет регулярных наблюдений. **Свистов П.Ф.,**

Семенец Е.С., Павлова М.Т. 8 51

Геоэкология

Самая актуальная проблема человечества?

Родкин М.В. 2 29

Сантиметры истории, или Как тяжелые металлы маркируют события промышленного века в отдельно взятом водоеме. **Слуковский З.И.**

Создание геопарка «Иландаг» в Нахчыванской 7 29

Автономной Республике (Азербайджан).

Кенгерли Т.Н., Ибрагимов В.Б., Рашидов Т.М.,

Кенгерли И.Т. 11 44

Создание геопарка ЮНЕСКО в Башкирии.

Исмагилов Р.А., Фархутдинов И.М.,

Фархутдинов А.М. 1 35

Что происходит с Волгой? **Немировская И.А.** 2 45

АПРЕЛЬСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

Наука: что это? Вполне серьезная шутка о сути науки.

Мирлин Е.Г. 4 74

Ярмарка тщеславия. Минералогическая сказка.

Расцветаева Р.К. 4 63

ВЕСТИ ИЗ ЭКСПЕДИЦИЙ

Банка Дриженко в озере Байкал. **Тахтеев В.В.**

К Северному полюсу на атомном ледоколе 5 62

«50 лет Победы». **Матишов Г.Г.**

Что происходит с Волгой? **Немировская И.А.** 11 70

Ширванская плотва — закавказский реликт?

Артаев О.Н., Лёвин Б.А., Мустафаев Н.Дж.,

Симонов Е.П. 2 45

5 57

В КОНЦЕ НОМЕРА

Озеро Толмачёва (Камчатка). **Быкасов В.Е.** 3 90

ВРЕМЕНА И ЛЮДИ

А.П.Павлов о национальных парках: воспоминания

и размышления. **Стародубцева И.А., Сорока И.Л.** 8 82

«Артистическая бронза» герцога Лейхтенбергского.

Груздева Е.Н. 11 76

Бурпала — минералогический заповедник?

Портнов А.М. 5 73

История становления геохимии. **Наумов Г.Б.,**

Вишневская Н.А. 4 78

Квадрат Патона. К 100-летию со дня рождения

академика Б.Е.Патона. **Батурин Ю.М.** 11 85

Павел Флоренский — священник, мыслитель, ученый.

Как были сохранены сокровища

Троице-Сергиевой лавры. **Флоренский П.В.** 7 80

«Павловиана»: редкие изобразительные материалы

из фондов Санкт-Петербургского филиала Архива РАН.

Басаргина Е.Ю., Груздева Е.Н., Крапошина Н.В.,

Шишкина К.Г. 6 75

Почетный член академии герцог

Максимилиан Лейхтенбергский. **Груздева Е.Н.** 10 85

Р.Э.Милликен: «Моя работа была работой чистого

экспериментатора». К 150-летию со дня рождения.

Щербаков Р.Н. 3 72

Джон Уилер: смелый консерватизм в науке.

Щербаков Р.Н. 12 58

ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

Береза в ольхонской степи. **Касьянова Л.Н.,**

Мазукабзов А.М. 12 50

Взгляд в мезозойскую эру: тайны «берега динозавров».

Наугольных С.В. 7 58

Качи-Кальон. **Комаров В.Н., Зарубин З.М.Ф.,**

Бабицкий Е.Ф. 2 70

Образцы продолжают рассказывать. **Кузнецов В.Г.**

Ястребиная сова — северный кочевник. **Кречмар А.В.** 5 68

7 64

ЛЕКТОРИЙ

Палеонтологические объекты на станциях

Московского метро. **Наугольных С.В.** 1 52

НАУКА И ОБЩЕСТВО

Н.И.Вавилов и Т.Д.Лысенко в пространстве

историко-научных дискуссий. **Колчинский Э.И.** 1 3

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Анатомия древних растений в ископаемых углях.

Кизильштейн Л.Я. 3 69

Беззубый предок усатых китов. **Я.А.Попов**

Бериллий в ископаемых углях: геохимия, 12 48

ресурсы, экология. **Кизильштейн Л.Я.**

НА ПЕРЕДОВОЙ БОРЬБЫ С РАКОМ 8 67

К 90-летию НМИЦ онкологии имени Н.Н.Петрова

Противоопухолевые вакцины на основе

дендритных клеток. **Балдуева И.А., Нехаева Т.Л.,**

Новик А.В., Данилова А.Б., Пипиа Н.П.,

Щербаков А.М., Беляев А.М. 6 14

Свет, старение и рак. **Анисимов В.Н.** 6 19

Ожирение и рак: о чем «говорят» экзосомы? Берштейн Л.М., Малек А.В.	6	22	Тигры на Хехцире: условия и перспективы существования. Ткаченко К.Н.	11	60
Меланома кожи: новое в лекарственном лечении. Проценко С.А.	6	26	Эффект корневых выделений культурных растений на рост сорных видов. Демина О.С., Ларикова Ю.С., Кондратьев М.Н.	1	59
Биопсия сигнальных лимфатических узлов при раке молочной железы. Криворотько П.В., Табагуа Т.Т., Дашян Г.А., Жильцова Е.К., Емельянов А.С., Семиглазов В.Ф.	6	29	НЕКРОЛОГ		
Морфологическая диагностика опухолей: сдвиг в сторону молекулярно-генетического анализа. Иванцов А.О., Клещев М.А., Кулигина Е.Ш.	6	32	Памяти В.А.Гончарова	12	87
Нутритивная недостаточность у онкологических больных. Жабина А.С., Телетаева Г.М., Семиглазова Т.Ю.	6	36	Памяти Мишеля Жуве. Ковальзон В.М.	1	89
Психологическая реабилитация онкологических пациентов. Чулкова В.А. Семиглазова Т.Ю., Пестерева Е.В., Ключев В.А.	6	39	НОВЫЕ КНИГИ		
Новое подтверждение дальних миграций растений в позднем палеозое. Наугольных С.В.	4	76	1 95, 2 92, 3 89, 4 95, 5 87, 6 94, 7 93, 9 102, 10 93, 11 95		
Обитатели Южного берега Крыма. К 45-летию природного заповедника «Мыс Мартыан».			ОБЪЯВЛЕНИЯ		
Плутатарь Ю.В., Багрикова Н.А., Костин С.Ю., Крайнюк Е.С., Саркина И.С.	8	70		7 95, 8 95, 10 95	
Пляжи Западной Сибири. Андреева И.В.	2	54	РЕДАКЦИОННАЯ ПОЧТА		
Распределение склерактиниевых кораллов в высоких широтах. Келлер Н.Б., Оськина Н.С., Савилова Т.А.	2	64	На пути к катастрофе. Даневич А.А.	5	95
			РЕЦЕНЗИИ		
			Всё о сороке (на кн.: В.А.Пономарев и др. Сорока (<i>Pica pica</i> L.) в естественных и антропогенных ландшафтах Палеарктики). Бёме И.Р.	7	92
			Книга о великом ученом и научном подвиге всей его жизни (на кн.: С.Е.Резник Эта короткая жизнь. Николай Вавилов и его время). Колчинский Э.И.	5	88

Авторский указатель за 2018 год

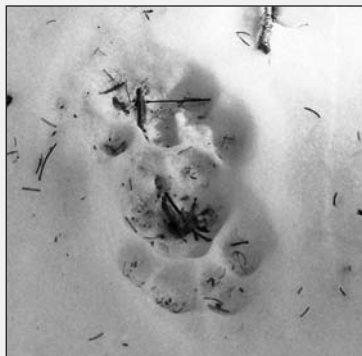
А батуров Б.Д. (Елизаров А.В.)*	11	12	Аскинази Л.Г. (Абдуллина Г.И., Лебедев С.В.)	9	95	Данилова А.Б., Пипиа Н.П., Щербаков А.М.)	6	14
Абдиева С.В. (Корженков А.М., Рогожин Е.А., Сорокин А.А.)	3	24	Афанасьев В.И. (Петров М.П., Мухин Е.Е., Шевелёв А.Е.)	9	12	Беляев А.М. (Щербаков А.М., Демин Е.В., Столярова И.М.)	6	4
Абдуллина Г.И. (Лебедев С.В., Аскинази Л.Г.)	9	95	Ба бицкий Е.Ф. (Комаров В.Н. Зарубин З.М.Ф.)	2	70	Берштейн Л.М. (Малек А.В.)	6	22
Абрамсон Н.И.	7	5	Багрикова Н.А. (Плутатарь Ю.В., Костин С.Ю., Крайнюк Е.С., Саркина И.С.)	8	70	Бёме И.Р.	7	92
Аверьянов А.О. (Лопатин А.В.)	4	34	Базилевский А.Т. (Дорофеева В.А.)	10	3	Блохин С.А. (Малеев Н.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Сахаров А.В., Устинов В.М.)	9	100
Агафонов А.В. (Логоминова И.В.)	7	20	Балдуева И.А. (Нехаева Т.Л., Новик А.В., Данилова А.Б., Пипиа Н.П., Щербаков А.М.)	6	14	Бобров М.А. (Блохин С.А., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Сахаров А.В., Устинов В.М.)	9	100
Агафонов А.В. (Панова Е.М.)	4	3	Беляев А.М.)	9	97	Быкасов В.Е.	3	90
Аксенов С.М. (Расцветаева Р.К.)	1	15	Басаргин И.В. (Сахаров В.А.)	2	78	Бялко А.В.	1	92
	8	18	Басаргина Е.Ю. (Громова Л.И.)	6	14		2	88
	12	12	Басаргина Е.Ю. (Груздева Е.Н., Крапошина Н.В., Шишкина К.Г.)	6	75	В асильев А.Л.	1	74
Амусья М.Я.	9	41	Батурин Ю.М.	11	85	Васильев С.В. (Веселовская Е.В., Григорьева О.М., Пестряков А.П., Хартанович М.В.)	8	40
Андреева И.В.	2	54	Беляев А.М. (Балдуева И.А., Нехаева Т.Л., Новик А.В.,			Васютинский О.С.	9	93
Андриянова Е.А. (Мочалова О.А.)	4	24						
Анисимов В.Н.	6	19						
Артаев О.Н. (Лёвин Б.А., Мустафаев Н.Дж., Симонов Е.П.)	5	57						
Архангельский М.С. (Зверьков Н.Г.)	2	91						

* Здесь и далее в скобках указаны соавторы.

Веселовская Е.В. (Васильев С.В., Григорьева О.М., Пестряков А.П., Хартанович М.В.)	8	40	Забродский А.Г.	9	4	Крылов А.В. (Кулаков Д.В.)	5	22
Взоров А.Н.	10	18	Зарубин З.М.Ф. (Комаров В.Н., Бабицкий Е.Ф.)	9	60	Кузнецов В.Г.	5	68
Вильсон И. (Сидоренков Н.С., Чазов В.В., Зотов Л.В.)	11	3	Зверьков Н.Г. (Архангельский М.С.)	2	70	Кузнецов В.И. (Дьяков Б.Б., Поняев С.А.)	9	32
Винарский М.В.	4	19	Зеленчук А.В. (Крыленков В.А.)	2	91	Кузнецов П.Ф.	7	16
Витман Р.Ф. (Куницына Е.В.)	2	10	Зорина З.А. (Смирнова А.А.)	3	12	Кузьменков А.Г. (Блохин С.А., Малеев Н.А., Бобров М.А., Сахаров А.В., Устинов В.М.)	9	100
	9	50	Зотов Л.В. (Сидоренков Н.С., Чазов В.В., Вильсон И.)	10	58	Кузьмин А.В.	12	39
	9	72		4	19	Кукеева А.В.	12	3
Вишневская Н.А. (Наумов Г.Б.)	4	78	Ибрагимов В.Б. (Кенгерли Т.Н., Рашидов Т.М., Кенгерли И.Т.)	11	44	Кулаков Д.В. (Крылов А.В.)	5	22
Галанин А.А.	11	20	Иванцов А.О. (Клещёв М.А., Кулигина Е.Ш.)	6	32	Кулигина Е.Ш. (Иванцов А.О., Клещёв М.А.)	6	32
Гвозденко Т.А. (Герасимова Е.И.)	4	41	Измайлов С.Ф. (Никитин А.В., Родионов В.А.)	4	13	Куницына Е.В. (Витман Р.Ф.)	9	50
Герасимова Е.И. (Гвозденко Т.А.)	4	41	Исмагилов Р.А. (Фархутдинов И.М., Фархутдинов А.М.)	1	35	Куприянов А.В. (Федотова А.А.)	9	72
Глазов М.М. (Сёмина М.А.)	9	98		1	35		1	42
Григорьева О.М. (Васильев С.В., Веселовская Е.В., Пестряков А.П., Хартанович М.В.)	8	40	Касьянова Л.Н. (Мазукабзов А.М.)	12	50	Ларикина Ю.С. (Демин О.С., Кондратьев М.Н.)	1	59
Громова Л.И. (Басаргина Е.Ю.)	2	78	Келлер Н.Б. (Оськина Н.С., Савилова Т.А.)	12	50	Лебедев С.В. (Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г.)	1	59
Груздева Е.Н.	10	85	Кенгерли И.Т. (Кенгерли Т.Н., Ибрагимов В.Б., Рашидов Т.М.)	2	64	Леин А.Ю. (Кравчишина М.Д., Дара О.М., Лисицын А.П.)	9	95
	11	76	Кенгерли Т.Н. (Ибрагимов В.Б., Рашидов Т.М., Кенгерли И.Т.)	11	44	Лёвин Б.А. (Артаев О.Н., Мустафаев Н.Дж., Симонов Е.П.)	6	42
Груздева Е.Н. (Басаргина Е.Ю., Крапошина Н.В., Шишкина К.Г.)	6	75	Кизильштейн Л.Я.	11	44	Мустафаев Н.Дж. (Симонов Е.П.)	5	57
Даневич А.А.	5	95	Клещёв М.А. (Иванцов А.О., Кулигина Е.Ш.)	3	69	Липунов В.М.	1	65
Данилова А.Б. (Балдуева И.А., Нехаева Т.Л., Новик А.В., Пипиа Н.П., Щербаков А.М., Беляев А.М.)	6	14	Клюге В.А. (Чулкова В.А., Семиглазова Т.Ю., Пестерева Е.В.)	8	67	Лисицын А.П. (Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Дара О.М.)	6	42
Дара О.М. (Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Лисицын А.П.)	6	42	Ковальзон В.М.	6	32	Логоминова И.В. (Агафонов А.В.)	7	20
Дашян Г.А. (Криворотко П.В., Табагуа Т.Т., Жильцова Е.К., Емельянов А.С., Семиглазов В.Ф.)	6	29	Козлова М.А. (Щеголькова Н.М., Емельянов А.В., Шмонин К.Н.)	1	89	Лопатин А.В.	4	91
Демин Е.В. (Беляев А.М., Щербаков А.М., Столярова И.М.)	6	4	Колчинский Э.И.	6	39		5	32
Демин О.С. (Ларикина Ю.С., Кондратьев М.Н.)	6	4		1	89	Лопатин А.В. (Аверьянов А.О.)	4	34
Дорогова Н.В. (Хрущева А.С., Фёдорова С.А.)	1	59	Комаров В.Н. (Зарубин З.М.Ф., Бабицкий Е.Ф.)	1	89	Лопатин Н.В.	10	80
Дорогина И.В. (Туниев Б.С.)	8	10	Кондратьев М.Н. (Демин О.С., Ларикина Ю.С.)	6	39	Мазукабзов А.М. (Касьянова Л.Н.)	12	50
Дорофеева В.А. (Базилевский А.Т.)	11	37	Копылова Н.В. (Уткин Ю.Н.)	12	50	Малеев Н.А. (Блохин С.А., Бобров М.А., Кузьменков А.Г., Сахаров А.В., Устинов В.М.)	9	100
Дьяков Б.Б. (Кузнецов В.И., Поняев С.А.)	10	3	Корженков А.М. (Абдиева С.В., Рогожин Е.А., Сорокин А.А.)	2	70	Малек А.В. (Берштейн Л.М.)	6	22
Дьяков Б.Б. (Савельева Д.Н.)	9	32	Косинцев П.А. (Пластеева Н.А.)	1	59	Матвиенко Е.Н. (Поваренных М.Ю., Павликов А.В., Шаталова Т.Б.)	5	12
	9	84	Костин С.Ю. (Плугатарь Ю.В., Багрикова Н.А., Крайнюк Е.С., Саркина И.С.)	3	3	Матишов Г.Г.	1	25
Елизаров А.В. (Абатуров Б.Д.)	11	12	Кравчишина М.Д. (Леин А.Ю., Дара О.М., Лисицын А.П.)	3	24		11	70
Емельянов А.В. (Щеголькова Н.М., Козлова М.А., Шмонин К.Н.)	10	28	Крайнюк Е.С. (Плугатарь Ю.В., Багрикова Н.А., Костин С.Ю., Саркина И.С.)	7	9	Медведев П.В. (Ромашкин А.Е., Рычанчик Д.В.)	6	88
Емельянов А.С. (Криворотко П.В., Табагуа Т.Т., Дашян Г.А., Жильцова Е.К., Емельянов А.С.)	6	29	Крапошина Н.В. (Басаргина Е.Ю., Груздева Е.Н., Шишкина К.Г.)	8	70	Мирлин Е.Г.	4	74
Жабина А.С. (Телетаева Г.М., Семиглазова Т.Ю.)	6	36	Кречмар А.В.	2	20	Мироненко А.А.	2	20
Жарков Д.О. (Юдкина А.В.)	12	74	Криворотко П.В. (Табагуа Т.Т., Дашян Г.А., Жильцова Е.К., Емельянов А.С., Семиглазов В.Ф.)	7	64	Михайлов К.Г.	2	37
Жильцова Е.К. (Криворотко П.В., Табагуа Т.Т., Дашян Г.А., Емельянов А.С., Семиглазов В.Ф.)	6	29	Крыленков В.А. (Зеленчук А.В.)	8	70	Мочалова О.А. (Андреева Е.А.)	4	24
	6	29		6	29	Мустафаев Н.Дж. (Артаев О.Н., Лёвин Б.А., Симонов Е.П.)	5	57
	6	29		3	12	Мустафин И.А. (Трухин В.Н.)	9	99
	6	29		3	12	Мухин Е.Е. (Петров М.П., Афанасьев В.И., Шевелёв А.Е.)	9	12
	6	29		3	12	Наугольных С.В.	1	52
	6	29		3	12		3	87
	6	29		3	12		4	76
	6	29		3	12		7	58
	6	29		3	12	Наумов Г.Б. (Вишневская Н.А.)	4	78

95

В статье К.Н.Ткаченко «Тигры на Хехцире: условия и перспективы существования» (№11. С.60–69) допущены ошибки по вине редакции. На с. 61 и 62 опубликованы искаженные варианты фотографий. Приводим правильные иллюстрации:



Отпечаток еще не трехпалой правой задней лапы тигрицы.



Следы левых задней (вверху) и передней лап Трехпалой.

На с.61 изменен смысл предложения: впервые отсутствие левого крайнего (внутреннего) пальца на следах правой задней лапы тигрицы автор отметил в январе 1994 г., и именно он с тех пор стал называть ее Трехпалой.

Редакция приносит искренние извинения автору статьи.

ПРИРОДА

12+

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о СМИ ПИ №1202 от 13.12.1990

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

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Перевод содержания:
Т.А.КУЗНЕЦОВА

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

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

Подписано к печати 17.12.2018 г.
Формат 60×88¹/₈. Усл. печ. л. 12,0
Тираж 290 экз., включая 24 экз. бесплатно
Заказ 30/12а
Цена свободная

Учредитель: Российская академия наук
Издатель: Российская академия наук
Исполнитель по контракту №4У-ЭА-014-18 ООО «Интеграция: Образование и Наука»
117418, Нахимовский проспект, 47
Отпечатано в ООО «Институт информационных технологий»

<https://ras.jes.su/priroda>

<https://www.ras.ru/publishing/nature.aspx>

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



В 1919 г. декретом Совнаркома в Петрограде была учреждена Российская академия истории материальной культуры. В 1937 г. она вошла в состав Академии наук СССР как Институт истории материальной культуры. В 1943 г. его дирекцию перевели в Москву, а в 1957 г. он получил новое название — Институт археологии АН СССР. Сегодня более 200 научных сотрудников института ведут исследования в широком проблемно-хронологическом диапазоне с полным охватом древних культур и средневековых обществ на территории Европейской России, серия научных проектов направлена на изучение памятников Центральной Азии, Ближнего Востока и восточных регионов нашей страны. Результаты некоторых полевых изысканий последнего десятилетия (раскопки стоянок олдуванского времени в Дагестане, курганов сарматских вождей на Южном Урале, массовых захоронений 1238 г. на Стрелке Ярославля) — настоящие археологические открытия. 100-летию института посвящен следующий номер журнала.

