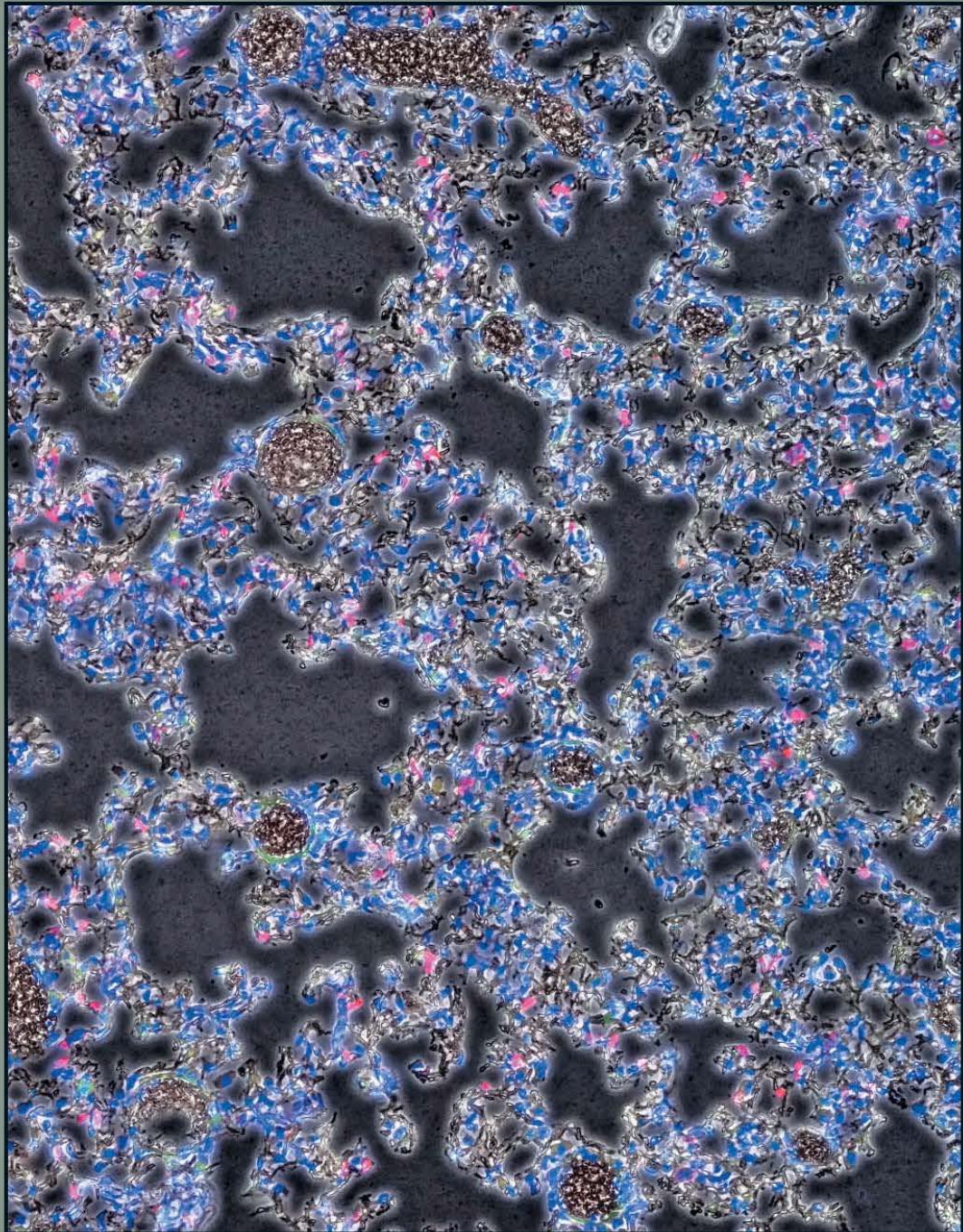


ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

9 17



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.Батурич**, доктор биологических наук **Д.И.Берман**, доктор биологических наук **П.М.Бородин**, **М.Б.Бурзин**, доктор физико-математических наук **А.Н.Васильев**, член-корреспондент, доктор филологических наук **В.И.Васильев**, кандидат биологических наук **М.Н.Воронцова**, доктор физико-математических наук **Д.З.Вибе**, кандидат физико-математических наук, доктор биологических наук **М.С.Гельфанд**, академик, доктор физико-математических наук **С.С.Герштейн**, профессор **А.Глухов** (**A.Glukhov**, США), академик, доктор физико-математических наук **Г.С.Голицын**, доктор химических наук **И.С.Дмитриев**, кандидат биологических наук **С.В.Дробышевский**, академик, доктор физико-математических наук **Л.М.Зеленый**, академик, доктор биологических наук **Н.А.Зиновьева**, академик, доктор биологических наук **А.Л.Иванов**, профессор **Т.Йованович** (**T.Jovanović**, Сербия), доктор биологических наук **С.Л.Киселев**, кандидат географических наук **Т.С.Клювиткина**, член-корреспондент, доктор физико-математических наук **М.В.Ковальчук**, доктор биологических наук **С.С.Колесников**, **Е.А.Кудряшова**, профессор **Е.Кунин** (**E.Koonin**, США), доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.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.Черноустько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Т-лимфоциты CD4+ (красный цвет) и В-лимфоциты B220+ (зеленый) инфильтрируют легочную ткань на ранних сроках после аэрозольного заражения *M.tuberculosis* (голубой — ядра клеток, DAPI). Иммуногистохимическое окрашивание криопрепаратов легкого мышей чувствительной линии 1/St. См. в номере: **Линге И.А.**, **Апт А.С.**, **Кондратьева Т.К.** *Форум «Кох—Мечников» по туберкулезу в Москве.*

Фото И.А.Линге

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Фрагмент сосуда, найденного А.П.Деревянко и А.П.Окладниковым у с.Вознесенское, с личиной (скорее всего, образ Женщины-родоначальницы), объединяющей изображения женщины, птицы, рыбы, солнца и тюленя. См. в номере: **Медведев В.Е.** *Глиняное совершенство амурского неолита.*

Фото В.Н.Кавелина



«Наука»

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

В НОМЕРЕ:**3 И.А.Линге, А.С.Апт, Т.К.Кондратьева**
**Форум «Кох—Мечников»
по туберкулезу в Москве**

В апреле текущего года в Москве впервые прошла международная конференция по туберкулезу в рамках российско-германского форума «Кох—Мечников». На конференции обсуждались последние результаты научных исследований, а также новые подходы к диагностике и лечению туберкулеза.

12 А.В.Ильин
**Рифтовая долина —
ключевая структура дна океана**

Рифтовая долина — начало всех геологических начал в океане. Она, как река животворящая, рождает новую жизнь с несметным разнообразием живых существ, которые получают свое пропитание не сверху, а из глубин литосферы.

**26 Н.В.Аладин, Э.К.Ермаханов, Ф.Миклин,
И.С.Плотников**
**Каким может быть будущее
Аральского моря?**

Аральское море высыхает с 1960-х годов. Его возвращение к первоначальному состоянию теперь уже вряд ли возможно. Однако существуют проекты, которые позволят сохранить некоторые остаточные водоемы бывшего моря.

40 И.И.Полетаева
Аудиогенная эпилепсия грызунов

У некоторых линий крыс и мышей в ответ на сильный звук развиваются эпилептиформные судороги. Механизм их формирования — предмет анализа и нейрофизиологов, и молекулярных биологов.

48 В.Е.Медведев**Глиняное совершенство амурского
неолита**

В долине р.Амур в слоях начального неолита (около 14 тыс. лет назад), относимых прежде к мезолиту, в памятниках Гася и Госян (осиповская культура) найдены обломки древнейших керамических сосудов. Еще четыре культуры в регионе охарактеризованы керамикой: маршинская (ранний, 10–9 тыс. лет назад), кондонская и малышевская (конец раннего и средний) и вознесенская (поздний неолит).

**58 С.А.Колчин, К.Н.Ткаченко, В.Г.Юдин,
А.Ю.Олейников, Г.П.Салькина****Трагедия гималайского медведя****Лекторий****70 В.Г.Кузнецов****Катастрофы на подводных склонах****Научные сообщения****75 А.В.Бялко****Радиоуглеродное свидетельство
антропогенной причины потепления****В.Н.Комаров, К.И.Юшин****Сом-«палеонтолог» (79)****А.А.Степанков, Т.А.Кузнецова,
М.М.Умаров, М.В.Вечерский****Зоомикробные симбиозы и азотный
метаболизм у фитофагов (82)****Времена и люди****86 Р.Н.Щербаков****Артур Комптон — мастер тонкого
и точного эксперимента**

CONTENTS:

3 **I.A.Linge, A.S.Apt, T.K.Kondratieva** **“Koch–Metchnikoff” Forum on Tuberculosis in Moscow**

In April 2017 in Moscow for the first time an international conference on tuberculosis was held in the framework of Russian-German forum “Koch–Mechnikov”. The latest of scientific results, as well the new approaches to diagnostics and treatment of tuberculosis were discussed.

12 **A.V.Ilyin** **Rift Valley as the Key Structure of the Sea Floor**

Rift Valley is the origin of all geological origins in the ocean. Like a life-creating river, it gives rise to new life with an incalculable variety of living beings who receive their food not from above but from the depths of the lithosphere.

26 **N.V.Aladin, Z.K.Ermakhanov, F.Miklin, I.S.Plotnikov** **What Could Be the Future of the Aral Sea?**

The Aral Sea has been drying since the 1960s. Its return to its original state is now hardly possible. However, there are projects that will allow to preserve some residual reservoirs of the former sea.

40 **I.I.Poletaeva** **Audiogenic Epilepsy in Rodents**

Some lines of rats and mice develop epileptiform convulsions in response to a strong sound. The mechanism of their formation is the subject of analysis of both neurophysiologists and molecular biologists.

48 **V.E.Medvedev** **Clay Perfection of the Amur Neolithic**

In the valley of the Amur River in the layers of the Early Neolithic (about 14 thousand years ago), previously attributed to the Mesolithic, fragments of the most ancient ceramic vessels were found in the archeological sites of Gasia and Gosyan (Osipov culture). Four more cultures in the region are characterized by ceramics: the Mariinsky (early, 10-9 thousand years ago), the Condon and Malyshev (the end of the early and middle) and the Ascension (late Neolithic).

58 **S.A.Kolchin, K.N.Tkachenko, V.G.Yudin, A.Yu.Oleinikov, G.P.Sal’kina** **The Tragedy of the Asiatic Black Bear**

Lectures

70 **V.G.Kuznetsov** **Catastrophes on Submarine Slopes**

Scientific Communications

75 **A.V.Byalko** **Radiocarbon Evidence for Anthropogenic Cause of Climate Warming**

V.N.Komarov, K.I.Yushin
Catfish-“Paleontologist” (79)

**A.A.Stepan’kov, T.A.Kuznetsova,
M.M.Umarov, M.V.Vecherskii**
**Zoo-Microbial Interactions
and Nitrogen Metabolism
of Herbivorous Mammals (82)**

Times and People

86 **R.N.Shcherbakhov** **Arthur Compton – Master of a Thin and Exact Experiment**

Форум «Кох–Мечников» по туберкулезу в Москве

кандидат биологических наук И.А.Линге¹, доктор биологических наук А.С.Апт^{1,2}, доктор биологических наук Т.К.Кондратьева¹

¹Центральный научно-исследовательский институт туберкулеза (Москва, Россия)

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

Международная конференция «Воспаление в легочной ткани: патология, регуляция и иммунный ответ» прошла в апреле 2017 г. в Москве в рамках форума «Кох–Мечников» по туберкулезу, проекты которого нацелены на установление долгосрочного партнерства в профилактической медицине и здравоохранении. Цель работы секции «Туберкулез» — внедрение результатов новейших научных исследований и разработок в сфере иммунологии и микробиологии в медицину для улучшения диагностики и лечения туберкулеза в России и других странах с выполнением стандартов качества, предложенных ВОЗ. На конференции обсуждались темы генетического контроля туберкулеза у людей и в экспериментальных моделях на животных, новые подходы к диагностике туберкулеза, и в частности туберкулеза с множественной и широкой лекарственной устойчивостью, а также данные, предполагающие новые подходы к контролю воспаления при туберкулезе и новейшие результаты в сфере разработки новых препаратов против микобактерий.

Ключевые слова: Форум «Кох–Мечников», туберкулез, микобактерии, воспаление.

Идея создания форума имени двух выдающихся ученых — Р.Коха и И.И.Мечникова — возникла еще в 2004 г. в Гамбурге на встрече гражданских обществ России и Германии «Петербургский диалог», а осуществилась два года спустя. В октябре 2006 г. на шестой встрече сообщества в Дрездене было подписано официальное соглашение о создании германо-российской организации, способствующей развитию международных научных связей в области медицины и здравоохранения*. Под сотрудничеством подразумевается объединение усилий (научных, экономических, политических и общественных) для решения проблем профилактики, диагностики и лечения опасных заболеваний, в число которых входят туберкулез, гепатит В и С, ВИЧ-инфекция. В дрезденском соглашении предусмотрены, в частности, организация совместных научных биомедицинских проектов и стажировок, подготовка врачей и исследователей, сотрудничество предприятий, выпускающих лекарственные препараты и медицинскую технику, проведение форумов, симпозиумов, конгрессов и семинаров и т.д. Проекты форума рассчитаны на долгосрочное партнерство специалистов двух стран в профилактической медицине и здравоохранении.

Основная задача секции «Туберкулез», руководит которой профессор Т.Ульрихс (T.Ulrichs, Берлин, Германия), — внедрение результатов современной иммунологии и микробиологии в меди-



Тимо Ульрихс, руководитель секции «Туберкулез».

цину для повышения эффективности диагностики и лечения туберкулеза с учетом стандартов качества, предложенных Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). Совместные эпидемиологические проекты должны улучшить понимание того, как распространяется возбудитель туберкулеза, в частности штаммы, устойчивые (резистентные) к лекарствам.

Хотя число вновь диагностируемых случаев туберкулеза в мире снижается, эта болезнь, наряду со СПИДом и малярией, остается одной из главных причин смерти людей. Такая печальная ситуация сложилась, потому что, во-первых, больные туберкулезом нередко инфицированы еще и ВИЧ (в основном в странах Африки) а, во-вторых, рас-

* www.koch-metschnikow-forum.de



Эрвин Шурр.

пространяется туберкулез с множественной и широкой лекарственной устойчивостью* возбудителя (в странах Средней Азии и Восточной Европы, в том числе в России).

В мае 2006 г., еще до подписания дрезденского соглашения, в Берлине состоялась конференция с участием немецких и российских специалистов по борьбе с ВИЧ-инфекцией и туберкулезом. В конце апреля текущего года в Центральном НИИ туберкулеза (ЦНИИТ) в рамках форума по туберкулезу «Кох—Мечников» прошла международная конференция «Воспаление легочной ткани: патология, регуляция и иммунный ответ». На заседаниях обсуждались особенности иммунного ответа и генетического контроля микобактериальных инфекций, а также проблемы диагностики и разработки новых антибактериальных препаратов. Помимо докладов, освещающих последние научные данные, на форуме проводилась школа с лекциями для молодых ученых, отражающими фундаментальные представления об иммунном ответе при туберкулезной инфекции, методах ее диагностики и лечения. Работы молодых участников были представлены в виде постеров.

Для читателя, не знакомого с научными и медицинскими проблемами туберкулеза, следует сказать, что это инфекционное заболевание вызывается бактериями *Mycobacterium tuberculosis* и передается преимущественно воздушно-капельным путем от больных с активной формой туберкулеза. Попав в легкие с вдыхаемым воздухом, бактерии

поглощаются легочными альвеолярными макрофагами. До недавнего времени считалось, что ключевую защитную роль при туберкулезе играют клетки иммунной системы — Т-лимфоциты CD4⁺ и макрофаги. Однако за последние два года получены данные, не согласующиеся с этим положением (на чем подробнее мы остановимся чуть позже). Макрофаги, поглощая микобактерии, продуцируют различные противомикробные агенты прямого действия (например, активные формы кислорода и азота) и цитокины, регулирующие каскады иммунного ответа. Кроме того, макрофаги — антигенпрезентирующие клетки: они представляют на своей поверхности антигены микобактерий Т-лимфоцитам. В результате происходит взаимная активация обоих типов клеток и развивается адаптивный иммунный ответ.

По данным ВОЗ, в 2015 г. было зарегистрировано 10,4 млн новых случаев заболевания. Считается, что микобактериями инфицировано около трети населения Земли, однако клинически диагностируемый туберкулез возникает только у 5% людей в течение двух лет после заражения. Примерно у 90% инфицированных симптомы так и не появляются в течение всей жизни. У остальных с возрастом (вследствие снижения иммунитета или каких-то других факторов) наступает реактивация латентного туберкулеза с появлением клинических симптомов. К безусловной группе риска относятся люди с различными иммунодефицитами, в первую очередь инфицированные ВИЧ или имеющие некоторые генетические особенности, повышающие чувствительность к развитию туберкулезной инфекции. Понятно, что заболевание, столь избирательно развивающееся в популяциях человека, имеет выраженную, хотя и мало изученную, связь с особенностями генетики хозяина.

Генетическим факторам, определяющим устойчивость людей к туберкулезу, и вероятности развития острой формы заболевания была посвящена лекция Э.Шурра (E.Schurr, Университет МакГилл, Монреаль, Канада). Профессор рассказал об исследовании контактировавших с больными туберкулезом людей, у которых не было положительного ответа в кожных пробах на туберкулез [1].

Заметим, что пока нет ни одного универсального способа, чтобы определить наличие инфекции у человека и степени развития процесса. Как правило, для этого используется набор различных исследований в совокупности. Кроме всем знакомого туберкулинового теста (TST — от англ. Tuberculin Skin Test, также известного как кожная проба, или реакция Манту) и схожего с ним, но более специфичного Диаскин-теста существует еще несколько вариантов недавно разработанных тестов *in vitro* на цитокин IFN- γ , который специфически продуцируют лимфоциты крови исследуемых пациентов в ответ на антигены микобактерий. Однако уверенно подтвердить или опровергнуть наличие патогена в организме не позво-

* По определению, принятому Глобальной целевой группой ВОЗ в октябре 2006 г., туберкулез с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ) вызывают штаммы возбудителя, резистентные не менее чем к двум самым эффективным противотуберкулезным препаратам первого ряда (изониазиду и рифампицину). Широкая лекарственная устойчивость (ШЛУ) подразумевает резистентность микобактерий ко всем фторхинолонам и как минимум к одному из трех инъекционных препаратов второй ряда (капреомицину, канамицину или амикацину). — *Примеч. ред.*

ляют даже все эти тесты. Дело в том, что отрицательный или низкий ответ в них может свидетельствовать как об отсутствии инфицирования, так и о врожденной неспособности давать ответ на применяемые антигены или о полной устойчивости человека, справляющегося с туберкулезной инфекцией еще на стадии, когда адаптивный иммунитет не развился.

В работах Э.Шурра, проведенных в различных странах Африки, было показано, что отсутствие реакции TST и ее интенсивность связаны с определенными локусами в разных хромосомах. Локус, ассоциированный с отсутствием реакции, был назван TST1, а локус, от которого зависит размер кожной пробы, — TST2. Скорее всего, ген в локусе TST1 отвечает за врожденную устойчивость к инфицированию туберкулезом, а ген в TST2 — за контроль уровня иммунного ответа на микобактерии [2]. Эти результаты существенно дополняют ранее полученные данные о различных нарушениях в генах у детей с первичным активным туберкулезом. Эти гены кодируют цепи рецепторов к таким ключевым цитокинам, как IFN- γ (IFN γ R) и интерлейкин-12 (IL12Rv1) [3]. Эти данные свидетельствуют о моногенном контроле предрасположенности к развитию ранних тяжелых форм туберкулеза. Высока вероятность того, что значительная часть детей, рано болеющих туберкулезом, имеют врожденные единичные «ошибки» в иммунной системе.

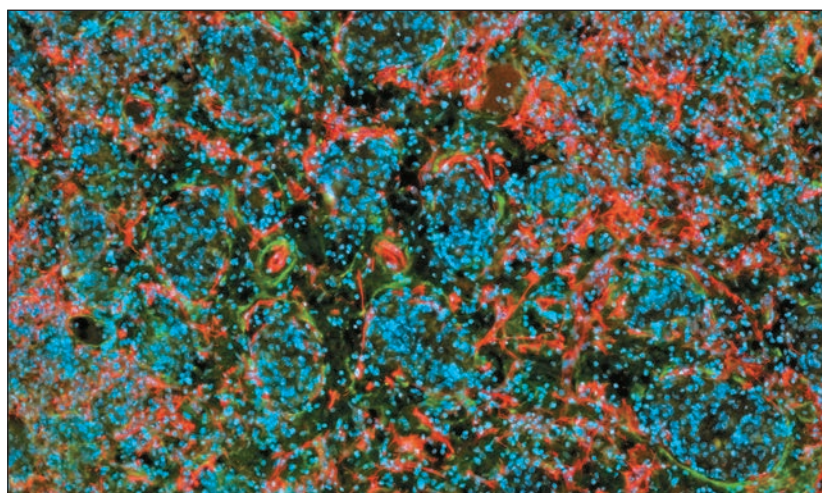
Гораздо более сложная картина генетического контроля наблюдается у людей, болеющих в зрелом возрасте. Возможно, во многих случаях у взрослых развивается не первичный туберкулез, а реактивация латентной инфекции — процесс с более сложным генетическим контролем по сравнению с чувствительностью к первичной инфекции. Мета-анализ большого количества проведенных исследований показал, что связи (ассоциации) полиморфизмов в некоторых генах с легочным туберкулезом четко прослеживаются в одних странах и популяциях людей и совершенно отсутствуют в других. Исследователи находят такие ассоциации среди множества генов-кандидатов, кодирующих синтез разных участников иммунного ответа при туберкулезе: С-лектиновый рецептор DC-SIGN (от англ. Dendritic Cell-Specific Intercellular adhesion molecule-3-Grabbing Non-integrin — специфичные для дендритных клеток молекулы межклеточной адгезии 3-захватывающего неинтегрин), TLR1 и TLR2 (от Toll-Like-Receptors — толл-подобные



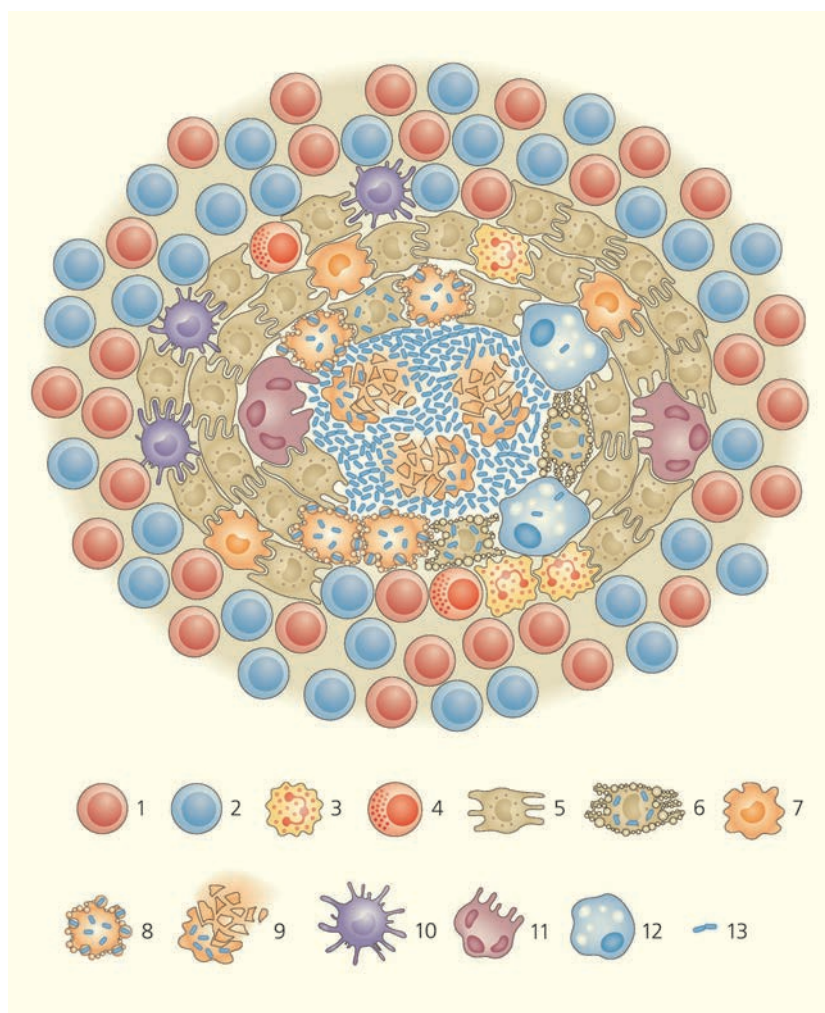
Александр Соломонович Апт.

рецепторы), рецептор к витамину D, TNF (от англ. Tumor Necrosis Factor — фактор некроза опухоли), IL-1b или некоторые молекулы МНС (от англ. Major Histocompatibility Complex — главный комплекс тканевой совместимости) класса II.

Важно отметить, что иммунный ответ у людей, больных туберкулезом, и мышей, инфицированных в экспериментах, очень сходен. Исследования по поиску генов, ответственных за чувствительность к туберкулезу, в популяциях человека и модельных животных не только дают близкие результаты, но и дополняют друг друга. Один из авторов этих строк (А.С.Апт, заведующий лабораторией иммуногенетики ЦНИИТ) рассказал на конференции о результатах, полученных в лаборатории, где была проведена многоэтапная рабо-



Фибробласты (ERTR7-AF488; зеленый) и эпителиальные клетки (SMA-Cy3; красный) ограничивают гнездовые скопления макрофагов (ядра клеток, DAPI; голубой). Иммуногистохимическое окрашивание ткани легкого чувствительных к туберкулезу мышей линии I/St через девять недель после аэрозольного заражения вирулентным штаммом *M.tuberculosis* H37Rv.

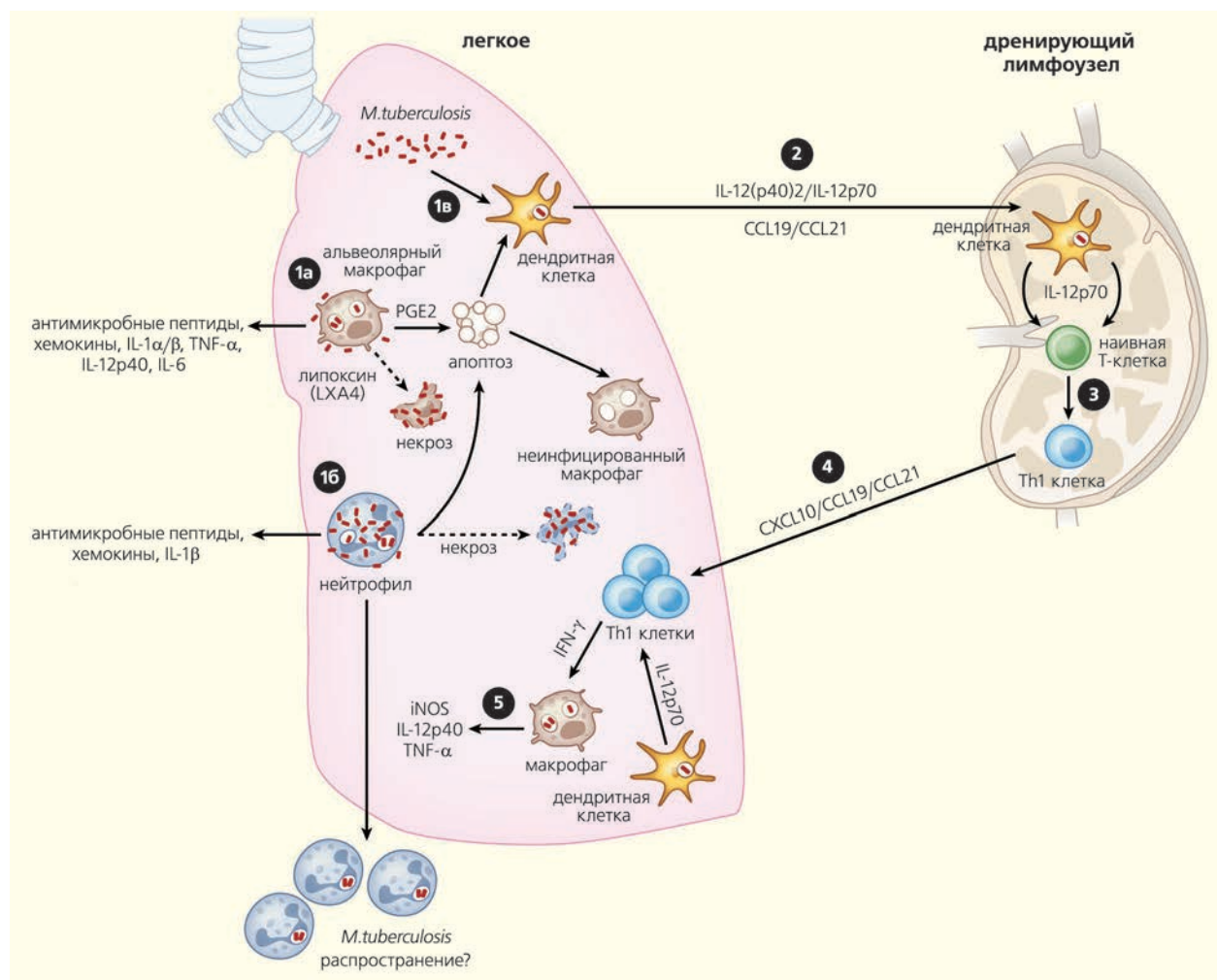


Структура туберкулезной гранулемы (doi:10.1038/nri3211). В центре этой компактной клеточной структуры расположены инфицированные некротические макрофаги, окруженные валом эпителиальных макрофагов. Макрофаги могут сливаться друг с другом, образуя гигантские многоядерные клетки, и превращаться в пенные макрофаги, накапливающие большое количество жиров. Роль подобных клеток пока до конца не ясна. По периферии гранулемы располагаются Т-лимфоциты, В-клетки, образующие скопления, похожие на В-фолликулы вторичных лимфоидных органов, а также другие типы клеток, участвующие в иммунном ответе на инфекцию. На более поздних этапах образования гранулемы она отграничивается от здоровой ткани легкого валом эпителиоидных клеток и фибробластов (не показано на рисунке). 1 — Т-клетка, 2 — В-клетка, 3 — нейтрофил, 4 — НК-клетка, 5 — эпителиальный макрофаг, 6 — апоптотический инфицированный эпителиальный макрофаг, 7 — макрофаг, 8 — апоптотический инфицированный макрофаг, 9 — некротический инфицированный макрофаг, 10 — дендритная клетка, 11 — гигантская клетка, 12 — пенистый макрофаг, 13 — *Mycobacterium tuberculosis*.



Ирина Андреевна Линге.

та по выведению рекомбинантных линий мышей, отличающихся только по разным участкам *MHC*. Выяснилось, что контроль тяжести течения инфекции осуществляет классический ген класса II — *H2-Ab*, от которого зависит узнавание антигенов Т-лимфоцитами $CD4^+$ [5]. Результатам экспериментов по инфицированию этих же мышей микобактериями *M. avium* (менее вирулентными, чем *M. tuberculosis*) был посвящен доклад ведущего автора этой работы (И.А.Линге, старший научный сотрудник лаборатории иммуногенетики). Изучение инфекции, вызываемой *M. avium*, очень важно, поскольку она широко распространена и нередко становится причиной смерти ВИЧ-инфицированных людей.



Клеточный иммунный ответ на заражение микобактериями *M. tuberculosis* (doi:10.1146/annurev-immunol-032712-095939). При аэрозольной инфекции микобактерии в легких могут быть фагоцитированы резидентными альвеолярными макрофагами (1а), нейтрофилами (1б) и легочными дендритными клетками (1в), которые в свою очередь начинают производить и выделять различные антимикробные пептиды, цитокины и хемокины. Уровень продукции тех или иных липидных медиаторов воспаления, таких как способствующего апоптозу простагландина E2 (PGE2) или некрозу липоксина A4 (LXA4), в макрофагах играет решающую роль в определении дальнейшей судьбы макрофага. Инфицированные дендритные клетки мигрируют в дренирующие легкие лимфоузлы (2) под действием цитокина IL-12 и хемокинов CCL19 и CCL21 и способствуют дифференцировке Т-клеток Th1. Затем специфические к микобактериальным антигенам Т-лимфоциты мигрируют обратно в легкие (4), продуцируют IFN- γ , активирующий макрофаги. В результате начинается продукция цитокинов и антимикробных компонентов, например индуцибельной NO-синтазы (iNOS), контролирующей рост бактерий.

У мышей новых линий обнаружен «зеркальный» фенотип: чувствительные к *M. tuberculosis* животные оказались более устойчивы к *M. avium*, и наоборот. Причину этого эффекта еще предстоит выяснить, но совокупность полученных данных указывает на важность изучения ассоциаций с туберкулезом в популяциях человека аллельных вариантов гена *HLA-DQ* — генетического аналога гена *H2-A* мыши.

Мы уже упоминали о том, что в последние годы пересматриваются некоторые парадигмы в понимании развития иммунного ответа при туберкулезе. На конференции, в частности, обсуждалась неоднозначная роль в этом процессе нейтрофи-

лов — клеток крови, которые одними из первых реагируют на вторжение патогена миграцией к месту инфекции и поглощением микобактерии. Как рассказал Д.МакМаррей (D. McMurray, Техасский университет А&М, США), в экспериментах на морских свинках миграция нейтрофилов в легкие в ответ на продукцию цитокина IL-8 способствует активации альвеолярных макрофагов и борьбе с туберкулезной инфекцией [6]. Однако по данным, изложенным доктором Т.Далленга (T. Dallenga, Борстель, Германия), поглощение микобактерий нейтрофилами пациентов с активным туберкулезом приводит к смерти нейтрофилов — их



Оливье Нейролл (слева) и Штефан Штенгер.

некрозу за счет выработки большого количества активных форм кислорода [7]. Это пагубно сказывается на макрофагах и, как следствие, на их способности бороться с инфекцией. Таким образом, нейтрофилы, с одной стороны, активно поглощают бактерии, чтобы убивать их, но с другой — не справляясь с этой задачей, выступают в качестве «троянского коня», экранируя микобактерии от макрофагов, профессиональных антиген-презентирующих клеток, и препятствуя формированию эффективного адаптивного иммунитета. Исследователи полагают, что подавление некроза нейтрофилов приведет к более эффективному уничтожению микобактерий легочными макрофагами.



Дэвид МакМаррей.

Как известно, туберкулез опасен прежде всего сильным воспалением легочной ткани, что происходит из-за чрезмерного иммунного ответа на *M.tuberculosis*. Обсуждая тему правильного баланса между необходимым уровнем воспаления и контролем инфекции, О.Нейролл (O.Neyrolles, Институт фармакологии и структурной биологии, Тулуза, Франция) подчеркнул важную роль в этом процессе С-лектиновых рецепторов, расположенных на поверхности дендритных клеток (DCIR, от англ. Dendritic Cell ImmunoReceptor). DCIR, взаимодействуя с антигенами, регулирует развитие иммунного ответа, необходимого для поддержания воспаления на должном уровне и контроля инфекции в легких [8]. По данным Нейролла,

у мышей в отсутствие DCIR лучше по сравнению с контрольными животными сдерживалось размножение микобактерий в легких, но при этом сильнее развивалось воспаление.

В реакции против микобактерий участвует $IFN-\gamma$ — основной цитокин, активирующий бактерицидные свойства макрофагов. Однако стали появляться экспериментальные данные, которые свидетельствуют об отсутствии какой-либо корреляции между продукцией $IFN-\gamma$ в легких и контролем инфекции [10], а также об участии в борьбе с ней других клеточных популяций — например, продуцирующих интерлейкин-17 лимфоцитов Th17. Сотрудники лаборатории биотехнологии ЦНИИТ под руководством И.В.Лядовой изучили особенности фенотипа и функций популяций клеток Th1, Th17 и Th1/Th17 при туберкулезе [10]. Было показано, что количественные параметры, которые часто используют для характеристики иммунного ответа при туберкулезе — такие, как антиген-специфическая продукция цитокинов $IFN-\gamma$, и/или $TNF-\alpha$ и IL-2, и анализ степени клеточной дифференцировки — отражают скорее степень активности инфекционного процесса, а не тяжести заболевания.

Необычную популяцию Т-лимфоцитов $CD8^+$, которые традиционно не считались активными участниками иммунного ответа против туберкулеза, обнаружили исследователи группы Ш.Штенгера (S.Stenger, Институт медицинской микробиологии и гигиены Ульмского университета, Германия). Эти клетки оказались специфичны к липидным антигенам микобактерий и наряду с $IFN-\gamma$ продуцируют цитотоксические молекулы перфорина, гранулизина и гранзимы В. Такие Т-лимфоциты (ученые назвали их полицитотоксическими) луч-

ше подавляют рост бактерий у пациентов с латентным туберкулезом, чем у людей, страдающих активной формой заболевания [11]. В этих данных кроется, возможно, подход к пониманию того, что сдерживает инфекцию у носителей латентного туберкулеза и не позволяет перейти ей в активную форму.

Среди прежде недооцененных факторов, влияющих на патогенез туберкулеза, следует отметить еще и цитокин IL-11, о чем рассказал на конференции А.С.Апт. Сначала мы выяснили, что продукция этого цитокина сильно повышена в легких мышей, генетически чувствительных к туберкулезу, и связана с более тяжелой формой патологии. Предположив, что блокировка сигнальных функций IL-11 может ослабить тяжесть инфекции у мышей, мы создали мутантную форму (антагониста) этого белка и ввели его непосредственно в легкие больных животных. Ингибирование IL-11 способствовало подавлению воспаления при туберкулезе, в частности снижению уровня экспрессии ключевых факторов воспаления на уровне генов и белков, а также увеличивало продолжительность жизни зараженных животных [12]. Это позволяет рассматривать IL-11 как потенциальную мишень для разработки противовоспалительной терапии при туберкулезе.

Большое внимание на конференции было уделено изучению самих микобактерий и приобретению ими лекарственной устойчивости, а также разработке новых антимикобактериальных препаратов. М.Меркер (M.Merker, Борстель, Германия) отметил интересный факт: в Восточной Европе и в России причиной развития туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью становятся всего несколько клонов микобактерий. Важно также, что более чем 90% больных туберкулезом с МЛУ и ШЛУ лечат не эффективно. В связи с этим трудно переоценить роль изначально правильной диагностики в целом и диагностики лекарственной устойчивости, не говоря уж о параллельной разработке новых лекарственных препаратов.

Доклад В.В.Еремеева (зам. директора по науке ЦНИИТ) был посвящен новой теме — уровню



Маттиас Меркер.

экспрессии различных микроРНК в крови и зараженной легочной ткани больных туберкулезом. В дополнение к этому группа Т.Л.Ажикиной (Институт биоорганической химии имени академиков М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН, Москва) проводила исследования экспрессии в микобактериях нескольких малых РНК (в частности, недавно открытой РНК ncRv10243A из семейства некодирующих РНК) в разных условиях [13]. Исследователи полагают, что эта молекула — ключевое звено регуляции в цепи реакций окислительного стресса микобактерий. Подобные исследования, дополняя друг друга, послужат основой для разработки методов дифференциальной диагностики туберкулеза,



Владимир Витальевич Еремеев и Ольга Владимировна Демихова.



Татьяна Леонидовна Ажикина (слева), Татьяна Константиновна Кондратьева и Эрвин Шурр.

а также создадут предпосылки для разработки принципиально новых методов противотуберкулезной терапии.

В настоящее время наибольшей эффективностью и наименьшей токсичностью для пациентов обладают противотуберкулезные препараты первого ряда (рифампицин и изониазид), однако у микобактерий довольно быстро развивается к ним резистентность. Примечательно, что мутации, от которых это зависит, приводят к устойчивости бактерий и к другим препаратам, что свидетельствует о необходимости не только генетического, но и фенотипического анализа штаммов. О новых подходах к диагностике лекарственной устойчивости микобактерий рассказала Л.Н.Черноусова (руководитель отдела микробиологии ЦНИИТ). С помощью системы Vastec MGIT 960 можно провести фенотипический анализ чувствительности выделенных микобактерий сразу к 11 противотуберкулезным препаратам, что позволяет проводить подбор индивидуальной терапии и соответственно повышает эффективность лечения [14].

В 2014 г. были выпущены два новых противотуберкулезных препарата — бедаквалин и деламаид, которые сейчас активно внедряются в странах с высоким уровнем распространения туберкулеза. Доклад В.А.Макарова (Институт биохимии имени А.Н.Баха, Москва) был посвящен разработанному его группой перспективному соединению RBTZ169, у которого выявлена высокая эффективность против микобактерий в модели туберкулеза на мышах, особенно в сочетании с бедаквалином и пиперазиномидом [15]. В течение первых клинических испытаний на здоровых добровольцах было показано, что противомикробную активность проявляет не только собственно RBTZ169, но и его метаболиты, образующиеся

в процессе окисления исходного соединения в организме и выделенные из плазмы после приема RBTZ169. По имеющимся уже сейчас данным, RBTZ169 действует в очень низких дозах, и пока не обнаружено побочных эффектов от его применения, что делает эту молекулу очень перспективным кандидатом для создания нового лекарства против туберкулеза.

Б.В.Никоненко (ведущий научный сотрудник лаборатории иммуногенетики ЦНИИТ) рассказал об исследовании активности новых производных индола против *M.tuberculosis* и *M.avium*, разработанных сотрудниками Института элементоорганических соединений имени А.Н.Несмеянова РАН. В результате проделанной работы были

отобраны пять соединений-кандидатов для последующего анализа их активности против *M.tuberculosis* и *M.avium*, среди которых одно обладает бактерицидной активностью против «спящих» (дормантных) форм *M.tuberculosis*, что очень важно для предотвращения реактивации туберкулеза после лечения. Для успешной разработки подобных препаратов крайне важно понимание фундаментальных механизмов развития дормантности в популяциях микобактерий — вопрос, которым успешно занимается лаборатория А.С.Капрельянца (Институт биохимии имени А.Н.Баха, Москва). В его докладе были затронуты вопросы разнообразия фенотипов таких бактерий, а также процессов и факторов, приводящих к реактивации бактерий.

* * *

В заключение хотелось бы отметить выступление Т.Ульрихса. Он подчеркнул, что для эффективной борьбы с туберкулезом в первую очередь важно обеспечить предотвращение заболевания, а для этого необходима эффективная вакцинация. Несмотря на постоянные попытки создать новую вакцину против туберкулеза, трату огромного количества средств на многочисленные разработки, до сих пор имеется только одна вакцина — BCG (от фр. *Bacillus Calmette—Guerin*), созданная А.Кальметтом и К.Герен еще в начале XX в. Видимо, несмотря на проведение огромного количества работ, мы все еще не понимаем какие-то фундаментальные аспекты патогенеза иммунного ответа и иммунологической памяти при туберкулезе, что не позволяет создать принципиально лучшую вакцину. В связи с этим проведение подобных конференций и форумов, сотрудничество ученых разных стран и проведение дискуссий крайне важны для победы над туберкулезом в мире. ■

Конференция проведена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 15-15-30020, ТКК).

Литература / Reference

1. Cobat A., Gallant C.J., Simkin L. ... Schurr E., Alcans A. Two loci control tuberculin skin test reactivity in an area hyperendemic for tuberculosis. *J. Exp. Med.* 2009; 206(12): 2583–91. Doi:10.1084/jem.20090892.
2. Cobat A., Poirier C., Hoal E. ... Abel L. Tuberculin skin test negativity is under tight genetic control of chromosomal region 11p14-15 in settings with different tuberculosis endemicities. *J. Infect Dis.* 2015; 211(2): 317–21. Doi:10.1093/infdis/jiu446.
3. Abel L., El-Baghdadi J., Boufiba A.A., Casanova J.-L., Schurr E. Human genetics of tuberculosis: a long and winding road. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2014; 369: 20130428. Doi:10.1098/rstb.2013.0428.
4. Apt A.S., Logunova N.N., Kondratieva T.K. Host genetics in susceptibility to and severity of mycobacterial diseases. *Tuberculosis (Edinb.)*. 2017; 106: 1–8. Doi:10.1016/j.tube.2017.05.004.
5. Logunova N., Korotetskaya M., Polsbakov V., Apt A. The QTL within the H2 complex Involved in the control of tuberculosis infection in mice is the classical class II H2-Ab1 gene. *PLoS Genet.* 2015; 11(11): e1005672. Doi:10.1371/journal.pgen.1005672.
6. Sawant K.V., McMurray D.N. Guinea pig neutrophils infected with *Mycobacterium tuberculosis* produce cytokines which activate alveolar macrophages in non-contact co-cultures. *Infect. Immun.* 2007; 75: 1870–1877. Doi:10.1128/IAI.00858-06.
7. Dallenga T., Schaible U.E. Neutrophils in tuberculosis—first line of defence or booster of disease and targets for host-directed therapy? *Pathog. Dis.* 2016; 74(3): ftw012. Doi:10.1093/femspd/ftw012.
8. Troegeler A., Mercier I., Cougoule C. ... Neyrolles O. C-type lectin receptor DCIR modulates immunity to tuberculosis by sustaining type I interferon signaling in dendritic cells. *PNAS.* 2017; 114(4): E540–E549. Doi:10.1073/pnas.1613254114.
9. Sakai S., Kauffman K. D., Sallin M.A., Sharpe A.H., Young H.A., Ganusov V.V., Barber D.L. CD4 T cell-derived IFN- γ plays a minimal role in control of pulmonary *Mycobacterium tuberculosis* infection and must be actively repressed by PD-1 to prevent lethal disease. *PLoS Pathog.* 2016; 12(5): e1005667.
10. Lyadova I.V., Pantelev A.V. Th1 and Th17 cells in tuberculosis: protection, pathology, and biomarkers. *Mediators Inflamm.* 2015; 2015: 854507. Doi:10.1155/2015/854507.
11. Busch M., Herzmann C., Kallert S. ... Stenger S. Lipoarabinomannan-responsive polycytotoxic T cells are associated with protection in human tuberculosis. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2016; 194(3): 345–355. Doi:10.1164/rccm.201509-1746OC.
12. Shepelkova G., Eustifeev V., Majorov K., Bocharova I., Apt A. Therapeutic effect of recombinant mutated interleukin 11 in the mouse model of tuberculosis. *J. Infect. Dis.* 2016; 214(3): 496–501. Doi:10.1093/infdis/jiw176.
13. Azbikina T.L., Ignatov D.V., Salina E.G., Fursov M.V., Kaprelyants A.S. Role of small noncoding RNAs in bacterial metabolism. *Biochemistry (Moscow)*. 2015; 80(13): 1633–1646. Doi:10.1134/S0006297915130015.
14. Maslov D.A., Zaichikova M.V., Chernousova L.N. et al. Resistance to pyrazinamide in Russian *Mycobacterium tuberculosis* isolates: pncA sequencing versus Bactec MGIT 960. *Tuberculosis (Edinb.)*. 2015; 95(5): 608–612. Doi:10.1016/j.tube.2015.05.013.
15. Makarov V., Lechartier B., Zhang M. et al. Towards a new combination therapy for tuberculosis with next generation benzothiazinones. *EMBO Mol. Med.* 2014; 6(3): 372–383. Doi:10.1002/emmm.201303575.

“Koch—Metchnikoff” Forum on tuberculosis in Moscow

I.A.Linge¹, A.S.Apt^{1,2}, T.K.Kondratieva¹

¹Central Research Institute for Tuberculosis (Moscow, Russia)

²Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The conference “Lung tissue inflammation: pathology, regulation and immune response” was held in the framework of Koch Metchnikoff Forum on tuberculosis (TB). In general, the projects of the Forum aim to establishing long-term partnerships in the field of preventing medicine and public health. The TB section connects fundamental research in immunology and microbiology to an improvement in diagnosing TB in Russia as well as implementing WHO quality standards. Genetic control of TB in humans and in experimental animal models, new approaches to the diagnostic including analysis of multi-drug and extra-drug resistant TB, new approaches to the control of lung tissue inflammation and novel results in the field of antimycobacterial drug design were highlighted and discussed during the conference.

Keywords: “Koch—Metchnikoff” Forum, tuberculosis, mycobacterium, inflammation.

Рифтовая долина — ключевая структура дна океана

А.В.Ильин

Акустический институт имени академика Н.Н.Андреева (Москва, Россия)

Рифтовая долина — начало всех начал в геологии океана. Здесь зарождается земная кора и начинается ее развитие во всем своем разнообразии. В статье рассматриваются проблемы геоморфологии и геологии океанического дна в связи с данными по изучению рифтовой долины. Излагается краткая история открытия рифтовой долины и основные результаты, полученные в ходе выполнения крупнейших проектов, посвященных ее исследованию. Среди них программа ФАМОУС (франко-американские исследования срединно-океанических хребтов) и фундаментальные исследования гидротермальных источников в рифтовой долине.

Авторские разработки касаются проблем происхождения морфоструктуры рифтовой долины и ее ближайшей периферии. Затрагиваются вопросы экологии и практического освоения полезных ископаемых рифтовой долины с изложением собственной концепции поиска и разведки гидротермальных месторождений.

Ключевые слова: рифтовая долина, литосферные плиты, земная кора, спрединг, гидротермальные источники, морфоструктура, экология.

Рифтовая долина — начало всех начал в океане. Здесь образуется земная кора и начинается ее развитие во всем своем многообразии.

Немного истории

Термин «рифтовая долина» введен в лексикон наук о Земле известным шотландским геологом Дж.Грегори. Он занимался геологической съемкой в Восточной Африке и в 1921 г. опубликовал фундаментальную монографию «Рифтовые долины и геология Восточной Африки». Среди этих долин есть рифт Грегори. Этот исследователь определил и генетический статус рифтовых долин — грабены растяжения. Вместе с тем признание возможности растяжения земной коры в те годы считалось по меньшей мере несерьезным. Большинство геологов принимало гипотезу сжатия Земли английского геофизика Дж.Дж.Дж. Джи, к слову сказать, иностранного члена Академии наук СССР. И лишь в конце 50-х годов прошлого столетия аргументы о растяжении земной коры нашли адекватное подтверждение в трудах Ф.Венинг-Мейнеца и Э.Буллара.

Что касается океана, то странно думать, что всего несколько десятилетий назад большинство нынешних геологов старшего поколения о рифтовой долине не подозревало. У других были смутные догадки. Они сводились к возможному про-



Александр Васильевич Ильин, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Акустического института имени академика Н.Н.Андреева. Область научных интересов — морская геология, геоакустика, экология. Лауреат премии и Золотой медали Ф.П.Литке Русского географического общества (1978).

должению рифта Исландии в океан или к взаимосвязи с концепцией расширения Земли. Точкой отсчета в обоих случаях служил уже известный к тому времени глобальный пояс землетрясений, занимающий в океанах срединное положение. Но наглядного изображения продольного ущелья, которое разделяет срединные хребты, по-прежнему не существовало.

Сразу после Второй мировой войны американцы начали интенсивные исследования дна Атлантического океана. В конце 40-х годов прошлого столетия руководитель Ламонтской геологической обсерватории М.Юинг с сотрудниками драгировал на гребне Срединно-Атлантического хребта (САХ) в Южной Атлантике глубинные породы (в том числе серпентинизированные перидотиты). Оценивая находки, будущий основоположник новой глобальной тектоники Г.Хесс на симпозиуме «Земная кора» в Балтиморе (США) отмечал, что «вопрос о том, почему серпентинизация приурочена в Атлантике к средней линии океана, остается до сих

пор открытым». Уточним, серпентинизация — процесс гидротермального изменения и превращения глубинных пород (дунита, перидотита и др.) в серпентинит, состоящий из группы минералов серпентина (слоистого силиката магния). Процесс протекает при температуре 300–500°C с выделением тепла и увеличением объема вещества. По этой причине с серпентинизацией нередко связывали и теперь связывают поднятие земной коры, что верно. Однако по некоторым расчетам, масса серпентинитов, необходимая для вздымания гребня САХ над уровнем подножия, должна содержать воду в количестве ~1% от общей массы воды в Мировом океане. Это нереально и не отвечает современному составу пород срединно-океанических хребтов (СОХ). Происхождение же форм тектонического рельефа меньшего масштаба путем серпентинизации не исключено.

Серпентин — красивый минерал и внешне напоминает рисунок кожи змеи с пятнами на зеленом фоне. Вместе со своим названием он давно вошел в обиход нашей жизни. Серпантином называют извивы горных дорог, гирлянды цветных украшений. Серпентин используется как поделочный камень, а также для изготовления разнообразных декоративных изделий в строительстве и архитектуре.

Но продолжим цитату профессора Хесса: «Любая гипотеза, которую можно предложить для объяснения этого факта, является в настоящее время умозрительной» [1]. Заседания симпозиума проходили в октябре 1954 г. В то время уже шел разговор о конвекционных потоках в мантии Земли. С восходящей ветвью потока связывалось образование гребней СОХ, однако разрыва литосферы не предусматривалось.

Обращаясь в прошлое, хочется мысленно вмешаться в ход рассуждений Хесса. Ну если уж Вы указали на локализацию серпентинизации вдоль гребня хребта, то и предположите, что именно здесь и должна существовать трещина, через которую глубинное вещество просачивается на поверхность, а вода проникает в земную кору. И все встанет на свои места!

Казалось бы, чего проще? Проще да, но с высоты современного знания. Рассчитывать на получение позитивного результата лишь путем умозрительных упражнений не приходится. Озарение чаще падает на подготовленную почву. Такова логика научного поиска.

Фундаментальная подготовка была выполнена, и связана она с именами профессора Колумбийского университета США и Ламонтской геологической обсерватории Брюса Чарльза Хейзена и его неизменной сотрудницы Мэри Тарп. В геологии много известных женщин-подвижниц. И в этом ряду заслуженное место принадлежит Мэри. В Ламонтскую обсерваторию она пришла в возрасте 20 лет, имея на руках диплом геолога Мичиганского университета, сертификат палеонтолога, диплом математика Университета г.Талсы (Оклахома).

Ознакомившись с ее резюме, Юинг (в то время директор обсерватории) оказался в затруднении, куда же направить барышню. Проблема решилась быстро. Он спросил: «Вы чертить умеете?» и, услышав в ответ что-то похожее на согласие, определил ее в лабораторию сбора и систематизации данных по измерению глубин дна океана, к Хейзену. Там она превратилась в замечательного картографо-исследователя. В 1953 г., систематизируя данные по Северной Атлантике, Тарп обнаружила на трех смежных по широте эхолотных профилях САХ сходные формы рельефа — глубокие провалы в срединной части хребта. Оформив данные в виде картинки (прообраза будущих физиографических карт), она показала ее своему руководителю (рис.1).

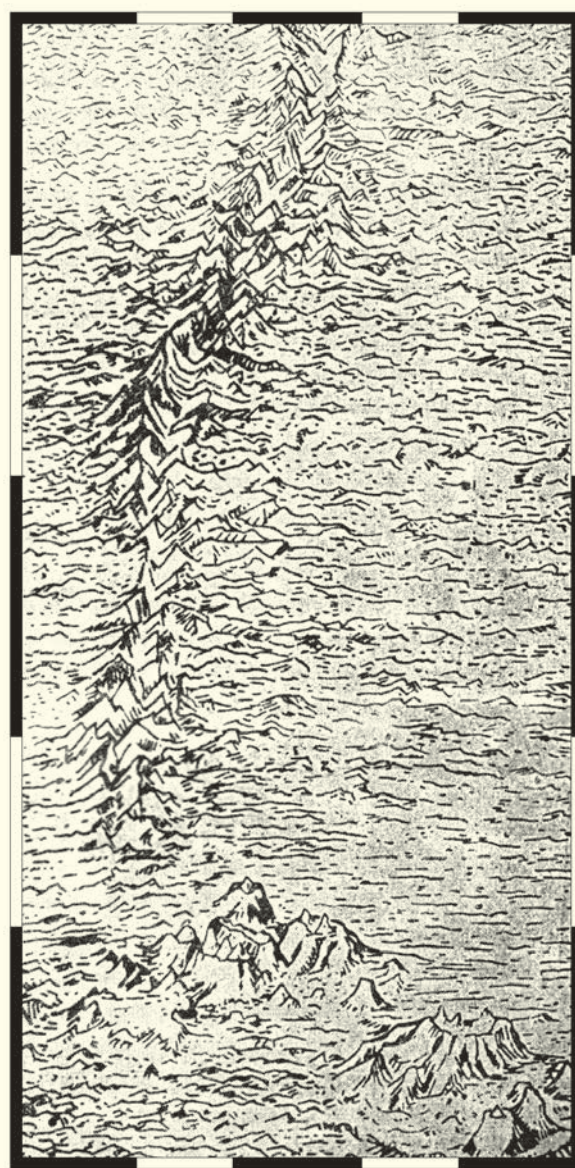


Рис.1. Первоначальный фрагмент рифтовой долины в Атлантическом океане, подготовленный М.Тарп.



Рис.2. Первооткрыватели рифтовой долины в Атлантическом океане Б.Хейзен и М.Тарп.

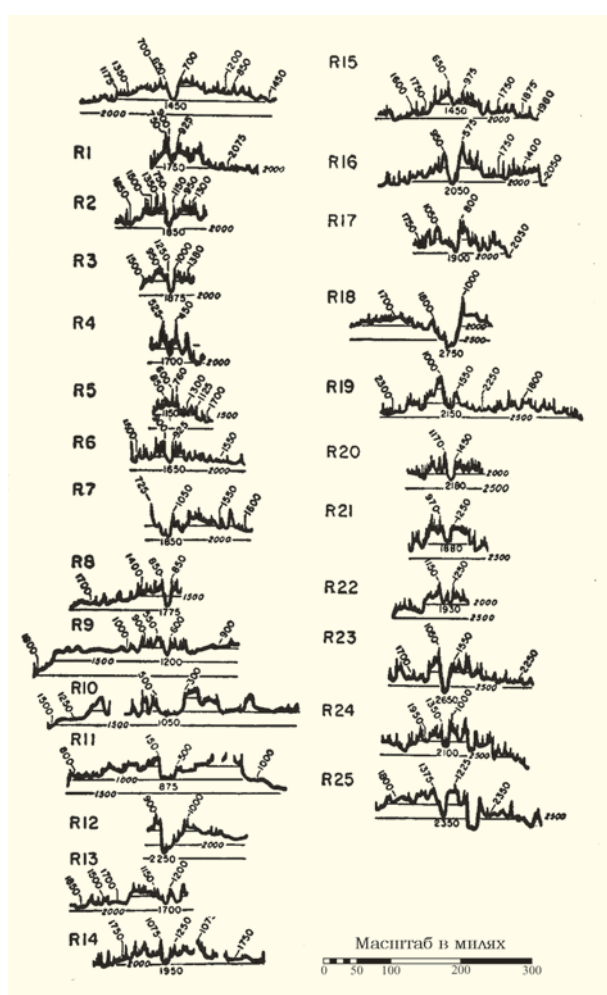


Рис.3. Первая непрерывная серия эхолотных профилей через рифтовую долину в Северной Атлантике [2].

Тот с удивлением воскликнул: «Этого не может быть!». У Хейзена сразу возникла мысль о расколе континентов в стиле А.Вегенера. Однако в те годы подобные мысли были крамольными, и данных было еще маловато. Мэри продолжала работать и не только обнаруживала новые провалы по простиранию хребта, но и отмечала их совпадение с линией эпицентров землетрясений глобального сейсмического пояса Земли. Все это означает, что фактическое открытие рифтовой долины произошло в 1953 г. (но с поправкой на слабую осведомленность научного сообщества). Напомним, что на симпозиуме в 1954 г. о рифтовой долине как таковой не было сказано ни слова. Удивительно, что всего лишь два-три года спустя были обнародованы фундаментальные результаты совместных исследований Тарп и Хейзена. В 1957 г. после доклада Хейзена на симпозиуме в Принстонском университете идея о Великом глобальном рифте получила широкую известность, особенно после эмоциональной реплики Хесса (в то время директора геологического департамента Принстона): «Молодой человек, вы потрясли основы геологии!». Тем самым была решена и проблема серпентинизации, которая так занимала профессора Хесса.

В одной из публикаций Хейзена тех лет есть интересное признание, что рифтовую долину открыла Мэри Тарп. Это признание — благодарность Хейзена своей сотруднице и близкому человеку за самоотверженный труд по составлению географических карт, охвативших впоследствии весь Мировой океан. В Америке есть определение: «Великий глобальный рифт». Мы добавим, что в 1953 г. было сделано Великое географическое открытие, предопределившее слом прежней идеологии наук о Земле. Его авторами стали Мэри Тарп и Брюс Хейзен (рис.2).

Дальнейшая популяризация открытия шла своим чередом. В апреле 1959 г. в США под эгидой Геологического общества Америки вышла книга «The floors of the oceans», авторами которой были Хейзен, Юинг и Тарп. На русский язык она была переведена в 1962 г. в издательстве «Иностранная литература» под названием «Дно Атлантического океана» [2]. Книга вызвала, мало сказать, большой интерес. Она ознаменовала новый этап в изучении океанского дна. Уже невозможно стало говорить, что горные хребты в океане — складчатые сооружения, а глубоководные равнины — древние платформы. Фактический материал, приведенный авторами, не оставлял сомнений в иной природе дна океана.

Самая эффектная иллюстрация нового видения земной коры океана — последовательный ряд эхолотных профилей через осевую зону САХ, от южной оконечности хребта Рейкьянес до параллели 20°с.ш. (рис.3). Индивидуальные различия морфологии в смежных профилях хорошо прослеживаются, но и общая стилистика рельефа по всей «линейке» очевидна. Впоследствии эта

стилистика находила постоянное подтверждение, пока не стала достоянием всей глобальной рифтовой системы океанов. Попутно отметим, что была установлена идентичность морфологии осевых зон хребтов и провинции Восточно-Африканских рифтов. Определение осевой долины на гребнях СОХ как «рифтовой» обрело законное основание.

Открытие рифтовой долины в океане хотя и не положило конец дискуссиям о происхождении срединно-океанических хребтов, но существенно качнуло маятник в сторону идеи о их сбросовой тектонике. Во всяком случае мифология генезиса СОХ, подверстанная к концепциям геологии материков, была поколеблена.

Подходы к изучению рифтовой долины

Рифтовая долина интересна не сама по себе. У нее особый статус. Она — источник новых идей и представлений о геологии дна океана для широкого круга исследователей наук о Земле. В рифтовую долину устремились геологи всех мастей: тектонисты, геоморфологи, геофизики, геохимики, петрологи, литологи, а теперь еще и биологи и экологи. Фундамент, заложенный Хейзенем и Тарп, обзавелся мощной надстройкой нового знания геологии океанского дна.

Конечно, всех интересует главный вопрос: происхождение и развитие самой рифтовой долины, ибо его решение открывает для всех заинтересованных исследователей новые перспективы. Однако это непростая задача.

Современные подходы к изучению дна океана реализуются в океанографических экспедициях. Чаще всего в них проводятся комплексные работы, и бюджет времени для каждого направления ограничен. Не спасают и специализированные исследования: полигонные съемки и геолого-геофизические траверсы (комплексные исследования по заданному профилю). Необходимой детализации достичь не удается. Можно отработать сотни и тысячи полигонов. В каждом из них будут получены новые данные, открыты новые подводные горы, каньоны и другие формы рельефа, обнаружены различные сочетания горных пород и осадочных комплексов. Не будет только одного — понимания пространственных взаимосвязей форм подводного рельефа, геофизических параметров, элементов залегания коренных пород, особенностей их распределения. Но именно такие детали и характеризуют суть геологических процессов. Переход на подобный уровень и следовало осуществить.

С этой целью в начале 70-х годов прошлого века был учрежден стационарный полигон площадью 40 тыс. км² (поменьше Московской обл.), на котором исследования доводились до высокой степени детализации. Полигон расположен на гребне

САХ, южнее Азорских о-вов, на широте 36–37°. Программа исследований получила название ФАМОУС (Франко-американские подводные исследования срединно-океанических хребтов). Она продолжалась в течение нескольких лет. Пока, по большому счету, не удалось повторить столь масштабного предприятия. Объектом исследования стала рифтовая долина САХ.

Программа ФАМОУС включала надводные и подводные исследования. Лишь на первом этапе было выполнено 26 экспедиционных рейсов. Сверхплотная сетка промеров позволила составить батиметрическую карту с сечением изобат 10 м. Это и для нынешнего времени — большая редкость. Карта послужила основанием для последующих работ. Особенную ценность представляли буксируемые устройства «Си-Марк-1 и -2» Скриппсовского океанографического института (США), на которых были смонтированы эхолоты, сейсмографы, магнитометры, локаторы бокового обзора, фотокамеры. Устройства буксировались непосредственно над дном и с высокой разрешающей способностью измеряли его параметры. Удавалось, в частности, фиксировать углы наклона до 70° — достижение ранее не виданное. Только цветные фотографии исчислялись тысячами. На дне долины установили сейсмографы, контролирующие сейсмическую активность. Для передачи информации использовались гидроакустические буи, управляемые по радио. С помощью английского локатора бокового обзора «Глория» засняли весь район — получили акустическую фотографию дна. Результаты сейсмических опытов показали, что в пределах полигона происходит ежедневно 10–30 землетрясений различной магнитуды. Забегая немного вперед, отметим: важнейший вывод из наблюдений сейсмической активности состоит в том, что землетрясения не связаны с динамикой интрузий в осевой зоне рифтовой долины, а обусловлены сбросовыми дислокациями на ее склонах. Нельзя при этом воздержаться от замечания о практически непрерывной изменчивости микро- и мезорельефа на склонах рифтовой долины и невозможности зафиксировать морфологию указанных масштабов на длительное время. Другими словами, нельзя быть уверенным, что параметры подробной геологической съемки сохраняются неизменными хотя бы несколько лет.

Но это было лишь началом. На втором этапе в долину спустились глубоководные обитаемые аппараты (ГОА): французские «Циана» и «Архимед» и американский «Алвин». Предстояло провести непосредственные наблюдения на границе литосферных плит, в самом центре спрединга. Аппараты были оборудованы той же техникой, что и «Си-Марки». Дополнительно в носовой части «Алвина» закрепили звуковизор, который «видел» вдаль до 1.5 км и, подобно летучей мыши, избегал ненужных препятствий при выполнении различных измерений и отборе геологических проб.

Малый космос на дне океана

Первое, на что обратили внимание наблюдатели, — пологий свод, выгибающийся к центру спрединга и инкрустированный разнообразными формами рельефа. Среди них — центральные поднятия. Они получили громкие космические имена: Венера, Плутон, Уран, Сатурн, Юпитер. Гора Венера, например, имеет длину 3.7 км, ширину 1.1 км и высоту 250 м. Ее поверхность состоит из застывших потоков лавы, билатеральная ориентация которых указывает на трещинные излияния лавы. В сумме трещины занимают 6–8% от общей ширины дна долины. Ширина их колеблется от нескольких сантиметров до 8 м. Привлекают внимание своеобразные курганы, по форме напоминающие стога сена. Как предполагают исследователи, эти формы первичны, в совокупности они образуют центральные вулканические поднятия. Отмечалось, что центральные поднятия чередуются со столь же центральными депрессиями вдоль дна долины. В депрессиях преобладают тектонические трещины. Как оказалось впоследствии, подобные чередования вообще характерны на всем протяжении рифтовой долины. Со временем поднятия и депрессии меняются местами. Там, где были вулканические поднятия, сформировались депрессии, и наоборот. Очень похоже на ритмичную работу гейзера, когда период фонтанирования сменяется периодом покоя. Приходит на память библейская притча, в которой речь идет о зерне: «Не возродится, пока не умрет». Но проблема имеет более общее

значение, и в диалектике она предстает как основная категория — «отрицание отрицания», или как закон цикличности развития природных явлений. Этот закон нашел свое яркое воплощение в упомянутом чередовании вулканической и тектонической стадий в развитии дна рифтовой долины. По простирацию он реализуется в виде ячеистой структуры дна, а вкrest простираания — в формировании грядово-долинного рельефа на периферии. Американские геологи К.Макдональд и Т.Эвоттер предполагают, что «смена декораций» происходит в интервале 0.5–1 млн лет.

Особенно дискуссионным стал вопрос о происхождении провинции гряд и долин на периферии рифтовой долины. По этому поводу было выдвинуто несколько гипотез [3]. Однако объяснить переход от бровки склона рифтовой долины к первой долине рифтовых гор затруднительно. Нам представляется, что выход из этой туманной ситуации — сопоставление рельефа и аномалий силы тяжести в рамках рифтовой долины. На пике массы, когда создается центральное вулканическое поднятие, отрицательные аномалии силы тяжести в долине минимальные, и достижение изостатического равновесия на бровке склона происходит на более низком батиметрическом уровне, чем при сокращенной массе в тектоническую фазу развития. Разница батиметрических уровней при достижении изостатического равновесия в результате раздвижения плит и по закону цикличности определяет формирование грядово-долинного рельефа в провинции рифтовых гор (рис.4).

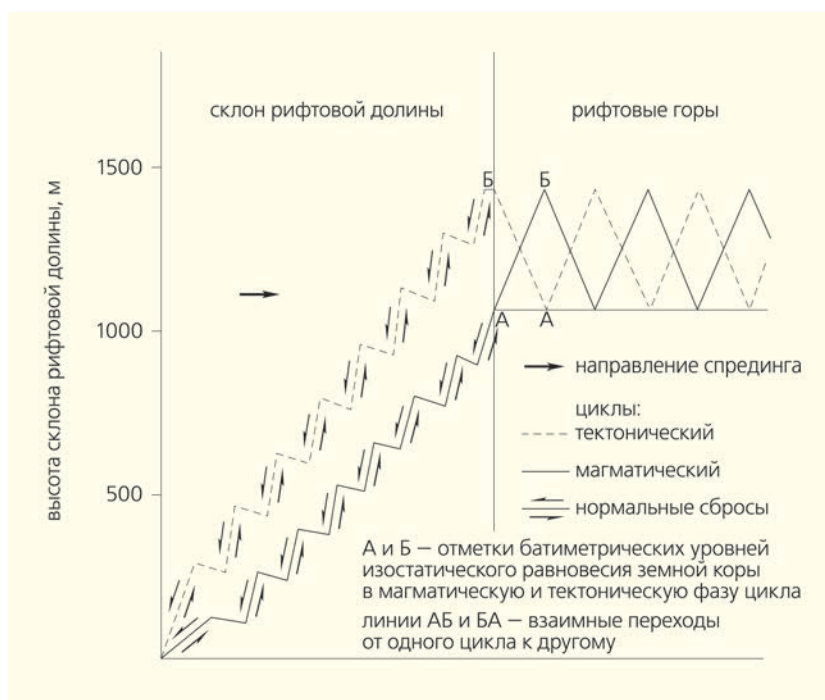


Рис.4. Принципиальная схема формирования гряд и долин в провинции рифтовых гор Срединно-Атлантического хребта [4].

Инструментальные определения магнитных свойств пород в центре спрединга показали, что все дно рифтовой долины лежит в пределах эпохи Брюнес с возрастом около 0.7 млн лет. Темпы расширения дна не превышают 2.4 см/год. При этом спрединг совершается асимметрично. Плиты относительно друг друга движутся с различными скоростями. Так было установлено асимметричное расширение дна океана.

Важнейшие результаты получены с батискафа «Архимед». Он погружался 30 раз. Отметим лишь два выдающихся достижения. На бровке трансформного разлома в районе работ были обнаружены гидротермальные отложения — красные, желтые, зеленые крупинки минералов железа и марганца. Это были вообще первые наблюдение и отбор проб цветных отложений — гидроксидов и сульфидов. А наблюдатели батискафа стали первыми, кому удалось увидеть ус-

тье гидротермального источника. Они же предположили и причины появления рудного вещества на поверхности — многократные сдвиговые деформации и нормальные сбросы, зондирующие земную кору до глубин 10–12 км. По плоскостям сбросов гидротермы выносятся на поверхность. Отметим, что погружения батискафа «Архимед» происходили за два года до открытия гидротермальных источников в Галапагосском рифте. Второе достижение — детальное изучение взаимодействия оси спрединга с горизонтальными сдвигами в трансформе, выявление линии миграции осевой линии трансформы вверх-вниз по склону и формирования нодальной впадины в зоне контакта структур спрединга и трансформы. Обилие обломочного материала в зоне их сочленения служит оценкой количества тектонических движений. На базе полученных данных французский исследователь К.Ле-Пишон сделал вывод о миграции трансформных разломов в поперечном направлении.

Мини-лодка «Алвин» выполнила в районе проведения ФАМОУС 15 погружений. Она прошла над дном долины 27 км. Точность каждого наблюдения или места отобранной пробы составляла не более 10–12 м. Напомним еще раз, точность обеспечивалась акустическими маяками, отвечающими на запросы надводных судов и подводных аппаратов (рис.5). «Алвин» отобрал 100 образцов, снял фильм, сделал 12 тыс. фотографий, обследовал и описал 200 больших и малых тектонических форм рельефа. Казалось бы, не так много, но с учетом беспрецедентной точности определения места, это был принципиально новый уровень исследования дна океана. Именно в те годы впервые появился классический рисунок склонов рифтовой долины, который представлял совокупность нормальных тектонических сбросов (рис.6). Как

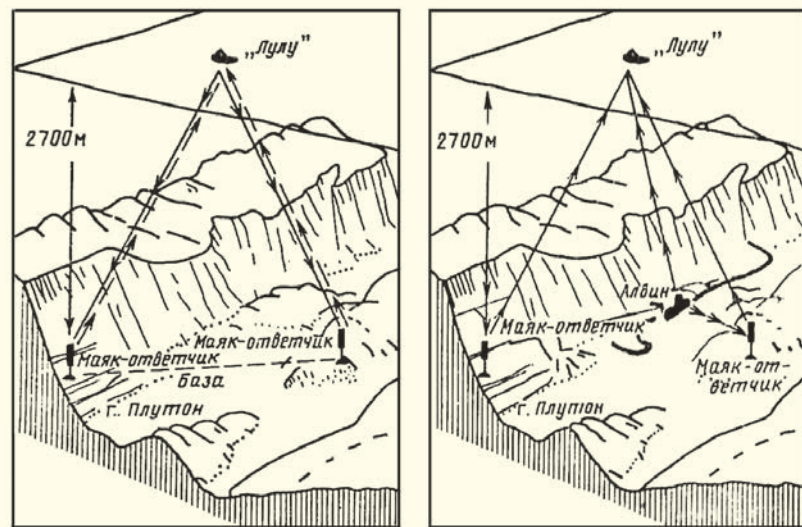


Рис.5. Схема координации подводных исследований на полигоне «ФАМОУС» [3].

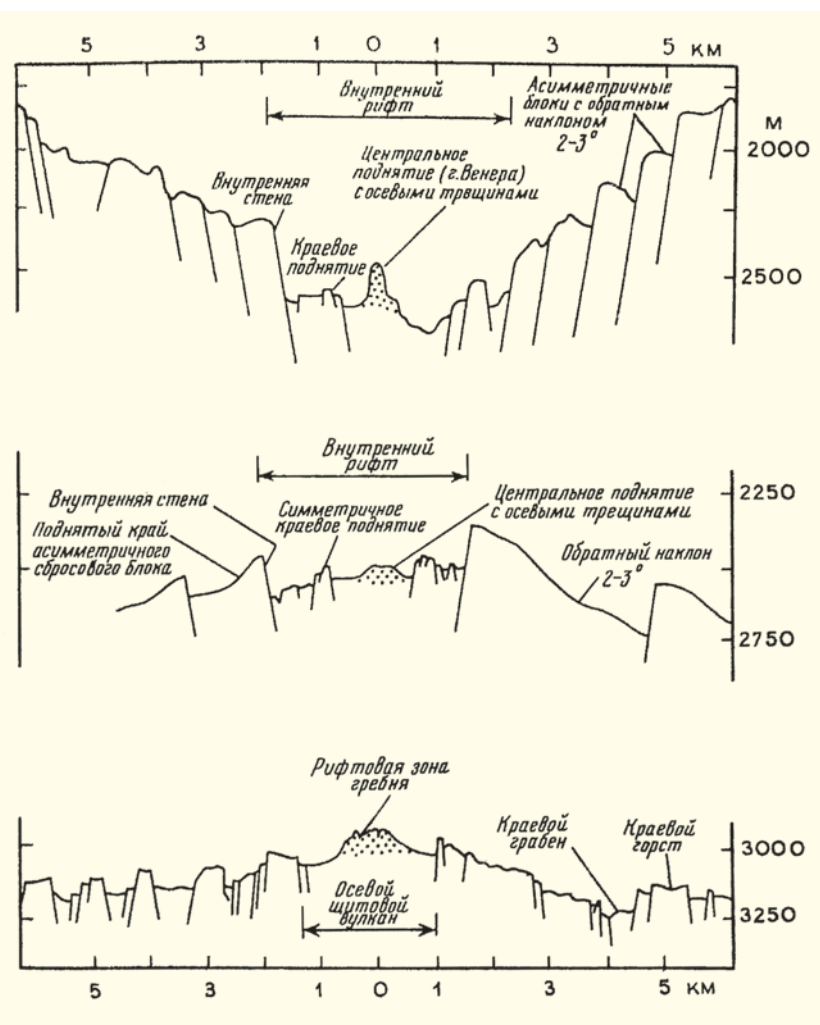


Рис.6. Морфологическая структура рифтовых долин в Атлантическом и Тихом океанах [5].

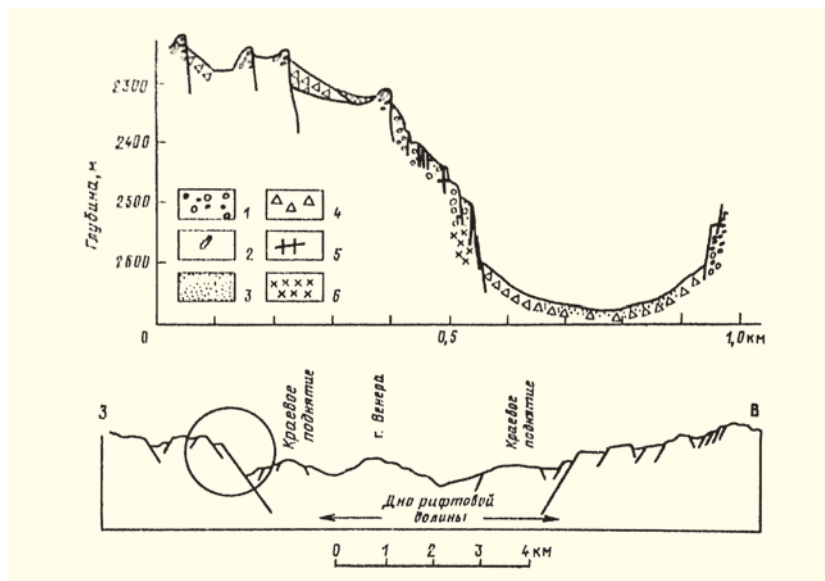


Рис. 7. Геологический разрез на склоне рифтовой долины по наблюдениям с глубоководного обитаемого аппарата «Алвин» [3]. Вверху — геологический разрез внутренней стены западного склона, внизу — поперечный профиль рифтовой долины и местоположение геологического разреза. 1 — подушки; 2 — валики; 3 — донные осадки; 4 — осыпи; 5 — дайки и силлы; 6 — брекчия.

пример уникального результата, полученного с борта «Алвина», отметим изучение геологического разреза на склонах рифтовой долины (рис. 7). Снизу вверх наблюдаются осыпи и каменные обнажения, в которые внедрены вертикальные пластины спекшейся брекчии. В пластинах обнаружена тонкая слоистость, образованная прежде в трещинах на дне долины. С отходом от центра спрединга трещины «оживали», и некоторые из них (совпадающие с плоскостями сбросов) превращались в зеркала скольжения. Массивные базальты переходят в пиллоу-лавы (по форме напоминающие подушки), срезанные плоскостью сброса. Высота изученного склона составила 350 м. Особенно заметна роль нормальных сбросов в формировании структуры склона. Весь рифт глубиной примерно 1,5 км создан исключительно подобными сбросами (см. рис. 6, 7).

Масса новейшей информации позволила по-новому взглянуть на многие вопросы, казалось бы, решенные с более общих позиций. Один из активных участников программы ФАМОУС, профессор Стэндфордского университета (США) Т. Ван Андел, писал, что в результате детализации исследований дна океана «мы быстро возвращаемся к тем временам, когда каждый уголок Земли имел собственную историю, очень слабо связанную с другими какими-либо общими законами». И далее: «А пока мы будем свидетелями того, как простой образ Земли, возникший в горячие, безрассудные дни, будет постоянно тускнеть». Так эмоционально предостерегает Ван Андел от поспешных заключений — окончательных и бесповоротных, которые свойствен-

ны некоторым сторонникам новых тектонических концепций. В столь впечатляющем откровении слышится пессимистическая нота, в том смысле что от нынешнего схематизма до понимания подлинных закономерностей строения дна океана — дистанция огромного размера [3].

Но, как бы то ни было, исследования продолжают. И сам Ван Андел являет собой образец энтузиаста изучения морских глубин. Вспоминается экспедиция, которую он возглавил в 1968 г. на научно-исследовательском судне «Арго». Это — один из первых геотраверсов в Южной Атлантике: от Луанды (Ангола) до Форталезы (Бразилия). Экспедиции был придан символ «CIRCE». Сама по себе данная аббревиатура переводится как Цирцея — волшебница. Цирцея проживала на о. Эя в Эгейском море. И во время возвращения Одиссея из дли-

тельного плавания задержала его у себя примерно на год. Так что вернулся он к Пенелопе с небольшим опозданием. Возможно, геотраверс на «Арго» как-то ассоциировался с плаванием Одиссея. Отсюда аналогия с греческой мифологией.

Одним из результатов экспедиции стало открытие структурной асимметрии Срединно-Атлантического хребта в Южной Атлантике (ЮАСХ). Его восточный фланг оказался выше западного. Подобная «кривобокость» противоречила жестким канонам только что зарождавшейся тектоники литосферных плит, согласно которой структура одного фланга должна быть зеркальным отражением другого. На этом настаивал Ле-Пишон — основоположник и энтузиаст новой концепции.

Кроме того, на флангах хребта не было обнаружено и структурно-морфологических двойников. Так, на начальном этапе существования новой геологической парадигмы в ее канонических основах отмечались существенные противоречия.

На пересечении гребня САХ вместо обычной осевой долины был обнаружен веер неглубоких продолговатых впадин, среди которых вычленив осевую долину оказалось трудно. Совокупность относительно мелких долин, расчленяющих осевую долину хребта, получила, с подачи Ван Андела, название BULGE — расчлененный вулканический купол-свод, венчающий гребень ЮАСХ. Впоследствии, при исследовании рифтовой зоны ЮАСХ, нам приходилось встречать подобные формы рельефа и в других сегментах хребта (рис. 8). Тем самым подвергается сомнению закономерность, по которой глубокие рифтовые долины согласуются

с медленным расширением дна (1–4 см/год), долины средней глубины — со средними темпами (4–8 см/год) и слабовыраженные — с быстрым расширением (от 8 до 18 см/год). Схему зависимости морфологии рифтовых долин от темпов спрединга следует рассматривать лишь как частный случай. По подсчетам К.Макдональда и Б.Луендига, средние темпы спрединга эквивалентны скорости роста ногтей у человека.

Отмеченные выше противоречия свидетельствуют о том, что судьбу облика рифтовой долины и даже ее существование решают не темпы расширения, а темпы поступления магматического материала из глубин мантии Земли. Если нет магмы, то можно расширять дно хоть по метру в день, но объяснить структурно-морфологические различия рифтовых зон при этом затруднительно. Как сопрягается интенсивность снабжения магмой с темпами спрединга, еще предстоит выяснить. От этого будет зависеть и подробная классификация рифтовых долин, определение их разновидностей.

Изучая морфологическую структуру ЮАСХ, мы обратили внимание на один парадокс — существование идеальной симметрии дна Южной Атлантики при асимметричном раздвижении литосферных плит. Для примера рассмотрим сложившуюся там ситуацию, когда, по данным геодинамики, Американская плита перемещается к западу со скоростью ~2.3 см/год, а Африканская — со скоростью 1.9 см/год [6]. Из этого следует, что Американская плита за весь период спрединга (~140 млн лет) прошла путь примерно на 600 км больше Африканской, т.е. центр спрединга при таких исходных данных никак не может сохраняться посередине дна Южной Атлантики. Выбор аргументов для приведения в соответствие асимметрии спрединга с фактической симметрией дна Южной Атлантики — небольшой, а скорее всего — единственный. Центр спрединга должен мигрировать на запад со скоростью ~2 мм/год. В этом случае скорости обеих плит сравниваются на значении 2.1 см/год. Несложные вычисления показывают, что за весь период спрединга его мигрирующий центр должен отчленивать от Американской плиты ~300 км земной коры и присоединить

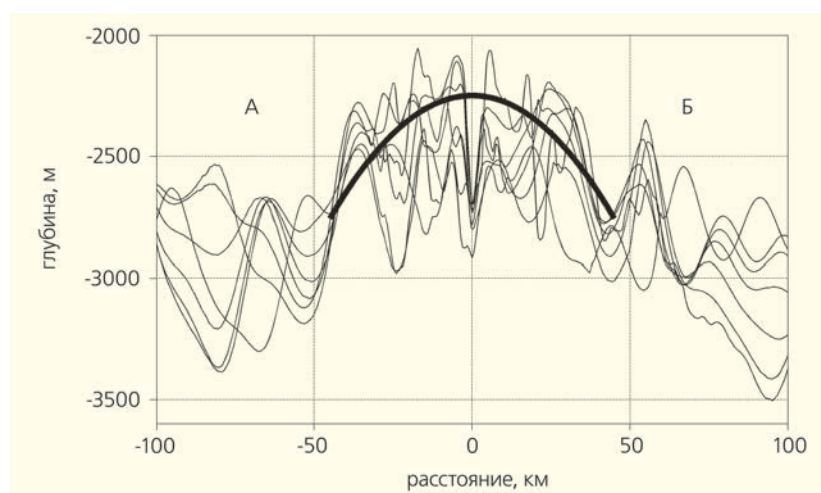


Рис.8. Осевой вулканический массив, расчлененный веером рифтовых долин.

единить их к Африканской. Такой итог при заданных условиях представляется закономерным. Вопрос в другом: насколько равномерно происходит джампинг центра спрединга (перемещение центра спрединга, прерывистое и скачкообразное, стали называть «джампингом», от английского слова jump — прыжок, перескок). Не каждые же 2 мм/год! Скорее всего — нелинейно. Возможно, один перескок от другого отделяется миллионами лет. При очередном перескоке к малоскоростной плите присоединяются фрагменты коры, намагниченной в более скоростной смежной плите. Какие корректировки магнитной шкалы должны при этом произойти? Вопрос не праздный, тем более что достоянием менее скоростной плиты могут оказаться крупные намагниченные блоки скоростной плиты. Отметим, что 300 км переходной коры (от одной плиты к другой) — величина кумулятивная (рис.9).



Рис.9. Принципиальная схема асимметричного спрединга в Южной Атлантике. Компенсация и декомпенсация коры происходит изначально путем джампинга со стороны Африканской плиты с отчленением фрагментов Американской. Загадка, пока не разрешимая, заключается в режиме джампинга, скорее всего, нелинейного. Продолжительность спрединга — 140 млн лет, скорость движения Американской плиты — 2.3 см/год, Африканской — 1.9 см/год.

Как в этом «зазоре» распределяются отдельные перескоки, можно будет определить лишь при дальнейших исследованиях морфоструктуры акустического фундамента. Однако неизбежно следует вывод: вся рифтогенная земная кора (океаническая) представлена двумя структурными типами: более однородной, связанной со скоростной плитой, и расчлененной, «расклиненной», которая характерна для менее скоростной плиты. Другими словами, следствие любого спрединга дна океана — постоянное воспроизведение геометрической симметрии и формирование структурной асимметрии океанической земной коры. А сама геометрическая симметрия представляет собой природную константу. Тем самым решается проблема структурной асимметрии ЮАСХ, которая со времен Ван Андела оставалась загадкой. Но и здесь не без вопросов. Если центр спрединга перемещается, то откуда берется центрированное расположение магнитных аномалий по отношению к его современному положению? На это еще предстоит ответить.

Не слишком отклоняясь от предмета статьи, отметим, что по следам детального изучения рифтовой долины по программе ФАМОУС подобные исследования развернулись и в других океанах.

Гидротермальные источники в рифтовой долине

С момента открытия рифтовой долины исследования в ее пределах проводились в традиционных рамках морской геологии. Ничто не предвещало того, что океанология стоит на пороге нового знания, открывающего широкие горизонты науки об океане. Оказалось, что существует мощная жизненная энергия, которая поступает из глубин литосферы, создает крупные минеральные скопления и новые экосистемы Земли, неизвестные практически до конца XX в. Рифтовая долина предстает оазисом плодородия, где интенсивные рудопроявления соседствуют с неизвестной ранее морской фауной, в концентрациях живых организмов превышающей любые другие биоценозы на дне океана. Поистине все перевернулось вверх дном. Новый аспект исследований стал едва ли не главным приоритетом в изучении океанского дна.

Напомним, что впервые устье гидротермы увидели из батискафа «Архимед» в 1974 г. в районе проведения ФАМОУС. Но лишь два года спустя, в мае 1976 г., по фотографиям с буксируемого устройства «Ангус» в Галапагосском рифте удалось распознать необычных представителей фауны гидротермальных источников. Это были моллюски и крабы, которые поражали своими размерами — до 15–18 см. До этого встречались особи размером не более 3 см. В феврале 1977 г. в тот же рифт опустился уже знакомый нам «Алвин». На его борту находились известный нам Ван Андел и его напарник Д.Корлисс. Именно они и бы-

ли первыми, кто воочию наблюдал неведомых ранее обитателей рифтовой долины.

Возможно, с этого первого погружения в Галапагосский рифт и следует вести хронологию систематических исследований гидротерм и связанных с ними природных явлений. На начальных этапах визуальных наблюдений было обнаружено четыре кратера размерами 30–100 м, из которых постоянно выбивались струи теплой воды. К слову сказать, открытию гидротерм в Галапагосском рифте предшествовали исследования температуры придонной воды, которая в этом районе оказалась выше, нежели наверху. Интересный способ поиска гидротерм применили геохимики, обнаружившие в пробах воды изотопы ^3He — надежного индикатора активности гидротерм.

В гидротермах обитали гигантские моллюски, новый отряд трубчатых червей — погонофор диаметром до 25 мм, новый вид змеевидной рыбы и др. Обнаружены были и мертвые сообщества организмов — танатоценозы. По изотопным исследованиям определили возраст раковин — 10–20 лет. По-видимому, с такими же интервалами времени появляются и исчезают струи теплой воды, отмирая и возрождаясь с небольшими отклонениями от прежних дислокаций. Гидротермальные отложения на самой оси рифта (за редким исключением) не образуются, но располагаются рядами холмиков на его периферии — до 18–20 км от центра спрединга. Линейные ряды холмов указывают на их взаимосвязь с тектоническими сбросами.

На сегодняшний день написаны тысячи статей и сотни монографий по разным направлениям изучения рифтовой долины, которая превратилась в настоящую Мекку для морских геологов, биологов и экологов. Из первоначальных шагов по изучению долины необходимо отметить погружение в марте 1979 г. «Алвина» и «Сиены» в рифтовую зону Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП), на выходе из Калифорнийского залива. Там обнаружили примерно такую же фауну, что и на Галапагосах. Был сделан вывод, что она не уникальна. Забегая несколько вперед, отметим, что после открытия гидротермальной фауны в рифтовой долине Атлантики этот тезис оказался не вполне корректным. Здесь в глубоких рифтовых долинах обнаружили эндемичную фауну, отличную от фауны других регионов. Акванавты Макдональд и Луендик так описывают свои впечатления: «Когда мы спустились на гидротермальное поле, вид его напомнил картины из фильмов ужасов. Крупные белые моллюски размером до 30 см гнездились между черными пилоу-лавами. Белые крабы слепо перебегали по вулканическому неровностям, гигантские трубчатые черви длиной до 3 м извивались в воде. Вся эта живность сосредоточена в плотных колониях, окружающих устья гидротермального источника. Красные верхушки погонофор и красный цвет моллюсков свидетельствовали об окислении гемоглобина в их крови» [7].

В другом месте те же исследователи обнаружили трубообразные постройки до 10 м высотой и диаметром 40 см. Из них выбивались и фонтанировали черные горячие растворы, насыщенные сульфидами. Наблюдатели назвали эти сооружения черными курильщиками. Температура растворов в них составляла 350°C. Они не кипели, поскольку на них давил столб воды 2750 м. Отложения вокруг построек состояли из сульфидов железа, меди, цинка и сульфатов кальция и магния. Была отмечена большая роль гидротермальных источников в создании модели химизма океана. Уместно в связи с этим напомнить, что в свое время академик В.И.Вернадский определил соленость морской воды как мировую константу. Теперь есть предположения, что каждые 8 млн лет весь объем океанских вод проходит по лабиринтам коры и мантии Земли под океаном. Называют и другие подобные цифры. Но это никак не отражается на определении солености Вернадским, поскольку современное природное равновесие и химический состав океанских вод устанавливались в течение десятков миллионов лет, в том числе и при участии гидротермальных процессов.

Как ни странно, гидротермальные источники в рифтовой долине Атлантики были обнаружены с опозданием почти на 10 лет. Большая заслуга в их открытии принадлежит американскому геохимику П.Рону. В 1985 г. он обнаружил гидротермы в центральной части Северной Атлантики. На базе его исследований проведено бурение (ЛЕГ106 бурового судна «JOIDES Resolution»). Здесь постройки курильщиков достигали 11 м в высоту и 1 м в диаметре. Это гидротермальное поле назвали Snake Pit (Змеиная яма), поскольку в окрестностях источников преобладали креветки и змеевидные рыбы. За свои работы Рона удостоен медали Френсиса Шепарда — основоположника морской геологии.

Летом 1988 г. в рифтовую долину САХ спустились советские исследователи на подводном аппарате «Мир». Они обнаружили крупное месторождение сульфидных руд (рис.10). С тех пор открытия гидротермальных полей продолжались и продолжают. Сейчас во всех океанах открыто 280 активных гидротермальных источников. Можно предположить, что типичные тектономагматические условия в рифтовой зоне таковы, что и в дальнейшем обнаружение гидротермальных полей продолжится.

Природа таких месторождений в разных океанах не одинакова. На ВТП глубинная лава свободно изливается на поверхность, образуя форму так называемого астеносферного зеркала.

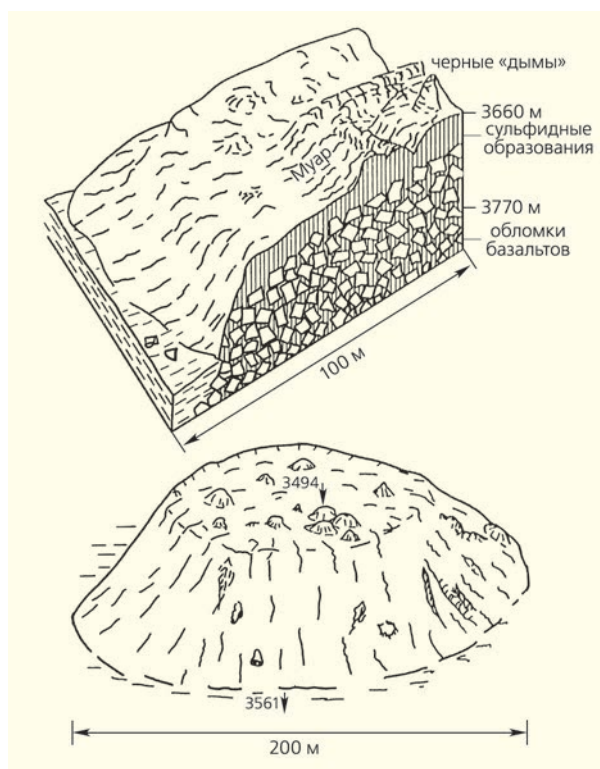


Рис.10. Гидротермальные постройки в рифтовой зоне Атлантики (по А.П.Лисицыну).

На рис.11 показаны гидротермальные постройки во впадине Гуаймас (Калифорнийский залив), обнаруженные с российских подводных аппаратов «Пайсис» и «Мир». Поражает разнообразие и причудливость внешнего облика построек. Они напоминают обелиски, пагоды, трубы органа высотой более 20 м, из которых поднимаются черные дымы. На поверхности этих сооружений видны бактериальные обрастания — маты, которыми питаются

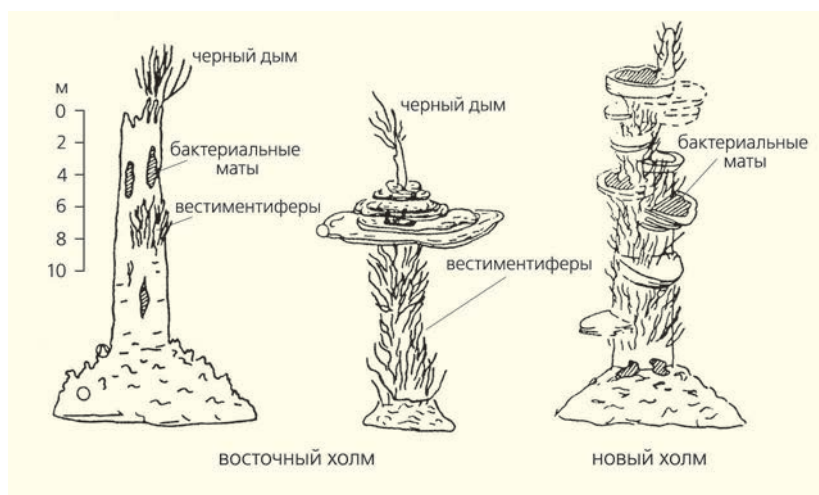


Рис.11. «Черные курильщики» в рифтовой зоне Калифорнийского залива [8].

прикрепившиеся к постройкам организмы [8]. В медленноспрединговых хребтах гидротермальные источники чаще всего выбиваются с больших глубин земной коры по плоскостям сбросов, которые и образуют склоны рифтовой долины. Здесь важно понимать, что растворы могут поступать из-под базальтовых горизонтов, т.е. из пород мантии, просачиваясь по плоскостям сбросов. Эти флюиды обладают другим химическим составом, нежели растворы из базальтов. В частности, в них обнаружено повышенное содержание кобальта и золота, что подогревает интерес к глубинным источникам. При серпентинизации перидотитов серпентиниты могут выжиматься на поверхность, что в свое время не давало покоя Хессу. Российские ученые А.М.Сагалевич и Ю.А.Богданов из иллюминатора подводного аппарата «Мир» наблюдали, как идет накопление сульфидов на субгоризонтальных площадках дна, у подножия видимой части сброса. Можно сказать, что и в Тихом океане тектоническое сбросообразование определяет круговорот гидротермальных процессов. Например, на ВТП, у выхода из Калифорнийского залива, гидротермальные отложения обнаружены не на вершине гребня, а на его периферии, где заканчивается вулканическая зона и начинается переход к области тектонических трещин. Прямо по границе этих двух тектономагматических провинций и выстроены холмики гидротермальных отложений.

Причины формирования рудных месторождений до конца не выяснены. Мы связываем генезис гидротермальных полей с тектонизацией дна и склонов рифтовой долины. Чем она интенсивнее, тем глубже зондирование земной коры и тем более вероятно накопление сульфидов в соответствующих ареалах [10, 11]. В подтверждение этих тезисов для каждого из открытых гидротермальных полей Атлантики — Рейнбоу, Броккен-Спур,

Таг, 24°30', Снейк-Пит, Логачев — были составлены схемы рельефа по специально разработанной методике, которая позволяет выделять сегменты тектонической и магматической специализации. Оказалось, что максимальное развитие гидротермального оруденения связано с морфоструктурой тектонической направленности, которая характерна для данных полей (рис.12,а). Там, где рифтовая долина залита вулканической лавой с выравниванием рельефа и консервацией трещин, открытие гидротермальных источников менее вероятно (рис.12,б). Другими словами, круговорот гидротермальных процессов определяется формированием преимущественно тектонической морфоструктуры.

Говоря о необъятных рудных полях дна Мирового океана, не следует забывать, что гидротермы образуются не только в рифтовых долинах, но и в зонах трансформных разломов. В таком случае обобщенный вид региональной или даже глобальной картины гидротермального оруденения будет представлять чередование субширотных полос трансформов, которые обогащены рудным веществом, и расположенных между ними рифтовых сегментов. Гидротермальные отложения обнаружены не только в современных рифтовых зонах, в качестве «свежеиспеченных», но и путем драгирования вдалеке от рифтов и трансформов — уже как подлинно полезные ископаемые.

Важное следствие изучения гидротермальных источников — изменение представлений о потерях тепла через океан. Американские исследователи Г.Ричардз и М.Стренс полагают, что конвективный отвод тепла из недр термальными водами составляет 25% общих потерь тепла Земли. По этой причине представления о повышенном тепловом потоке в осевой части срединных хребтов существенно преувеличены [11].

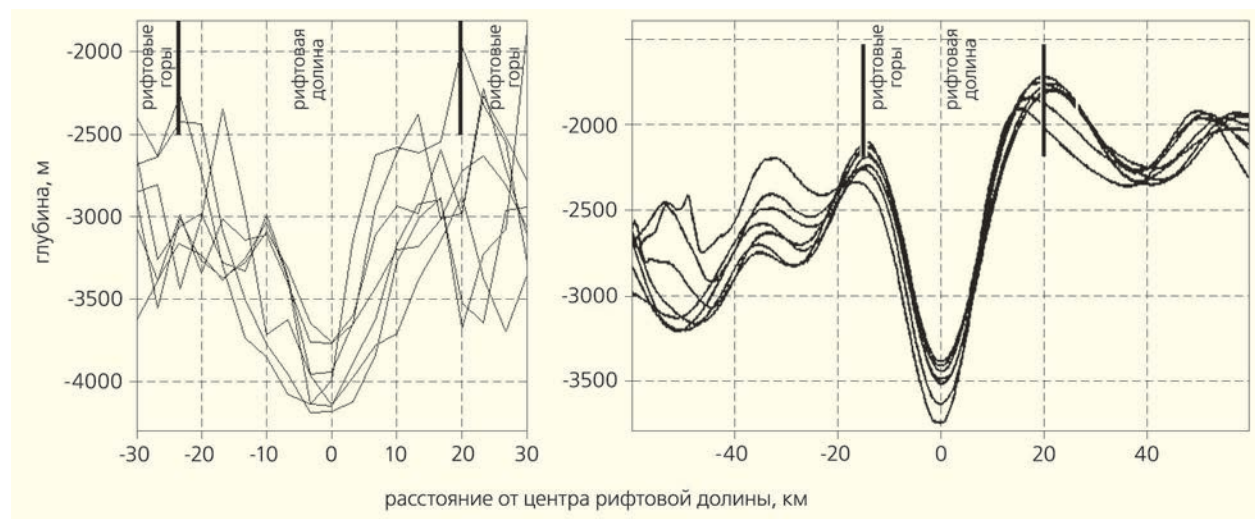


Рис.12. Сравнительная характеристика морфоструктуры рифтовой зоны тектонической (слева) и магматической (справа) направленности.

Об экологии и практических приложениях исследований рифтовой долины

Открытие гидротермальных источников и неизвестной фауны буквально совершило переворот в биологии дна океана. Обобщенная статистика прошлых лет говорит о том, что в прибрежной литоральной зоне на 1 м² может приходиться 5000 г живых организмов. На шельфе плотность жизни сокращается до 200 г/м², а на абиссальных глубинах дно представляет собой косную, почти бесплодную пустыню. Это объясняется тем, что количество пищи от поверхности до глубины 6 тыс. м уменьшается в 7 тыс. раз. Изучение фауны в зонах действия глубинных гидротермальных источников показало: здесь может создаваться биомасса до 10 кг/м², что превышает масштабы развития живых организмов в других частях океана.

Не углубляясь в детали создания столь высоких концентраций органического вещества, отметим, что оно, в отличие от фотосинтеза, напрямую связано с процессами хемосинтеза. Хемосинтезирующие бактерии, подобно хлорофиллу, создают путем преобразования CO₂ условия для возникновения органического вещества, а геотермальная фауна питается бактериями, отфильтровывая их из воды и слизывая бактериальные маты с твердого субстрата. Бактерии-симбионты, поселяющиеся на других организмах, активно развиваются в различных условиях. Особенно поражает их «безразличие» к насыщенным растворам, в которых присутствуют тяжелые металлы и ядовитые химические соединения. Но именно такие условия, смертельные для большинства организмов, интенсифицируют бактериальные процессы, направленные на создание органического вещества. Автотрофные бактерии появляются на поверхности дна из «подповерхностной» биосферы. Российские биологи М.Е.Виноградов и А.Л.Верещака выделяют в экосистеме любого гидротермального поля отдельные зоны: от выхода горячих, слабо-разбавленных водой флюидов до курильщиков с черными дымами и областями повышенной мутности. Те же исследователи установили, что в рифтовой долине северной части Атлантики выявлены глубоководные сообщества, едва ли не на 100% (на 84.6%) эндемичные. Что-то вроде того: сами никуда не ходят и чужих не пускают. Живут и умирают на одном пятачке размером 30–100 м. Изотопные исследования указывают на возраст мертвых раковин моллюсков — примерно 20 лет. В таком интервале времени происходит смена поколений, обусловленная миграцией струй горячих растворов по трещиноватому субстрату гидротермальных полей. Нельзя исключить, что подобные сообщества гидротермальной фауны связаны и с проникновением морской воды по трещинам и плоскостям сбросов до глубин, где она контактирует не только с вулканическими породами, но и с глубинными (перидотитами). При

этом она приобретает другие химические свойства. С этой точки зрения целесообразна организация специализированных геолого-биологических исследований в морских экспедициях, тем более что по видовому составу гидротермальная фауна рифтовой долины Атлантики отличается от фауны Тихого и Индийского океанов. Экологический аспект изучения гидротермальной фауны важен и для решения наиболее общих научных проблем, таких, например, как происхождение жизни на Земле и других планетах.

Несколько слов о проблеме практического освоения месторождений сульфидов. Их оценка свидетельствует о гигантских масштабах формирования сульфидных руд на дне рифтовой долины. В Галапагосском рифте оконтурено месторождение длиной 1 км, шириной 150 м и высотой 35 м. Такие рудные массивы соизмеримы с крупными офиолитовыми рудными месторождениями на материках. Например, с Кипрским месторождением, содержащим 15 млн т сульфидных минералов. Некоторые авторы отмечают, что всего лишь три черных курильщика за 800 лет могут обеспечить формирование месторождения запасами до 3 млн т [11].

Если это так, то появляется искушение начать практические действия по добыче гидротермальных руд. Хорошо, если просто искушение. Строятся конкретные планы проведения подобных работ под знаменем Международного органа по морскому дну (МОМД). И не только планы. Заключаются контракты на разведку полиметаллических руд в так называемом Районе. Сам Район представлен совокупностью прямоугольников субмеридиональной ориентации, которые подразделяют рифтовую долину на сегменты национальной юрисдикции. Так, Россия имеет преимущественное право на изучение и разведку сульфидных рудопроявлений в Атлантике между 12.5 и 21° с.ш. Правда, другим странам не закрыт доступ к изучению этого уникального явления природы. Но сам факт заключения контракта предполагает использование всех результатов исследования в интересах страны, указанной в нем. «Вполне вероятно, что через 15 лет здесь могут начаться мероприятия по добыче» [12]. Впрочем, в южной части Тихого океана, в бассейне Манус, уже подготовлено к эксплуатации подобное месторождение.

Коснемся кратко данной перспективы. Был уже такой прецедент. В 80-х годах в Тихом океане, опять же под покровительством МОМД, развернулись исследования железомарганцевых конкреций (ЖМК) с целью дальнейшего практического их использования. Советский Союз принял в этом самое деятельное участие. Работы проводились в районе Клиппертон (по названию известного разлома в этой части Тихого океана). Мне пришлось участвовать в исследованиях как сотруднику Акустического института. В те годы наш институт располагал новейшими акустическими и океанологическими средствами для подобных работ.

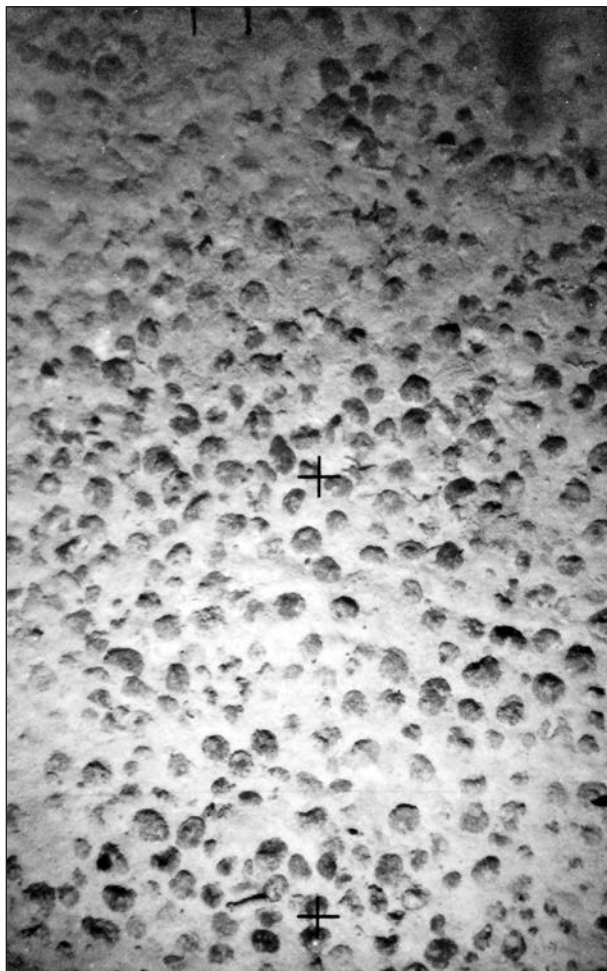


Рис.13. Железомарганцевые конкреции на мягкой подушке тонкодисперсного ила.

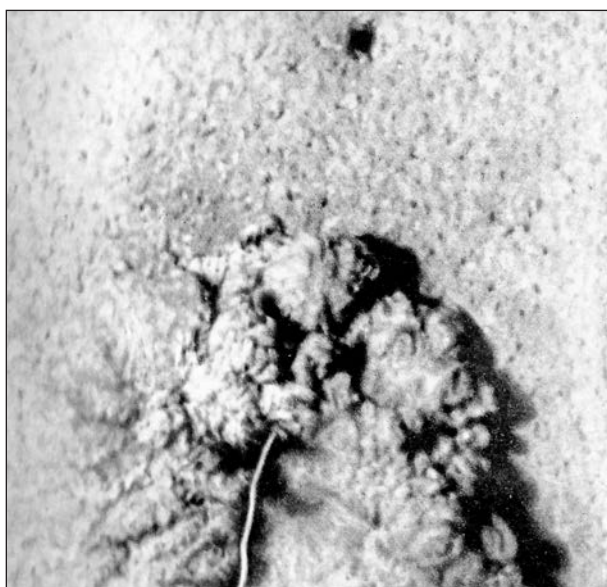


Рис.14. Облако взмученного ила от мгновенного прикосновения груза-разведчика, включающего вспышку фотокамеры.

В частности, мы получили акустические изображения дна океана и тысячи широкоформатных стереоснимков с изображением ЖМК и установили закономерности их распространения в Районе. И это был, к счастью, один из немногих позитивных результатов от всей, на наш взгляд, бюрократической затеи. Проект перестал существовать. Нетрудно представить последствия такого, мало сказать, сомнительного проекта, подлинную экологическую катастрофу. Что имеется в виду? ЖМК чаще всего залегают на подушке тонкодисперсного ила (рис.13). На фотоснимках дна нам пришлось наблюдать, какие облака мути поднимались всего лишь при касании миниатюрного груза, включающего вспышку нашей стереофотоустановки (рис.14). Теперь представим себе, что дно начинают перепахивать гигантскими промышленными агрегатами, а затем поднимать «улов» на-гора, с глубины 4–5 км. Вся толща воды окажется во власти мути, а с учетом течений эта муть распространится и на другие пространства океана. Эффект от такого «практического» использования ЖМК можно сравнить разве что с ядерной зимой. Это не преувеличение. Замутнение вод океана фактически нарушит всю трофическую цепь (от мельчайших планктонных организмов до гигантских морских животных), сложившуюся за миллионы лет. Недостаток солнечной энергии не позволит развиваться микроскопическим водорослям, вырабатывающим кислород, которого океан производит ни много ни мало 50% от всего количества на земном шаре.

Еще один момент следует учитывать. В 50-е и последующие годы на дно океана были сброшены тысячи контейнеров с радиоактивными отходами. Контейнеры «сгнили», а отходы, естественно, сохранились. Придонные течения разнесли их по дну океана, а тончайшие частицы донных отложений абсорбировали. Так океан отправил радиоактивные отходы на вечное хранение. Технологи-добытчики могли бы «вызвать» их из небытия и повторно насытить ими водную толщу.

Нечто подобное может происходить при добыче сульфидов. Нарушится природное равновесие океана, которое устанавливалось миллионы лет. Возникает вопрос, стоит ли овчинка выделки? Может быть, оставить Океан в покое до лучших времен? Он же наш второй Спаситель!

* * *

В заключение еще раз подчеркнем, рифтовая долина в океане — начало всех геологических начал, а ее дальнейшее изучение — залог фундаментальных знаний о земной коре океанского дна и ее глубинном строении. Рифтовая долина, как река животворящая, рождает новую жизнь с несметным разнообразием живых существ, получающих свое пропитание не сверху, а из глубин литосферы, благодаря постоянно действующему источнику энергии, который функционирует миллионы лет. ■

Статья написана по результатам работ, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 04-05-64887, 07-05-00422, 10-05-00196, 13-05-00513 и 96-05-78094).

Литература / Reference

1. Хесс Х.Х. Серпентиниты, орогенез и эпейрогенез. Земная кора. М., 1957: 403–422. [Hess H.H. Serpentinities, orogenesis and epeirogenesis. Crust of the Earth. Baltimore, 1955.]
2. Хейзен Б., Тарп М., Юинг М. Дно Атлантического океана. Перевод с англ. А.В.Ильин. М., 1962. [Heezen B.C., Tarp M., Ewing W.M. The Floors of the Oceans. New York, 1959.]
3. Ильин А.В. Изменчивый лик глубин. Проблема изученности дна океана. М., 1996. [Ilyin A.V. Variable Face of the Deep. The Problem of the Ocean Floor Study. Moscow, 1996 (In Russ.).]
4. Ильин А.В. Происхождение и развитие морфоструктуры рифтовой зоны медленно-спрединговых срединно-океанических хребтов. Океанология. 2010; 50(2): 262–276. [Ilyin A.V. Origin and Development of the Morphological Structure of the Rift Zone of Slow-Spreading Mid-Ocean Ridges. Oceanology. 2010; 50(2): 240–253.]
5. Needham H.D., Francheteay J. Some characteristics of the rift valley in the Atlantic Ocean near 36°48' North. Earth and Planet Sci. Letters. 1974; 22: 29–43.
6. Дубинин Е.П., Ушаков С.А. Океанический рифтогенез. М., 2001. [Dubinin E.P., Ushakov S.A. Oceanic Riftogenesis. Moscow, 2001. (In Russ.).]
7. Macdonald K.C., Lyendik B.P. The crest of the east Pacific Rise. Scientific American. 1981; 244(5): 110–117.
8. Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Геологические исследования с глубоководных аппаратов «Мир». М., 2002. [Bogdanov Yu.A., Sagalevich A.M. Geological Investigations with Deep Submersibles «MIR». Moscow, 2002 (In Russ.).]
9. Ильин А.В. Структурно-геоморфологическая позиция гидротермальных месторождений Срединно-Атлантического хребта. Докл. АН. 2004; 396(6): 823–827. [Ilyin A.V. The Structural and Geomorphological Setting of Hydrothermal Deposits on the Mid-Atlantic Ridge. Doklady Earth Sciences. 2004; 397(5): 686.]
10. Ильин А.В. Морфоструктура Южно-Атлантического хребта в районе горячей точки Тристан-да-Кунья. Докл. АН. 2016; 468 (4): 429–432. [Ilyin A.V. The Morphostructure of the South Atlantic Ridge in the Tristan da Cunha Hot Spot Area. Doklady Earth Sciences. 2016; 468(2): 549.]
11. Richards H.G., Strentz M.R. Ocean floors hot springs. Sci. Prog. Oxf., 1985; 69: 341–358.
12. Егоров И.В. Новые задачи геоморфологических исследований на Срединно-Атлантическом хребте, в связи с поисками и разведкой субаквальных месторождений металлических сульфидов. Геоморфология. 2014; (2): 24–30. [Egorov I.V. A New Chief Tasks of the Geomorphological Researches on Mid-Atlantic Ridge in Connection with Searches and Prospect of Undersea Sulfide. Geomorphology. 2014; (2): 24–30.]

Rift Valley as the Key Structure of the Sea Floor

A.V.Ilyin

N.N.Andreyev Acoustics Institute

The rift valley is the fundamental structure of the sea floor. That is where the Earth crust is now in prospect and development. This paper deal with the problems of marine geomorphology and geology taking into account the data of rift valley research obtained in the course of major scientific programs such as FAMOUS – Franco-American Research of Mid-Atlantic Ridge, and Fundamental Research of Hydrothermal Sediments in Rift Valleys.

In his original exploratory work the author has touched upon the problems of the rift zone and its close periphery's morphostructure origin. The questions of ecology and practical cultivation of rift valley hydrothermal sediments are being considered in correlation with the author's concept of prospecting hydrothetmal deposits.

Key words: rift valley, lithospheric plates, Earth crust, spreading, hydrothermal sources, morphostructure, ecology.

Каким может быть будущее Аральского моря?

Н.В.Аладин¹, З.К.Ермаханов², Ф.Миклин³, И.С.Плотников¹

¹Зоологический институт РАН (Санкт-Петербург, Россия)

²Аральский филиал ТОО «Казахский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства» (Аральск, Казахстан)

³Западно-Мичиганский университет (Каламазу, США)

В прошлом Аральское море, расположенное в пустынной зоне Средней Азии на территории Казахстана и Узбекистана, было вторым по величине континентальным бессточным соленым водоемом после Каспия. В Арал впадают только две реки — Сырдарья и Амударья, которые служат для него главным источником воды. С 1960 г. началось высыхание Аральского моря. Это произошло из-за резкого сокращения речного стока в результате возрастающего забора воды на орошение. Образовавшийся дефицит водного баланса привел к быстрому падению уровня моря, сокращению его площади и росту солености. В обозримом будущем возвращение Арала к его первоначальному состоянию крайне маловероятно. Даже если увеличить среднегодовой речной сток до прежнего, то полное восстановления озера займет примерно 100 лет. Однако возможно частичное сохранение остаточных водоемов. Предполагается продолжить восстановление Малого Арала. Существует план поднять уровень воды в одной из его частей — заливе Большой Сарычеганак. Для этого нужно построить в горле залива плотину и проложить канал для подачи воды из Сырдарьи. Альтернативой этому варианту может стать реконструкция Кокаральской плотины. Если же удастся увеличить сток Амударьи и перенаправить его в Западный Большой Арал, то и этот водоем еще может сохраниться.

Ключевые слова: Аральское море, Амударья, Сырдарья, соленость, водный баланс, фауна.

Проблемы Аральского моря получили широкую международную известность в годы перестройки. Именно тогда стало ясно, что одно из крупнейших соленых озер высыхает и осолоняется из-за того, что воды впадающих в него рек — Амударьи и Сырдарьи — разбираются на орошение и только небольшая их часть доходит до озера. В 1988 г. благодаря давлению общественности была проведена экспедиция «Арал-88», которую возглавил С.П.Залыгин. Вскоре после этого было принято постановление ЦК КПСС №1110 по сохранению Арала.

В 1992 г., уже после распада СССР, усилиями пяти центральноазиатских стран (Казахстана, Киргизии, Таджикистана, Туркменистана и Узбекистана) был создан специальный орган по управлению водными ресурсами — Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия. В 1993 г. появился Международный фонд спасения Арала (МФСА), учредителями которого стали те же пять государств. Основные задачи фонда включали финансирование совместных практических действий, программ и проектов, направленных на экологическое оздоровление бассейна Аральского моря и улучшение социально-экономического положения населения. Первым президентом МФСА стал президент Казахстана Н.А.Назарбаев, который обратился к международному

сообществу и странам-донорам с просьбой оказать помощь в преодолении последствий экологической катастрофы. Данное обращение не осталось без отклика.

На протяжении многих веков Аральское море оставалось почти неизученным. Его полноценное исследование стало возможным и началось только в середине XIX в., с присоединением региона к Российской империи. В 1848–1849 г. на Арале под руководством лейтенанта А.И.Бутакова работала военно-морская экспедиция, занимавшаяся описанием всего моря. По материалам выполненных съемок и промеров впервые была составлена и в 1850 г. издана достоверная карта. Появилось первое описание моря, собраны геологические и биологические коллекции [1].

В дальнейшем вклад в изучение Аральского моря внесло немало число исследователей, многие из которых были так или иначе связаны с Зоологическим институтом РАН. Первым из таких ученых стал Л.С.Берг (1876–1950), зоолог и географ, член-корреспондент (1928) и действительный член (1946) АН СССР, президент Географического общества СССР (1940–1950). Он внес самый значительный вклад в изучение Арала. По поручению Туркестанского отдела Императорского Русского географического общества в 1900–1902 и 1906 гг. в рамках программы изучения озер Туркестана Берг выполнил комплексное исследование Аральского моря. Весь объем полученных сведе-

ний был обобщен в фундаментальном труде «Аральское море. Опыт физико-географической монографии», вышедшем в свет в 1908 г. [1]. Эта книга и в настоящее время сохраняет ценность для всех исследователей Арала. В 1904–1913 гг. Берг был заведующим отделом рыб Зоологического музея. В 1925 г. он снова работал на Арале. С 1934 г. и до конца свой жизни Лев Семенович заведовал в Зоологическом институте лабораторией ископаемых рыб.

В обработке собранных Бергом коллекций участвовали и другие ученые. В их числе был зоолог и гидробиолог С.А.Зернов (1871–1945) — академик (1931), директор Зоологического института (1931–1942). Он обработал и опубликовал материалы по зоопланктону Аральского моря [1].

Очередной этап в изучении моря был связан с именем гидробиолога и ихтиолога, профессора А.Л.Бенинга (1890–1943). Под его руководством в 1932 и 1933 гг. были выполнены широкомасштабные комплексные исследования Арала. С 1934 г. Бенинг работал в Зоологическом институте старшим зоологом.

В 1960-е годы сотрудники института Л.А.Кутикова, Ю.В.Мамкаев и Я.И.Старобогатов участвовали в специальных фаунистических исследованиях на Арале. Результаты этих работ были отражены в изданном в 1974 г. Атласе беспозвоночных Аральского моря.

В 1970–1980-х годах Н.В.Аладин, один из авторов настоящей статьи, исследовал фауну ракообразных Аральского моря, а также особенности их осморегуляции и соленостную толерантность. Под его руководством в 1989 г. в институте была организована лаборатория солоноватоводной гидробиологии. Ее первоочередной задачей стало изучение современного состояния Аральского моря и его биоты, а также поиск возможных путей спасения этого многострадального озера. Во время полевых работ сотрудники лаборатории производили сбор зообентоса и зоопланктона, включая протозоопланктон. Были получены новые данные по малоизученной фауне инфузурей. Собирали и матери-



Николай Васильевич Аладин, доктор биологических наук, заведующий лабораторией Зоологического института РАН (Санкт-Петербург). Область научных интересов — природные процессы на Аральском море и других соленых континентальных водоемах, зоология, гидробиология, палеолимнология и палеонтология.



Зауалхан Кенжегалиевич Ермаханов, директор Аральского филиала ТОО «Казахский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства» (Аральск, Казахстан). Занимается изучением ихтиологии, природных условий Аральского моря.



Филип Миклин (Philip Micklin), профессор Западно-Мичиганского университета (Каламазу, США). Научные интересы связаны с географией и гидрологией.



Игорь Светозарович Плотников, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Зоологического института РАН. Специалист в области зоологии, гидробиологии, палеолимнологии Аральского моря и других соленых водоемов суши.

ал из танатоценозов, чтобы проследить изменения в фауне ракушковых ракообразных по мере роста солености. Исследовались высшая водная растительность, фитопланктон, первичная продукция и солеустойчивость некоторых беспозвоночных. Изучалась гидрология Аральского моря, в том числе с использованием методов математического моделирования. Во время экспедиций проводились специальные палеолимнологические исследования.

В 2009 г. по инициативе и при участии лаборатории солоноватоводной гидробиологии была организована международная конференция «Арал: прошлое, настоящее и будущее. Два века исследований Аральского моря».

Зоологический институт и лаборатория солоноватоводной гидробиологии регулярно поднимают вопросы сохранения и восстановления биоразнообразия и биоресурсов Аральского моря на различных международных форумах и конференциях. Так, в 2017 г. при поддержке Секретариата Межпарламентской ассамблеи СНГ в рамках VIII Невского международного экологического конгресса был организован специальный круглый стол «Современные проблемы и возможное будущее Аральского моря».

В прошлом Аральское море было вторым по величине после Каспия континентальным бессточным соленым водоемом. По площади водного зеркала оно уступало только Каспийскому морю, Великим Американским озерам и оз.Виктория. Арал расположен в пустынной зоне Средней Азии — в Туранской низменности, у восточной кромки плато Устюрт, на территории Казахстана и Узбекистана. Северный и западный берега озера — в основном высокие и обрывистые, южный и восточный — низкие. В Арал впадают только две реки — Сырдарья на северо-востоке и Амударья на юге. Площадь водосборного бассейна озера превышает 2 млн км² [2].

В Аральском море выделяются две главные части: меньшая северная — Малое море (Малый Арал) и большая южная — Большое море (Большой

Арал). В прошлом их разделял о.Кокарал, а связывали два пролива: на западе острова — узкий и мелководный Аузы-Кокарал, а на востоке — широкий и глубокий пролив Берга. Большой и Малый Арал, в свою очередь, включают в себя по несколько меньших котловин. При такой морфологии впадины [2] снижение уровня воды привело к превращению прежде единого озера в группу остаточных водоемов, часть которых может в дальнейшем полностью высохнуть.

На протяжении нескольких веков, вплоть до 1960-х годов, состояние Аральского моря оставалось условно-стабильным. В конце 1950-х его уровень находился на отметке +53.4 м над ур.м., площадь достигала 67499 км² при объеме воды 1089 км³ и средней глубине 16.1 м [2]. Площадь Малого Арала составляла 6118 км², объем — 82 км³, средняя глубина — 13.5 м, максимальная — 29.5 м. В нем выделялись три крупных залива (Шевченко, Бутакова, Большой Сарычеганак) и несколько небольших. Площадь Большого Арала составляла 61381 км², объем — 1007 км³, средняя глубина — 16.5 м. Тянувшаяся с юга на север подводная гряда делит Большой Арал на глубоководную желобообразную западную часть, наибольшая глубина которой достигала 69 м, и обширный восточный бассейн с максимальной глубиной 28 м. Большой Арал включал в себя несколько крупных заливов — Тше-Бас, Чернышева, Аджибай, Муйнакский и Джылтырбас.

Аральское море было солоноватоводным водоемом со средней солесностью вод 10.3‰. Его воды сильно метаморфизированы — их солевой состав существенно отличается от океанического. Доля двухвалентных ионов (гидрокарбонатов, кальция, магния и сульфатов) существенно повышена относительно одновалентных (натрия и хлора). Это обусловлено солевым составом слабоминерализованных вод впадающих в него рек, где доля двухвалентных ионов тоже повышена [2].

Объем воды в Аральском море и, соответственно, его уровень и площадь определяются водным балансом. Его приходная составляющая складывается из речного стока, атмосферных осадков, а также притока подземных вод, а расходная — из испарения с поверхности водного зеркала и фильтрации вод в берега и дно [2–5].

Главный источник воды для Аральского моря — это сток Амударьи и Сырдарьи. Он целиком формируется в горах, на Тянь-Шане и Памире. Обе реки имеют снеглоледниковое питание, и их водные ресурсы оцениваются примерно в 75 и 37 км³/год соответственно. Объем достигающего моря речного стока зависит от запасов воды и снега в горах к началу снеготаяния, потерь на равнинном участке из-за испарения и фильтрации, а также безвозвратного изъятия речной воды, главным образом на нужды орошаемого земледелия. В 1911–1960 гг. суммарный речной сток в Арал в среднем составлял 56 км³/год или, если отнести его к площади поверхности моря, — 84.7 см. Количество выпадаю-



Аральское море до 1960-х годов.

щих на поверхность Аральского моря атмосферных осадков невелико. В период 1911–1960 гг. в среднем за год оно составляло всего лишь 13,8 см. Надежных данных о подземном стоке нет, но большинство исследователей считает, что он невелик, и при расчете водного баланса его не учитывают. Испарение с поверхности Арала многократно превышает количество выпадающих атмосферных осадков. В 1911–1960 гг. оно составляло в среднем 100 см/год. Фильтрация вод моря в грунт, по существующим оценкам, невелика [2].

Уровень Аральского моря никогда не оставался стабильным. Он испытывает колебания различной периодичности. Природа многовековых, вековых и многолетних циклов изменения уровня связана с соответствующими циклами изменения стока Амударьи и Сырдарьи. Сезонные колебания уровня вызываются изменениями соотношений между составляющими водного баланса. В 1911–1960 гг. сохранялось примерное равновесие, и многолетние колебания среднегодового уровня Аральского моря около отметки +53 м не превышали 1 м при сезонных колебаниях в пределах 0,25–0,35 м [2].

Влияние на речной сток оказывали и земледельческие цивилизации, ведь уже с древности бассейны Амударьи и Сырдарьи были районами развитого орошаемого земледелия. Оно возникло на Амударье около 3 тыс. лет до н.э., а к античному времени (IV в. до н.э. — IV в. н.э.) ирригация была широко распространена уже на обеих реках [6].

Фауна свободноживущих беспозвоночных Аральского моря насчитывала не менее 200 видов, некоторые из которых были вселены людьми специально или случайно. Преобладали виды, населяющие также пресные воды. Кроме них в Арале жили морские виды, представители солоноватоводной каспийской фауны и виды, характерные для фауны осолоненных континентальных водоемов аридной зоны [7–10]. Ихтиофауна Арала была представлена 32 видами, из которых 18 — аборигенные пресноводные, а остальные 14 (как пресноводные, так и морские) — были вселены человеком в XX в. Все виды рыб, имевшие значение как объекты рыболовства, были пресноводными [11, 12].

На Арале развивалось промышленное рыболовство. Море служило важной региональной транспортной артерией. В дельтах рек были развиты земледелие и животноводство, охота и звероловный промысел, в больших объемах велась заготовка тростника [4, 13].

Современное высыхание Аральского моря и его последствия

За свою историю Арал пережил не одну регрессию. Временами его уровень значительно снижался и оставался низким на протяжении нескольких столетий. Все прошлые регрессии, кроме современной, становились результатом частичного или даже полного поворота Амударьи от Арала на запад в Каспийское море по ее древнему руслу — Узбою. По прошествии времени река возвращалась обратно в Арал, и он восстанавливался. Первоначально Амударья меняла направление по естественным причинам. Но с появлением земледельческих цивилизаций и развитием орошаемого земледелия изменение течения этой реки могло произойти и из-за деятельности людей, создававших ирригационные системы [3, 5, 6, 14].

Последняя регрессия Арала приходится на XIII–XVI в.; тогда уровень падал не менее чем на 24 м. Об этом свидетельствуют не только исторические записи, археологические памятники и сохранившиеся на дне Аральского моря пни саксаулов, но и следы древних речных русел. Причиной высыхания моря стал поворот Амударьи в Каспий. Это было вызвано разрушением оросительных систем монголами, вторгшимися в Центральную Азию в XIII в. Но потом река повернула обратно в Арал, он восстановился, и до начала 1960-х годов колебания уровня не превышали 4–4,5 м. В основном они были следствием изменений климата, возможно, некоторое влияние оказывала и ирригация [3, 5, 14].



Остатки средневекового захоронения на обсохшем дне Большого Арала.

Фото И.С.Плотникова



Средневековая керамика на обсохшем дне Большого Арала.

Фото И.С.Плотникова

Современная регрессия Аральского моря началась в 1960 г. На этот раз она была вызвана одним только сокращением стока Амударьи и Сырдарьи в результате забора их воды на орошение. Прежде изъятие воды не приводило к масштабным регрессиям моря [2] благодаря существенному возвратному стоку с орошаемых полей и другим компенсирующим факторам (сокращению потерь на транспирацию водолюбивыми растениями в низовьях рек



Мельничный жернов на обсохшем дне Большого Арала.

Фото И.С.Плотникова

и дельтах, снижению испарения из-за уменьшения весенних паводков). Но с начала XX в. площади орошаемых земель выросли более чем в два раза, и такая компенсация стала недостаточной. Равновесие нарушилось. Это привело к резкому уменьшению стока рек в Арал [3, 15], образованию дефицита водного баланса, быстрому падению уровня, сокращению площади моря и росту его солёности.

В 1990-х годах рост количества осадков в горах и некоторое сокращение изъятия воды увеличили объем речного стока и снизили дефицит водного баланса моря, замедлив тем самым его высыхание. В 2000–2001 гг. случилась сильная засуха, и тогда сток рек в среднем составил около 2 км³/год. В 2002–2010 гг. сток снова увеличился, и дефицит водного баланса значительно сократился [15].

Высыхание Аральского моря привело к серьезным негативным последствиям для всей его фауны. В результате повышения солёности в ней произошли значительные изменения [9, 10]. Первыми исчезли разнообразнейшие виды пресноводных беспозвоночных, а затем и солоноватоводные каспийские виды. К концу 1980-х годов в аральской воде могли жить только морские и другие солевыносливые виды.

Промышленное рыболовство на Аральском море прекратилось в начале 1980-х годов: исчезли пресноводные (аборигенные и вселенные человеком) рыбы, составлявшие основу промысла. В составе ихтиофауны остались только не имеющие промыслового значения аборигенные рыбы — ерш и девятиглая колюшка, а также морские вселенцы — салака, атерина и шесть видов бычков. В период с 1979 по 1987 г. в Арал вселили способную жить и размножаться при возросшей солёности черноморскую камбалу-гlossу [11], и она на долгое время стала единственным объектом рыбного промысла.

Во второй половине 1980-х годов сток Амударьи почти не доходил до Аральского моря, и фактически его питали только воды Сырдарьи. Так как поступ-



Остатки средневекового саксаулового леса на обсохшем дне Большого Арала.

Фото Н.В.Аладина

ление речной воды и атмосферных осадков в Малое море превышало испарение с его поверхности, вода из Малого Арала, пока Арал был единым, поступала через пролив Берга в Большой Арал. К 1987 г. уровень моря снизился до отметки +40 м, пролив пересох, и море разделилось на два терминальных остаточных водоема, различающихся своим гидрологическим режимом. Общая площадь Аральского моря к тому времени сократилась до 60% от исходной, воды оставалось только 33%, средняя соленость возросла до 30‰ [16].

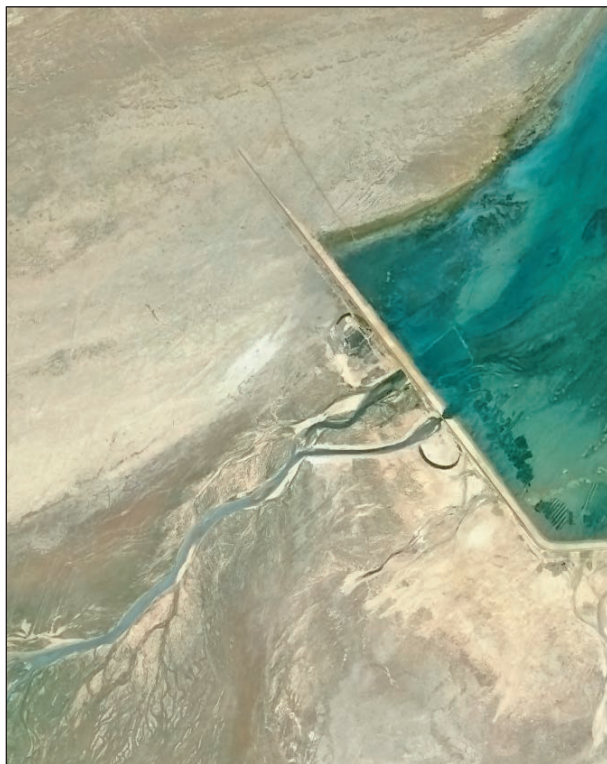
С разделением Арала падение уровня Малого моря прекратилось, а высыхание Большого Арала продолжалось, и его уровень стал еще ниже. В 1990 г. при весеннем увеличении стока Сырдарьи уровень Малого Арала поднялся, и начался перелив воды в Большое море поверх естественной преграды в пересошем проливе Берга. Эта вода вымыла отложения, заполнявшие бывший судоходный канал в проливе, и на этом месте сформировалось русло. Грунты на дне пролива неустойчивы к размыву, поэтому возникла вероятность дальнейшего углубления русла и разрушения естественной преграды. Это создавало опасность возобновления падения уровня Малого моря [15–17].

В 1991 г. сотрудники лаборатории солоноватоводной гидробиологии сообщили об этой опасности местной администрации и предложили перекрыть сток воды из Малого Арала плотиной, что позволило бы повысить уровень и снизить соленость этого остаточного водоема. Правительство Казахстана поддержало это предложение, и в 1992 г. в самой мелкой части пролива Берга была построена земляная дамба [18]. Уро-

вень Малого Арала вырос более чем на метр, остановился рост солености, и через некоторое время началось ее постепенное снижение. Вновь заполнилась водой южная часть высохшего залива Большой Сарычеганак, была предотвращена опасность отчленения залива Бутакова [17].

К сожалению, плотина оказалась недостаточно прочной, к тому же она не имела водосбросного устройства для пропуска излишков воды при экстремальных повышениях уровня Малого Арала. Дамбу не раз прорывало, и приходилось ее восстанавливать. Так продолжалось до апреля 1999 г., когда уровень воды превысил отметку +43 м (т.е. поднялся выше гребня дамбы). Во время шторма плотина была прорвана и очень сильно разрушена. На этот раз отремонтировать ее не стали [17, 19].

Вскоре по решению правительства Казахстана в рамках программы «Конкретные действия по улучшению экологической обстановки в бассейне Аральского моря» началась реализация проекта «Регулирование русла реки Сырдарьи и северной части Аральского моря». Тогда в проливе Берга на месте первой дамбы возвели новую капитальную плотину, названную Кокаральской. Первоначально намечалось поднять уровень Малого Арала до отметки +47 м, что позволило бы построить в проливе Аузы-Кокарал дополнительное водорегулирующее сооружение для подачи воды в западную часть Большого моря. Однако ограничились одной более низкой плотиной в проливе Берга, позволяющей повысить уровень зарегулированного Малого моря только до отметки +42–43 м. Плотина состоит из дамбы протяженностью 13 км с бетонным водосбросным сооружением. Работы



Кокаральская плотина.

www.google.com/earth

завершились в августе 2005 г., и уже к марту следующего года уровень Малого Арала поднялся до проектной отметки +42 м [19].

После создания Кокаральской плотины уровень Малого Арала стабилизировался, соленость продолжила снижаться, и постепенно он снова стал солоноватоводным. Сегодня его средняя соленость уже опустилась ниже уровня 1960-х годов [9]. Значительное снижение солености и образование сильно опресненной зоны около дель-

ты Сырдарьи сделало возможным обратное естественное вселение в Малое море многих видов пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных [9, 20], а также рыб, выпавших из его фауны из-за осолонения. Это виды, обитающие в Сырдарье, ее низовьях и связанных с ней озерах, или же виды беспозвоночных, которые имеют покоящиеся яйца, способные долго сохранять жизнеспособность. Стало возможным возвращение в Малый Арал и процветание ценных аборигенных промысловых пресноводных видов рыб [11], таких как судак, сазан, лещ, вобла, а также ряда других, что позволило возродить рыбный промысел. С другой стороны, сильное снижение солености становится неблагоприятным для прежде многочисленных представителей морской фауны и солелюбивых видов.

Ситуация на Большом Арале совсем иная. После отделения от Малого моря высыхание и рост солености здесь не только продолжились, но и ускорились. Осенью 2009 г. Большой Арал разделился на три остаточных водоема — Западный и Восточный бассейны и бывший залив Тше-Бас. Уровень более глубокого Западного бассейна упал к тому времени на 26 м, а соленость его воды превысила 100%. Восточный же превратился в мелководный водоем. Его осолонение шло более высокими темпами, и соленость могла превышать 200% [21]. Ожидалось, что за лето 2010 г. Восточный Большой Арал полностью высохнет, но оказавшийся тогда значительным сток Амударьи вновь наполнил его водой, и с того времени он или уменьшался, или увеличивался в сезонном ритме, связанном с годовой динамикой речного стока [3, 19].

Между Восточным Большим Аралом и Западным Большим Аралом на севере образовался пролив, через который может идти водообмен. В первом десятилетии XXI в. происходил заток более плотных и соленых вод из восточного бассей-



Водосбросное устройство Кокаральской плотины летом. Сток воды из Малого Арала отсутствует.

Фото И.С.Плотникова

на в западный, где они опускались в придонный слой. Это вело к вертикальной солёностной стратификации вод. Кроме того, очень существенно изменился газовый режим Западного Большого Арала. Кислородосодержащий слой ограничен глубинами до 15 м. Ниже содержание растворенного кислорода быстро снижается, глубже 20 м он уже отсутствует — там формируется зона аноксии, вода насыщается сероводородом, чего ранее не наблюдалось. В ходе высыхания Большого Арала рост минерализации его воды вел к изменению ее ионно-солевого состава. Последовательно происходило осаждение карбоната кальция, карбоната магния, гипса, мирабилита и галита. В результате доля двухвалентных ионов снизилась [21].

Превращение в конце 1990-х годов Большого моря в гипергалинный водоем привело к новым изменениям в его фауне. Ее и так уже низкое видовое разнообразие сократилось еще сильнее [10, 16]. Исчезло большинство представителей морской фауны, сохранились только наиболее устойчивые к высокой солёности виды беспозвоночных. Исчезли оставшиеся рыбы — бычки, салака, атерина и камбала. При этом естественным путем вселились беспозвоночные, характерные для фауны таких водоемов, в частности рачок артемия [10, 16, 22].

За счет воды, стекающей из Малого Арала через Кокаральскую плотину на юг по направлению к остаточным водоемам Большого Аральского моря, возник еще один водоем — Центральный Арал [23]. Это мелководное озеро, восточная часть которого представляет собой водно-болотное угодье. Существуют там обширные тростниковые заросли испаряют большой объем воды.

Центральный Арал очень нестабилен. На протяжении года его площадь меняется. Зимой и весной, когда сток Сырдарьи максимален и происходит сброс воды из Малого моря, Центральный Арал значительно увеличивается в размерах, и солёность в нем снижается. В отдельные годы этот водоем даже достигает Восточного бассейна Большого Арала и пополняет его водой, оттуда вода по соединительному каналу поступает в Западный Большой Арал. Центральный Арал может подходить и к бывшему заливу Тше-Бас, пополняя водой и его.

Вместе с водой из Малого моря в Центральный Арал выносятся большое количество ценной промысловой рыбы. Но солёность на западе озера слишком высока (~70‰) для выживания там ихтиофауны.



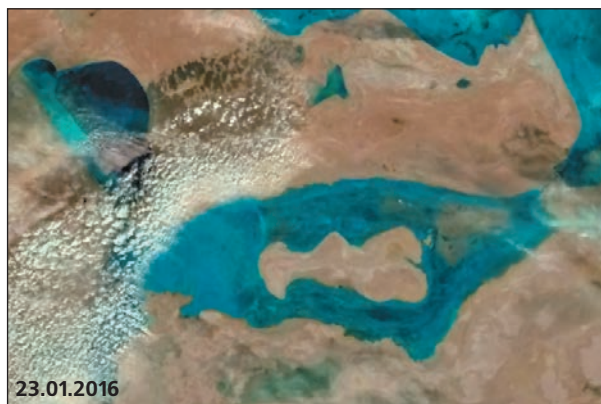
Водосбросное устройство Кокаральской плотины зимой. Идет сток воды из Малого Арала.

Фото Н.В.Аладина



Остаточные водоемы Аральского моря: 1 — Малый Арал (уровень ~42 м, площадь 3300 км², солёность 6–7 г/л), 2 — Западный бассейн Большого Арала (уровень ~25 м, площадь 3120 км², солёность >150 г/л), 3 — Залив Тше-Бас (уровень ~28 м, площадь 385 км², солёность 85 г/л), 4 — Центральный Арал (уровень ~27–28 м, площадь 405 км², солёность непостоянна), 5 — Восточный бассейн Большого Арала (уровень ~26–27 м, площадь 974 км², солёность >150 г/л).

www.google.com/earth



Центральный Арал в 2015 г. (показан контуром) и в 2016 г.

Будущее Аральского моря. Возможные сценарии

Что ожидает Арал в будущем? Утверждение, что в XXI в. он высохнет полностью, очень далеко от истины. Даже если сток Амударьи и Сырдарьи сократится до нуля, что маловероятно, все равно останутся грунтовые, талые и дождевые воды, а также поступающие с орошаемых земель дренажные. Этой воды будет достаточно для сохранения хотя бы части Малого Арала и остатка западного бассейна Большого Арала, которые станут гипергалинными водоемами [3, 23].

Для поддержания Малого Арала в его современном состоянии (уровень у отметки +42 м, площадь 3200 км²) достаточно в среднем около 2.6 км³/год стока Сырдарьи. Дополнительно 0.6–0.7 км³/год речной воды требуется для поддержания стока через Кокаральскую плотину, чтобы обеспечить необходимую для регулирования солености проточность. Следовательно, среднегодовой сток Сырдарьи должен составлять как минимум 3.2–3.3 км³. Для периода 1992–2011 гг. он оценивается в 5.9 км³, и этого более чем достаточно для стабильности Малого Арала [23].

В обозримом будущем возвращение Арала к его состоянию в 1960 г. крайне маловероятно. Даже если увеличить среднегодовой речной сток до прежних 56 км³, то для полного восстановления озера потребуется примерно 100 лет. Первое время, пока сток значительно превышает чистое испарение (т.е. испарение минус атмосферные осадки), процесс будет идти быстро. Площадь озера может увеличиться до 90% от его площади в 1960 г. примерно за 40 лет. Но по мере ее роста и, следовательно, повышения чистого испарения и приближения его к объему речного стока наполнение начнет замедляться и прекратится с установлением равновесия водного баланса [23].

В период 2001–2010 гг. среднегодовой сток Амударьи и Сырдарьи составлял только 11 км³, т.е. только 20% от объема, необходимого согласно этому сценарию. Единственный реальный способ

существенно увеличить сток в Арал — кардинальное сокращение потребления воды на орошение, достигающее сегодня 92% от совокупного безвозвратного изъятия речной воды [24]. Существенно повысить эффективность орошения возможно, но для этого потребуется не только время, но и большие финансовые затраты. Конечно, можно сократить площадь орошаемых земель, но тем самым будет нанесен большой ущерб экономике региона. Снижение потребления воды на орошение, безусловно, полезно, и к этому необходимо стремиться. Но это лишь частичное решение проблемы дефицита воды [3, 23].

Конечно, технически возможно подавать воду в Арал из-за пределов Центральной Азии. В 1960–1970-х годах разрабатывался проект переброски в аральский бассейн до 60 км³ воды из Иртыша и Оби. В 1986 г., когда начальный этап проекта (27 км³) уже был близок к реализации, его осуществление остановили, главным образом из-за чрезмерно высокой стоимости работ [23, 25]. Обсуждение этого плана продолжается, его поддерживает ряд водохозяйственных и правительственных организаций не только стран Центральной Азии, но и России. Тем не менее в обозримом будущем у этого проекта мало шансов на осуществление. Даже если он и будет реализован, то Арал получит намного меньше, чем забранное из сибирских рек 27 км³ (и, вероятно, даже меньше 15 км³) из-за существенных потерь воды на испарение и фильтрацию в системе каналов, ее попутного отбора и расширения ирригации [23].

Существуют и проекты перекачки в Аральское море воды из Каспия по гигантскому трубопроводу. При этом для компенсации предлагается подавать ее в Каспий из Черного моря по специальному каналу [26, 27]. Эти планы не могут считаться реалистичными из-за огромных материальных и финансовых затрат и технических сложностей. Чтобы избежать увеличения солености Аральского моря в результате подачи в него соленой каспийской воды, необходимо ее опреснять, что потребует строительства мощных установок. Для их

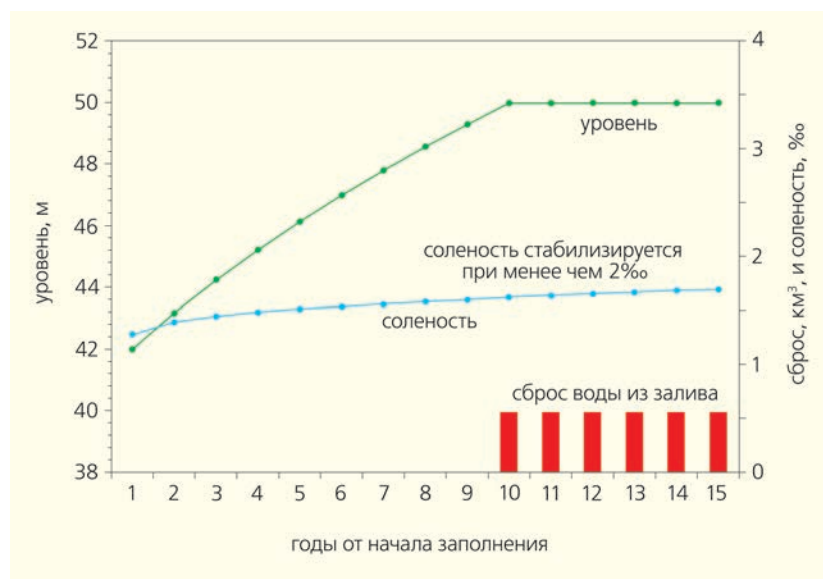
функционирования, а также для работы насосных станций, способных перекачивать ежегодно несколько десятков кубических километров воды на высоту в несколько десятков метров, необходимы огромные энергозатраты. Да и что делать с остающимся рассолом? Кроме того, непросто будет и обслуживание трубопровода, проходящего в основном по пустынной ненаселенной территории. К тому же, попадание воды из Черного моря в Каспийское неизбежно увеличит соленость и изменит ионный состав вод последнего, что, несомненно, повлияет на биоту уникального континентального водоема.

Вместе с тем весьма перспективными могут считаться различные сценарии частичного спасения Аральского моря. Правительство Казахстана предполагает продолжить восстановление Малого Арала. Планируется, что уровень не всего Малого моря, а только одной его части — залива Большой Сарычеганак — будет поднят до отметки +50 м. Залив превратится в водохранилище. Для этого в горле залива нужно построить плотину с водопропускным устройством и судоходным шлюзом. Для подачи в водохранилище воды из Сырдарьи необходимо проложить специальный протяженный канал. Воды залива вновь подойдут к г.Аральску, и это позволит судам заходить по короткому каналу в порт [23].

Если ежегодно подавать в водохранилище 1 км³ воды, для его заполнения может потребоваться примерно 10 лет, а если 1.5 км³ — шесть. Потери воды в канале составят как минимум 15% от ее исходного объема, поэтому для их компенсации дополнительно потребуется ежегодно забирать из Сырдарьи еще около 0.2 км³. После заполнения водохранилища в основную часть Малого Арала в первом случае может сбрасываться в среднем 0.5–0.6 км³/год, во втором — примерно 1 км³/год. Предполагается, что водохранилище Сарычеганак будет почти пресноводным с соленостью менее 2‰ [23].

Для поддержания уровня основной части Малого Арала и ее проточности, достаточной для сохранения в ней благоприятной для аборигенных пресноводных рыб солености 6–8‰, будет хватать около 3.2 км³/год стока Сырдарьи. А так как он (по данным за 1992–2011 гг.) по-прежнему превышает 5 км³/год, останется вода и для поддержания Центрального Арала [23].

Если проект будет реализован, то в водохранилище Сарычеганак сформируется фауна пресноводного типа — за счет выноса в него пресновод-



Изменение уровня и солености планируемого водохранилища Сарычеганак.

ных гидробионтов со стоком Сырдарьи, их самостоятельной миграции, а также заноса покоящихся стадий водоплавающими птицами или ветром с пресных или солоноватых водоемов. При этом обитающие сегодня в водоеме солоноватоводные, морские и происходящие из осолоненных континентальных водоемов виды беспозвоночных должны будут исчезнуть из-за низкой для них солености [10]. С другой стороны, такие условия окажутся благоприятными для пресноводных рыб, и многие из них смогут нереститься на месте, а не мигрировать для этого в Сырдарью.

Альтернативой рассмотренному варианту может стать основательная реконструкция существующей Кокаральской плотины. Ее следует сделать более высокой, чтобы поднять уровень всего Малого Арала с отметки +42 м до +48 м и таким путем увеличить его объем и площадь. Но в этом случае необходим больший минимальный среднегодовой сток Сырдарьи — не менее 4 км³. Тем не менее наполнение Малого моря до нового уровня продлится долго — даже при среднегодовом речном стоке 5 км³ для этого потребуется не менее 17 лет. Повышение уровня сначала пойдет быстро, но затем постепенно замедлится. После того как проектный уровень будет достигнут, он останется относительно стабильным при среднегодовом сбросе воды через плотину ~1 км³. Средняя соленость Малого Арала по мере его наполнения станет меняться. Если предположить начальную соленость 6‰, то за 17 лет она снизится примерно до 4.5‰. Когда начнется сброс воды через Кокаральскую плотину, соленость станет расти (этот рост будет постепенно замедляться), так как в водоем фиксированного объема солей будет поступать больше, чем выводиться. Примерно на 25-й год соленость достигнет 5‰, и в дальнейшем она стабилизируется на 6‰.

При среднегодовом стоке Сырдарьи 5.5 км^3 время наполнения сократится до 12–13 лет, что тоже долго. После этого среднегодовой сброс воды через плотину в объеме $\sim 1.5 \text{ км}^3$ позволит поддерживать уровень на отметке +48 м. Малый Арал может наполниться и за меньшее время — с учетом того что в 1992–2011 гг. сток Сырдарьи составлял 5.9 км^3 . Однако рассмотренный сценарий основан на средних значениях стока. В действительности он меняется из года в год, иногда даже значительно. Но эту его нестабильность можно корректировать, управляя сбросом воды из Малого Арала через Кокаральскую плотину. Для связи г.Аральска с заливом Большой Сарычеганак потребуется более длинный судоходный канал, чем в первом варианте [23], так как уровень достигнет только отметки +48 м, а не +50 м.

Если реализовать этот альтернативный проект, то солоноватоводным станет почти весь Малый Арал, а сильно опресненной будет, как и сейчас, только акватория рядом с дельтой Сырдарьи. Установившаяся соленость 5–6‰ благоприятна для пресноводных видов беспозвоночных и рыб, но она может негативно отразиться на морских беспозвоночных и выходах из осолоненных континентальных водоемов аридной зоны [10].

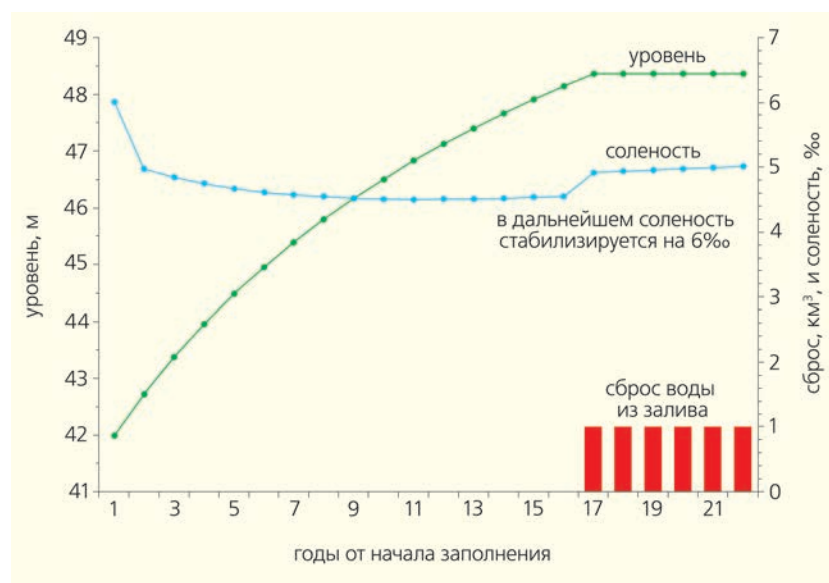
Принятие решения, какой из альтернативных вариантов будет реализован, пока что отложено на неопределенный срок, и в настоящее время проводятся только гидромелиоративные работы на Сырдарье [23].

Тем не менее не все столь радужно [23]. Из-за глобального потепления сокращаются ледники и снежники в горах Тянь-Шаня — главный источник воды для Сырдарьи (это верно и для Амударьи, истоки которой находятся на Памире). Со време-

нем их ускорившееся таяние увеличит речной сток. Но в итоге масса льда и снега так сократится, что сток начнет снижаться [28]. Таким образом, предположения, основанные на данных по стоку Сырдарьи за 1992–2011 гг., могут оказаться излишне оптимистичными.

Прогноз возможного будущего остаточных водоемов Большого Аральского моря не оптимистичен. Восточный Большой Арал зависит от сброса воды из Малого Арала через Кокаральскую плотину и далее через Центральный Арал, а также от стока Амударьи, который крайне нестабилен и в настоящее время не каждый год достигает моря. Состояние этого остаточного водоема может меняться от сухого солончака — источника пыльно-солевых бурь — до обширного мелководного гипергалинного озера. К концу 2009 г. он почти полностью исчез, но в начале лета и осенью неожиданно многоводного 2010 г. в него поступили большие объемы воды из Амударьи, а также из Малого Арала. Водоем вновь наполнился водой, но в последующие годы опять высох. Сегодня нет оснований ожидать, что ситуация 2010 г. будет повторяться регулярно и Восточный Большой Арал останется обводненным.

Западный бассейн зависит от притока грунтовых вод, от дождевых и талых вод и стока из восточного бассейна и из Центрального Арала. Уровень бассейна в августе 2015 г. находился между отметками +24 и +25 м, а площадь была около 3000 км^2 . При сохранении существующих тенденций уровень продолжит падать, а площадь — сокращаться, и стабилизация может наступить на отметке около +21 м при площади 2560 км^2 . Но вероятно и продолжение этого процесса и превращение Западного бассейна в водоем, подобный Большому Соленому озеру в США,



Время заполнения и изменение солености Малого Аральского моря по сценарию с уровнем 48 м и средним притоком пресной воды 5 км^3 .

Мертвому морю на Ближнем Востоке или озеру Урмия в Иране (соленость $>300\text{‰}$) [19, 23]. Тогда биоразнообразие фауны снизится — может остаться только артемия, но и она исчезнет при приближении солености к 350‰ . Фауна же Восточного Большого Арала, представленная до его высыхания, вероятнее всего, только артемией, сможет восстановиться и после ее гибели из цист, оставшихся на обсохшем дне, или занесенных ветром с других водоемов, если сюда в очередной раз придет вода из Амударьи [10].

Для развития Западного бассейна Большого Арала возможны и более оптимистичные сценарии [23]. Один из них предложили М.И.Львович и И.Д.Цигельная [29]. Согласно их плану,

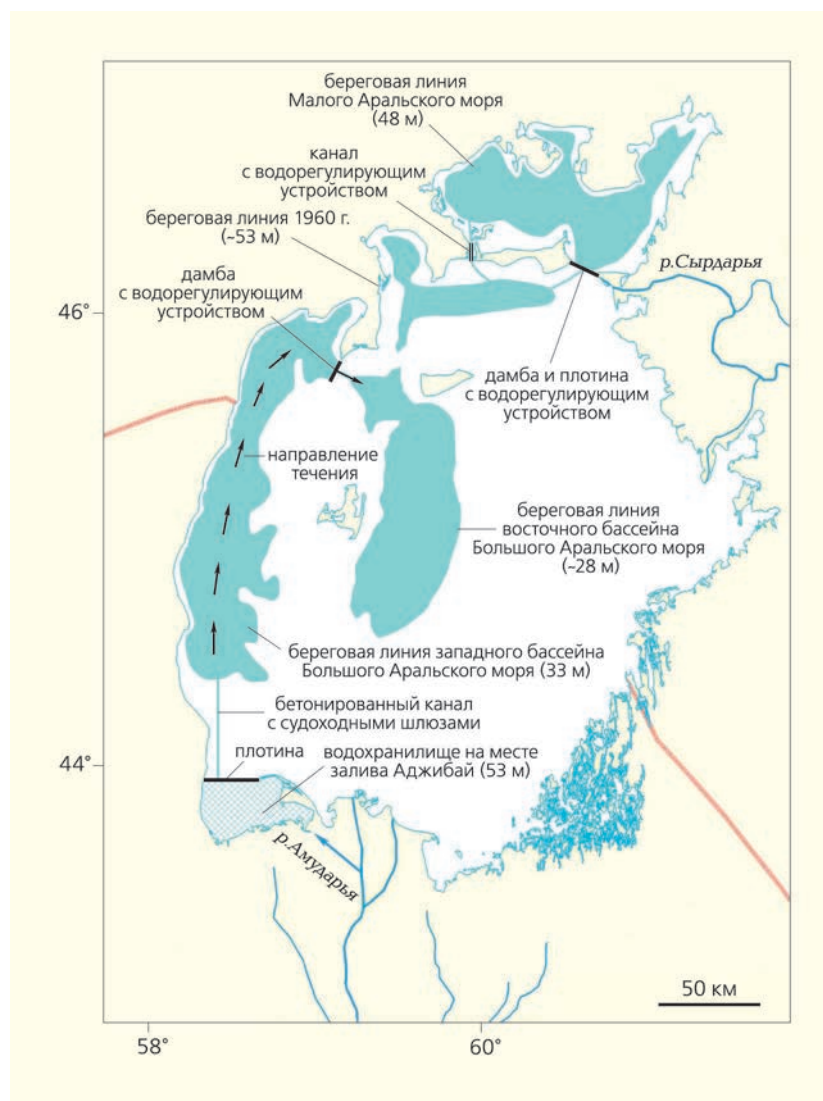
среднегодовой сток Амударьи должен увеличиться более чем вдвое и достичь $\sim 12.5 \text{ км}^3$. Это может быть достигнуто реально осуществимым повышением эффективности орошения в бассейне Амударьи. Весь оставшийся сток реки направляется не в Восточный Большой Арал, а в водохранилище, создаваемое на месте залива Аджибай. Оттуда по бетонированному каналу вода подается в Западный Большой Арал. Это позволит сохранить этот остаточный водоем и предотвратить его дальнейшее осолонение. Восточный Большой Арал будет получать воду из Западного, а не из Амударьи. Протока между Западным и Восточным бассейнами перекрывается плотиной с водорегулирующим устройством. Наибольшие препятствия к осуществлению этого плана — политические и экономические, и связаны они с тем, что на обсохшем дне южной части Западного бассейна уже ведутся разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений [23].

* * *

Современная регрессия Арала еще раз показала, как легко и быстро человек может разрушить природную среду, а ее восстановление, если оно вообще возможно, — длительный и трудный процесс. Следовательно, нужно быть очень осторожным при масштабных вмешательствах в сложные природные системы. Очень важно тщательно оценивать потенциальные последствия, прежде чем, надеясь на лучшее, поступать так, как Советский Союз поступил с Аральским морем.

Даже если человеческая деятельность и не привела в прошлом к серьезным проблемам, это не может служить гарантией того, что она не создаст проблем в будущем. Широкое распространение орошения в бассейне Аральского моря серьезно не влияло на море до 1960-х годов, потому что это возмещалось компенсирующими факторами. Но они перестали действовать.

Нужно остерегаться привлекательных, но легких решений сложных проблем. Предлагаемые быстрые выходы вполне могут создать новые более серьезные проблемы. Устойчивые решения требуют в долгосрочной перспективе не только крупных инвестиций и технических инноваций, но так-



Оптимистический сценарий будущего Аральского моря (после 2030 г.).

же фундаментальных политических, социальных и экономических изменений, на что нужно время.

Природная среда удивительно устойчива, и не надо терять надежду и оставлять усилия по ее сохранению, даже когда задача кажется неразрешимой. Сейчас уже однозначно показано, что некоторые части Арала можно сохранить и восстановить. И не исключено, что в очень отдаленной перспективе людям все-таки удастся значительно сократить потребление вод Амударьи и Сырдарьи и Арал возродится таким, каким он был.

О том, что надежда умирает последней, говорит и резолюция VIII Невского международного экологического конгресса. В ней сообщается о необходимости «разработать специализированные образовательные и просветительские программы для начальных, средних и высших учебных заведений, находящихся под юрисдикцией государств, участвующих в деятельности Между-

народного фонда спасения Арала; провести в городе Санкт-Петербурге вторую Международную конференцию по проблемам Аральского моря; провести оценку современных экологических проблем Аральского моря и Приаралья; разработать с учетом наилучших доступных технологий комплекс мер, направленных на сохранение и реабилитацию остаточных водоемов Арала, под эгидой Международного фонда спасения Арала».

В заключение мы хотим добавить, что спасение Арала — сложная и труднодоступная цель, для реализации которой исследователи могут пользоваться самым современным научным оборудованием и новейшими компьютерными программами. Но этого недостаточно: нужно еще и доброе сердце. Только сам человек может попытаться восстановить то, что разрушил. К сожалению, роботы на это никогда не будут способны. ■

Литература / Reference

1. *Berg L.S.* Аральское море. Опыт физико-химической монографии. Известия Туркестанского отдела Императорского Русского географического общества. 1908; 5(9). [*Berg L.S.* Aralskoye more. Opyt fiziko-khimicheskoy monografii. Izvestiya Turkestanskogo otdela Imperatorskogo Russkogo geograficheskogo obshchestva. 1908; 5(9). (In Russ.)]
2. Аральское море. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Ред. В.И.Бортник, С.П.Чистяева. Л., 1990; 7. [*Aralskoye more. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. V.I.Bortnik, S.P.Chistyayeva* (eds.). Leningrad, 1990; 7. (In Russ.)]
3. *Micklin P.* The past, present, and future Aral Sea. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 2010; 15: 193–213.
4. *Micklin P.* Chapter 1. Introduction. *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 1–11.
5. *Micklin P.* Chapter 2. Introduction to the Aral Sea and Its Region. *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 15–40.
6. *Аладин Н.В., Плотников И.С.* Изменения уровня Аральского моря: палеолимнологические и археологические доказательства. Труды Зоологического института РАН. 1995; 262(1): 17–46. [*Aladin N.V., Plotnikov I.S.* Changes in the Aral Sea level: paleolimnological and archeological evidences. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 1995; 262(1): 17–46. (In Russ.)]
7. Атлас беспозвоночных Аральского моря. Ред. Ф.Д.Мордухай-Болтовской. М., 1974. [*Atlas bespozvonochnykh Aralskogo morya. F.D.Mordukhay-Boltovskoy* (ed.). Moscow, 1974. (In Russ.)]
8. *Карпевич А.Ф.* Теория и практика акклиматизации водных организмов. М., 1975. [*Karpevich A.F.* Teoriya i praktika akklimatizatsii vodnykh organizmov. Moscow, 1975. (In Russ.)]
9. *Plotnikov I.S., Aladin N.V., Ermakbanov Z.K., Zbakova L.V.* Chapter 6. The New Aquatic Biology of the Aral Sea. *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 137–171.
10. *Плотников И.С.* Многолетние изменения фауны свободноживущих водных беспозвоночных Аральского моря. СПб, 2016. [*Plotnikov I.S.* Mnogoletniye izmeneniya fauny svobodnozhivushchikh vodnykh bespozvonochnykh Aralskogo morya. Saint-Petersburg, 2016. (In Russ.)]
11. *Ermakbanov Z.K., Plotnikov I.S., Aladin N.V., Micklin P.* Changes in the Aral Sea ichthyofauna and fishery during the period of ecological crisis. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 2012; 17: 3–9.
12. *Plotnikov I.S., Aladin N.V., Ermakbanov Z.K., Zbakova L.V.* Chapter 3. Biological Dynamics of the Aral Sea before Its Modern Decline (1900–1960). *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 41–47.
13. *Reimov P., Fayzieva D.* Chapter 7. The Present State of the South Aral Sea Area. *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 171–204.
14. *Krивonogov S.* Chapter 4. Changes of the Aral Sea level. *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 77–111.
15. *Micklin P.* Chapter 5. Aral Sea Basin Water Resources and the Changing Aral Water Balance. *Micklin P., Aladin N., Plotnikov I.* (Eds). *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake*. Heidelberg, 2014; 111–137.
16. *Аладин Н.В., Плотников И.С.* Современная фауна остаточных водоемов, образовавшихся на месте бывшего Аральского моря. Труды Зоологического института РАН. 2008; 312(1/2): 145–154. [*Aladin N.V., Plotnikov I.S.* Modern fauna of residual water bodies formed on the place of the former Aral Sea. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 2008; 312(1/2): 145–154. (In Russ., abstr. in Engl.)]
17. *Аладин Н.В., Плотников И.С.* К вопросу о возможной консервации и реабилитации Малого Аральского моря. Труды Зоологического института РАН. 1995; 262(1): 3–16. [*Aladin N.V., Plotnikov I.S.* On the problem of possible conservation and rehabilitation of the Small Aral Sea. *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 1995; 262(1): 3–16. (In Russ.)]
18. *Аладин Н.В.* Плотина жизни или плотина длиною в жизнь. Часть первая. «Пролог» или Первая Пятилетка (1988–1992 гг.). Астраханский вестник экологического образования. 2012; 3(21): 206–216.

- [Aladin N.V. The dam or weir lives long into the life part one. Prologue or first five years (1988-1992). Astrakhan Bulletin for Environmental Education. 2012; 3(21): 206–216. (In Russ., abstr. in Engl.)]
19. Micklin P. Chapter 15. Efforts to Revive the Aral Sea. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Heidelberg, 2014; 361–405.
 20. Toman M.J., Plotnikov I., Aladin N. et al. Biodiversity, the present ecological state of the Aral Sea and its impact on future development. Acta Biologica Slovenica. 2015; 58(1): 45–59.
 21. Завьялов П.О., Арашкевич А.Г., Бастида И. и др. Большое Аральское море в начале XXI века: физика, биология, химия. М., 2012. [Zavyalov P.O., Arashkevich E.G., Bastida I. et al. The Large Aral Sea in the beginning of century 21: Physics, Biology, Chemistry. Moscow, 2012. (In Russ.)]
 22. Мусаев А.К., Жолдасова И.М., Мирабдуллаев И.М., Темибеков Р.О. Развитие ресурсов артемии Аральского моря. Материалы Международной научной конференции «Животный мир Казахстана и сопредельных территорий», посвященной 80-летию Института зоологии Республики Казахстан (22–23 ноября 2012 г.). Алматы, 2012; 144–146. [Musayev A.K., Zholdasova I.M., Mirabdullayev I.M., Temibekov R.O. Razvitiye resursov artemii Aralskogo morya. Materials of the International Conference «Wildlife of Kazakhstan and adjacent areas» devoted to the 80th anniversary of the Institute of Zoology (22–23 November 2012). Almaty, 2012; 144–146. (In Russ.)]
 23. Micklin P. The Future Aral Sea: hope and despair. Environmental Earth Science. 2016; 75(9): 1–15.
 24. Micklin P. Chapter 8. Irrigation in the Aral Sea Basin. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Heidelberg, 2014; 207–233.
 25. Micklin P. Chapter 16. The Siberian Water Transfer Schemes. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Heidelberg, 2014; 381–404.
 26. Badescu V., Schuiling R.D. Aral Sea; Irrecoverable loss of Irtysh imports? Water Resources Manage. 2010; 24: 597–616.
 27. Танклевский М.М. Как помочь Аральскому морю? Природа. 2015; 5: 61–64. [Tanklevsky M.M. How to help Aral Sea? Priroda. 2015; 5: 61–64. (In Russ.)]
 28. Lioubimtseva E. Chapter 17. Impact of Climate Change on the Aral Sea and Its Basin. Micklin P., Aladin N., Plotnikov I. (Eds). The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great lake. Heidelberg, 2014; 405–427.
 29. Львович М.И., Цигельная И.Д. Управление водным балансом Аральского моря. Известия АН СССР. Серия географическая. 1978; 1: 42–54. [L'vovich M.I., Tsigel'naya I.D. Upravleniye vodnym balansom Aralskogo morya. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 1978; 1: 42–54. (In Russ.)]

What could be the future of the Aral Sea?

N.V.Aladin¹, Z.K.Ermakhanov², F.Miklin³, I.S.Plotnikov¹

¹Zoological Institute RAS (Saint-Petersburg, Russia)

²Aral branch of LLP «Kazakh Research Institute of Fishery» (Aralsk, Kazakhstan)

³Western Michigan University (Kalamazoo, USA)

In the past, the Aral Sea was the second largest after the Caspian Sea closed continental saline water body. It is located in the desert zone of Central Asia on the territory of Kazakhstan and Uzbekistan. It falls into only two rivers — the Syr Darya and the Amu Darya, which are the main source of water. The Aral was a brackish water body. In 1960, the desiccation of the Aral Sea began. It was caused by a sharp reduction in the flow of the Amu Darya and the Syr Darya as a result of the increasing withdrawal of their waters for irrigation. The resulting deficit of water balance led to rapid decrease in the Aral Sea level, reduction in its area and increase in salinity. In the foreseeable future, the return of the Aral to its state in 1960 is extremely unlikely. Even if you increase the average annual river runoff to the previous one, the complete restoration of the lake will take approximately 100 years. However, partial restoration of its residual water bodies is possible. It is expected to continue the restoration of the Small Aral Sea. There is a plan to raise the level of one of its parts — the Gulf of Bolshoy Sarycheganak. To do this, it is necessary to build a dam in the throat of the gulf and lay a channel for supplying water from the Syr Darya. An alternative to this plan may be the reconstruction of the Kokaral dam. It can be done higher, raising the level of the entire Small Aral, increasing its volume and area. The forecast of the possible future of residual water bodies of the Large Aral Sea is not optimistic. At the existing trends desiccation of the Western Large Aral will continue. But there are possible more optimistic scenarios. If the Amu Darya runoff is substantially increased and redirected to this residual water body, this will save it and prevent its further salinization.

Key words: Aral Sea, Amu Dar'ya, Syr Dar'ya, salinity, water balance, fauna.

Аудиогенная эпилепсия грызунов

И.И.Полетаева

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

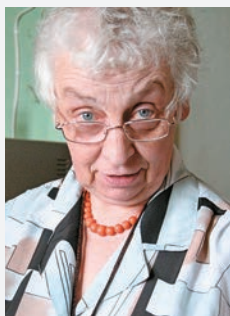
Статья содержит краткий анализ основных проблем экспериментального моделирования серьезного неврологического заболевания человека — эпилепсии, при этом основное внимание уделено так называемой аудиогенной эпилепсии. У некоторых линий крыс и мышей в ответ на сильный звук развиваются эпилептиформные судороги, механизм формирования которых — предмет анализа и нейрофизиологов, и молекулярных биологов. Описаны особенности проявления этого феномена, а также основные результаты его анализа. Особое внимание уделено истории создания и обнаруженным свойствам отечественной линии крыс Крушинского—Молодкиной.

Ключевые слова: аудиогенная эпилепсия, линия крыс Крушинского—Молодкиной.

Старое русское название заболевания, которое проявляется во внезапном возникновении судорожных приступов, — «падучая». В медицине это неинфекционное расстройство деятельности мозга называют эпилепсией (от греч. *ἐπιληπτός* — схваченный, пойманный, застигнутый). Этот недуг — одно из самых распространенных хронических неврологических заболеваний, которому подвержены люди всех возрастов. По данным Всемирной организации здравоохранения, в настоящее время эпилепсией страдают около 50 млн человек в мире.

Причины, проявления и лечение

Эпилепсия может стать следствием травмы, в том числе и родовой. К этой категории относят определенную долю случаев так называемой височной эпилепсии, которая возникает в результате пережатия средней мозговой артерии в процессе родов. Причиной может стать также лекарственное отравление (например, акрихином, который якобы успешно заменял хинин при лечении малярии) или инфекция, вызывающая воспалительный процесс ткани мозга. Наконец, эпилепсия может возникнуть и без видимых причин, но иметь генетическое происхождение (правда, тоже не всегда отчетливо выраженное). А раз речь зашла о генетических основах, то сразу отмечу, что в большинстве случаев предрасположенность к эпилепсии определяется не одним, а многими генами,



Инга Игоревна Полетаева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры высшей нервной деятельности биологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов — генетика поведения, нейрогенетика, физиологические основы когнитивного поведения, аудиогенная эпилепсия, эпилептогенез, нейрогенез взрослого мозга.

что делает ее серьезной проблемой генетики нервных болезней человека.

Проявления эпилепсии тоже разнообразны. Это могут быть так называемые большие припадки — мощные судороги всего тела, которые сопровождаются потерей сознания и впоследствии тяжелым физическим состоянием. Большой может предчувствовать приближение припадка, что выражается в специфических ощущениях сенсорной природы, которые называются предвестниками, или аурой, но случается, что тяжелые судороги наступают и без предвестника. Эпилепсия может проявляться также в виде частичных (парциальных) судорог, часто без потери сознания. Бывают и бессудорожные припадки, так называемые абсансы (от фр. *absence* — отсутствие). В классическом варианте абсанса человек останавливается, замолкает и несколько секунд остается неподвижным, а потом не помнит об этом эпизоде. Если человек во время «отключения» слышит, что происходит вокруг, но ни говорить, ни двигаться не может, то такой вариант абсанса связан с локализацией эпилептического очага в височной доле мозга. Однако это только приблизительная схема, международная классификация эпилептических

приступов много сложнее. Основное, что объединяет эти состояния — это развитие судорожных разрядов, которые регистрируют в мозге с помощью электроэнцефалографии (ЭЭГ).

В экспериментах на животных исследуют особенности разрядов одиночных нейронов, причем тех, которые расположены в разных отделах мозга и различаются и по своему «химизму», и по связям с другими клетками. Эта область исследований эпилептогенеза (т.е. физиологического механизма генерации судорожных разрядов) заслуживает отдельного подробного описания. Здесь же важно отметить, что аномалии нейронной активности частично связаны с так называемыми каналопатиями — с дисфункцией мембранных белков, которые служат каналами для входа в клетку и выхода из нее ионов Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- и др. Есть и другие генетические элементы (например, ген *mass-1* у мышей линии Frings), которые также связаны с судорожными разрядами.

Основное условие купирования пароксизмов при эпилепсии — постоянный прием противосудорожных средств. Поскольку это заболевание связано с повышенной судорожной готовностью мозга (высокой возбудимостью его структур), то очевидно, что поиск противосудорожных лекарств изначально был направлен именно на снижение возбудимости. Первыми по времени появления в этом ряду были барбитураты (например, люминал), затем появились соли вальпроевой кислоты, сукцинимиды и другие препараты. К сожалению, примерно 30% случаев эпилепсии не поддаются лечению этими средствами, а если и поддаются, то недостаточно эффективно. И конечно же единого лекарства от эпилепсии нет!

Последние 15 лет эта область нейробиологии активно развивается, и прогресс в знаниях весьма значителен. Он коснулся анализа тонких (клеточных и молекулярных) механизмов феномена генерации судорог и изучения новых лекарств. Можно надеяться, что на этом пути будут открыты новые возможности как диагностики, так и терапии эпилепсии.

Лабораторные животные в изучении заболеваний мозга человека

Создание и использование экспериментальных, в том числе генетических, моделей эпилепсии обычно преследует две цели — оценку эффективности новых противосудорожных средств и ис-

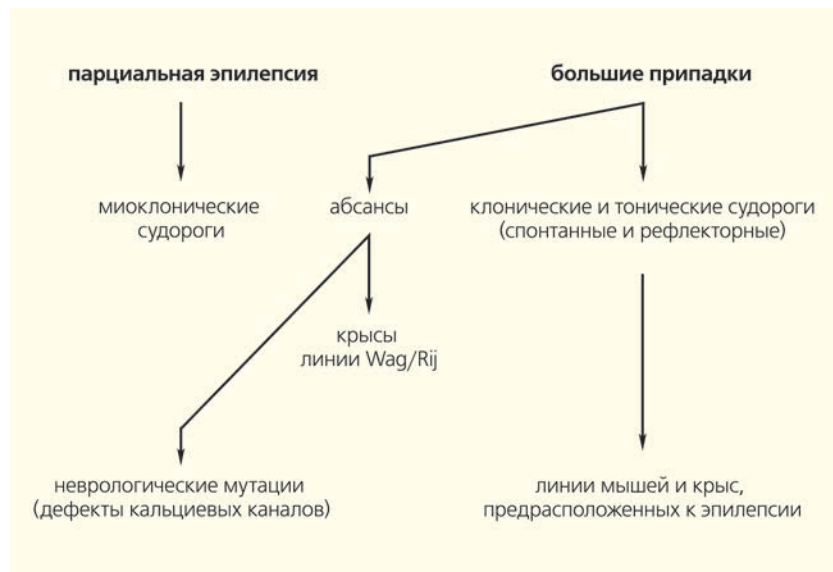


Схема основных форм эпилепсии человека и животных.

следование особенностей организации мозговых механизмов, способствующих развитию эпилептогенеза. Эта идея ненова, причем ненова настолько, что стала порождать свою противоположность. Использование лабораторных животных для воспроизведения заболеваний человека (в том числе и заболеваний его мозга) вызвало к жизни относительно новую тенденцию — стремление «защитников животных» препятствовать их использованию в биомедицинских разработках. С этим всерьез сталкиваются исследователи в США, но и у нас в стране такие выступления теперь не редкость*. Тем не менее использование специальных линий лабораторных мышей и крыс (а теперь еще и линий хомяков) в качестве генетических моделей судорожных состояний человека — это важная область современной неврологии и серьезная база для доклинических испытаний новых противосудорожных препаратов.

Моделировать судорожные состояния можно несколькими способами. Раньше применяли хемоконвульсанты и электрошок (исторически наиболее старые, но используемые иногда и сейчас методы), однако в последние годы стали популярны генетические модели и провокация судорог с использованием феномена «раскачки» (об этом речь пойдет чуть позже).

Существует несколько генетических линий грызунов, в том числе естественных и искусственных мутантов, у которых обнаружены спонтанные судороги разного типа (Wag/Rij, WAR, tottering и др.). Однако для моделирования патоло-

* Отмечу, что это не имеет отношения к современной тенденции повышения общей культуры содержания лабораторных животных и совершенствования правил работы с ними, в частности к следованию рекомендациям Декларации ЕС от 2010 г.

гического состояния мозга человека аудиогенная* (вызванная сильным звуком) эпилепсия грызунов обладает целым рядом преимуществ перед другими моделями, поскольку при этом животному не вводятся фармакологические препараты и не проводится стимуляция мозга. Эта неинвазивная модель интересна и полезна еще и тем, что результаты, полученные с ее помощью, высоко воспроизводимы. Таких животных можно подвергать действию звука неоднократно, т.е. при оценке каких-либо воздействий на них такие животные могут быть «контролем» сами себе, повышая надежность получаемых результатов.

Предыстория

В 1906 г. в Вистаровском институте (США) создали первую и до сих пор существующую породу (аутбредную линию) белых крыс Вистар, среди которых были особи, реагирующие на сильный звук настоящими эпилептиформными припадками [1].

Впервые упомянул об аудиогенных судорогах у мышей в научной литературе Ю.А.Васильев, описавший неожиданные результаты, которые получил Н.П.Студенцов (сотрудник И.П.Павлова). Типичные аудиогенные судорожные припадки у мышей он обнаружил при выработке у них условного рефлекса (инструментальной реакции) на сильный звук. В дальнейшем упоминания об этом признаке у грызунов были sporadическими вплоть до середины 40-х годов прошлого века, когда данный признак обнаружили у мышей линии DBA/2J.

Л.В.Крушинский, который работал на кафедре динамики развития биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, наверняка знал об этом явлении и, поскольку обладал и чутьем настоящего экспериментатора, и пониманием роли генотипа в реализации работы центральной нервной системы, он начал новую работу. В 1947 г. (вместе с учениками Л.Н.Молодкиной и Д.А.Флессом) он приступил к выведению из популяции Вистар крыс, у которых судороги развивались в ответ на звук. Новая линия стала быстро формироваться. Уже после нескольких поколений скрещивания между собой таких животных появилось удивительное потомство — крысы со стремительно развивавшимися типичными эпилептиформными судорогами. Прежде чем рассказать об особенностях этих судорог, остановлюсь на давней легендарной истории.

* Аудиогенная эпилепсия — это частный случай рефлекторной эпилепсии, которая встречается у животных, в том числе и у человека [1]. Описано развитие припадков у кур в ответ на зрительную стимуляцию, у монгольских песчанок — в ответ на тактильную и вестибулярную стимуляцию, у мышей EI — на стимуляцию вестибулярного аппарата. Рефлекторная эпилепсия, сходная с фотоиндуцированными припадками человека, описана у павианов *Рарю рарю*.

Наступил 1948 г., точнее его «послеавгустовское»** время. Деканом биофака МГУ стал И.И.Презент. Генетику как науку велено искоренять, а у Крушинского — новая линия крыс... Как быть? Леонид Викторович пришел в кабинет Презента с белой крысой в большой стеклянной банке. Взяв связку ключей, он постучал ею по стеклу, и крыса забилась в судорожном припадке. Говорят, что Презент испугался, но это не имеет отношения к истории. Крушинский спросил его: нужны ли такие крысы? И Презенту пришлось сказать, что они нужны советской науке. Правда, вплоть до реабилитации генетики в середине 1960-х в научных статьях о них не говорилось (видимо, неспроста). Но это действительно была первая в мире линия крыс, селективированных на предрасположенность к судорожным припадкам в ответ на звук. Спустя время она была названа линией Крушинского — Молодкиной (или коротко — линией КМ).

Примечательно, что основные (и во многом уникальные) особенности таких припадков уже были описаны в лаборатории Крушинского к началу 1960-х годов. К этим особенностям относились несколько четких признаков. Была охарактеризована картина припадков как такового и установлена его локализация (слуховые ядра, четверохолмие и др. [2]). Были обнаружены миоклонические судороги — тикообразные подергивания, которые формируются у крыс в результате многократных ежедневных воздействий звука. Выяснилось, что у этих судорог иная (нежели у большого припадков) локализация — они формируются в переднем мозге с активным участием структур лимбической системы***. Была описана так называемая постиктальная катаlepsия как особое состояние мышечного тонуса после припадков. Кроме того, у крыс КМ были обнаружены еще и нарушения мозгового кровообращения после длительной (15 мин) звуковой экспозиции. Отметим, что исследование этого феномена у крыс КМ до сих пор остается уникальным направлением в изучении крыс с аудиогенной эпилепсией, поскольку у других линий это явление не известно. В настоящее время такие исследования (в которых активное участие принимал наш, к великому сожалению, ныне покойный коллега А.Л.Крушинский, сын Л.В.Крушинского) продолжают на факультете

** Августовская сессия ВАСХНИЛ (с 31 июля по 7 августа 1948 г.) — печально известное заседание Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук имени В.И.Ленина, на котором Т.Д.Лысенко и его сторонники (ближайший из них — И.И.Презент) объявили генетику лженаукой. — *Примеч. ред.*

*** Лимбическая система включает в себя согласованно функционирующие структуры переднего мозга: обонятельный мозг, гиппокампальную формацию, миндалевидное тело и ряд других. В нее приходят сигналы из внешней и внутренней сред, которые позволяют формировать реакции, обеспечивающие адекватное приспособление организма к внешней среде и сохранение общего гомеостаза.

фундаментальной медицины В.Б.Кошелевым и его коллегами. Подробнее о крысах линии КМ написано в двух главах коллективной монографии «Формирование поведения животных в норме и патологии», посвященной 100-летию со дня рождения Л.В.Крушинского (2013).

Тут надо упомянуть, что впоследствии были селектированы и другие линии крыс, предрасположенные к аудиогенной эпилепсии. В Аризонском университете (США) на основе аутбредной линии Спрэг—Доули были выведены две линии GEPR (Genetic Epilepsy Prone Rats) с высокой и низкой интенсивностью судорог [3]. Линия WAR (Wistar Audiogenic Rats) была создана в Бразилии, причем, как и у крыс КМ, ее предками были крысы Вистар [4]. В НИИ фармакологии имени В.В.Закусова была выведена новая линия крыс ЛЭС (Лонг—Эванс—Селекция), которая, к сожалению, прекратила свое существование, хотя это был уникальный случай формирования аудиогенных судорог у крыс пигментированной линии (остальные линии — альбиносы). Аудиогенные судорожные припадки невысокой интенсивности можно обнаружить примерно у 15–20% крыс Вистар некоторых стоков, а также у крыс линии WAG/Rij, для которых характерны эпилептиформные приступы типа абсансов [5].

У мышей инбредной линии DBA/2J аудиогенные судороги появляются во второй декаде постнатального развития, но потом исчезают. Установлено, что за развитие этих судорог ответственны три локуса. У мышей Frings, селектированных на аудиогенную эпилепсию во Франции в начале 1950-х годов, был открыт ген *mass-1* (monogenic audiogenic seizure-susceptible, его более позднее наименование — *Vlgr1*) [6]. Мутация этого гена, кодирующего фрагмент мембранного белка, и определяет аудиогенные судороги. Точно установлено, что *Vlgr1* не относится к категории генов, порождающих «каналопатии», и имеет иную локализацию, нежели у DBA/2J. Аудиогенные судорожные припадки обнаруживались у мышей линий BALB/c и Black Swiss. У мышей линии 101/HY, которая несет мутацию в локусе, отвечающем за репарацию ДНК после действия химических мутагенов, помимо ряда других «мелких» неврологических отклонений обнаружена также и аудиогенная эпилепсия.

Феноменология и генетика аудиогенной эпилепсии

Эпилептиформные судорожные припадки, которые развиваются в ответ на действие сильного звука, у грызунов (крыс всех линий, мышей, хомяков) протекают однотипно. В ответ на включение звука животное буквально срывается в быстрый бег с прыжками. В лаборатории Крушинского эту стадию называли двигательным возбуждением (в англоязычной литературе — wild run stage, ста-

дией дикого бега). Эта фаза припадка имеет, по видимому, смешанную природу. С одной стороны, у животного проявляется бурная оборонительная реакция (попытка убежать от неприятного, пугающего звука), с другой — заметны черты непроизвольных движений, что свидетельствует о начале собственно судорожной реакции на звук. Некоторые авторы называют эту фазу клоническим бегом (от греч. κλονος — суматоха, толкотня). Если предоставить возможность избежать действия звука, то в течение фазы двигательного возбуждения одни животные действительно это делают, тогда как другие — остаются в камере. Фаза двигательного возбуждения была подробно проанализирована у крыс КМ [7].

У животных с невысокой судорожной готовностью припадок может закончиться сразу после «дикого бега», но у высокочувствительных крыс селектированных линий развиваются следующие стадии судорог: клонические (ритмичные интенсивные спазмы мышц с падением на живот) и тонические (интенсивное тоническое напряжение мышц всего тела в положении на боку). Стадия тонических судорог развивается почти у 100% крыс КМ через 7–9 с после включения звука (выражаясь генетическими терминами, у них обнаруживаются максимальные пенетрантность и экспрессивность этого признака).



Схема развития аудиогенного судорожного припадка у крысы.

Наиболее подробный анализ генетических основ высокой чувствительности к звуку у крыс КМ был проведен Л.Г.Романовой [8]. Из результатов, полученных, в частности, методом диаллельного скрещивания, следовало, что данный признак определяется несколькими генами и их действие аддитивно, с доминированием аллелей, определяющих нечувствительность к звуку. Анализ проявлений аудиогенных судорог у крыс-гибридов (F2 и беккроссов) между линиями КМ и Вистар показал, что наследование этого признака можно объяснить действием двух генов, которое видоизменяется под влиянием генов-модификаторов, что подтверждает выводы из данных по диаллельному скрещиванию [9].

Результаты селекции линии WAR с несомненностью свидетельствуют о значимой генетической составляющей в исследуемом признаке [4]. Предрасположенность к аудиогенной эпилепсии у крыс GEPR так же, как и у КМ, наследуется как полигенный аутосомный признак [10].

Мыши DBA/2J максимально чувствительны к звуку в возрасте 21 дня, затем этот признак постепенно ослабевает и к 45-му дню их жизни исчезает (возможно, из-за развития у них глухоты). Наследование признака у этих мышей не может быть моногенным (у них описано минимум три локуса!), причем картина осложняется еще и тем, что этот признак относится к категории «пороговых». Пороговыми называют такие количественные признаки, которые могут проявиться в фенотипе только по достижении ими определенной величины, т.е. некоего «порога», при выполнении некоторых «физиологических» условий. Фенотипическая картина такого признака в популяции может имитировать бимодальное (или иное) распределение. Поскольку проявление аудиогенного припадка требует функционирования целого ряда физиологических систем организма, это предположение представляется вполне обоснованным.

Более подробный анализ природы фазы двигательного возбуждения, который был проведен с использованием стимуляции и самостимуляции структур четверохолмия мозга у крыс, дал сходные результаты. Микроинъекции бикакулина (антагониста рецептора ГАМК_A — ионного канала, который тормозит передачу нервного возбуждения) в нижнее двухолмие (подкорковый слуховой центр) вызывает судорожные припадки, сходные с аудиогенными, даже у тех крыс, которые не предрасположены к аудиогенной эпилепсии. Однако они никогда не переходили в клонико-тоническую фазу, реакции животных в целом напоминали реакцию бегства. В то же время неприятную для них электрическую стимуляцию нижнего двухолмия крысы могли прерывать (т.е. осуществлять инструментальную реакцию), только если электроды находились в вентральной части центрального ядра нижнего двухолмия, но не в его коре [11].

Очевидно, что особенности строения и функции органа слуха у животных с аудиогенной эпилепсией могут определять эту аномалию. Такие аномалии, нечетко связанные с повышенной судорожной готовностью, неоднократно обнаруживали и у крыс (GEPR), и у мышей (Black Swiss, Frings). У Black Swiss было выявлено четкое снижение порогов слуховой чувствительности к возрасту 4–5 мес, однако наследовалось оно независимо от предрасположенности к аудиогенной эпилепсии [12]. У мышей Frings (с нарушенным геном *Vlgr1*) были обнаружены и аудиогенная эпилепсия, и снижение слуха — независимо от генетического фона линии (т.е. от экспрессии мутантного гена). Таким образом, аудиогенная эпилепсия, несомненно, порождается изменениями функции (а может быть, и морфологическими особенностями) органа слуха, при этом у животных разных линий с аудиогенной эпилепсией отмечается снижение слуховой чувствительности.

Как выглядят аудиогенные судороги на ЭЭГ

Электрофизиологическое исследование аудиогенной эпилепсии у крыс линии КМ было начато вскоре после появления метода записи суммарной ЭЭГ крыс [2]. Типичные (характерные для эпилепсии человека) эпилептиформные разряды «пик-волна» регистрировались из области продолговатого мозга (слухового и вестибулярного ядер) с самого начала и в течение всех фаз приступа, что свидетельствовало о локализации первичного очага патологического возбуждения в этом отделе. Позднее были зарегистрированы и высокочастотные разряды отдельных нейронов. В новой коре и структурах переднего мозга, напротив, при фазе «быстрого бега» появлялся синхронизированный тета-ритм, а при тонических судорогах — вспышки быстрых волн. Иными словами, в период тонической фазы припадка в новой коре судорожных ЭЭГ-коррелятов не выявлялось, что считается отличительным признаком аудиогенного судорожного припадка. Хирургическое удаление двигательной области новой коры не препятствует развитию аудиогенного судорожного приступа, тогда как электрическое раздражение задних бугров четверохолмия и медиальных коленчатых тел вызывало припадок по типу развернутых аудиогенных судорог. Эти выводы были подтверждены в экспериментах с использованием метода распространяющейся депрессии (аппликация раствора KCl) — выключение коры и стриатума не останавливало развития такого припадка. Сходные данные были получены и на крысах линий GEPR и WAR.

Позднее, на основе большого экспериментального материала по крысам GEPR, была построена схема распространения возбуждения по мозгу при аудиогенном судорожном приступе [13]. Кри-

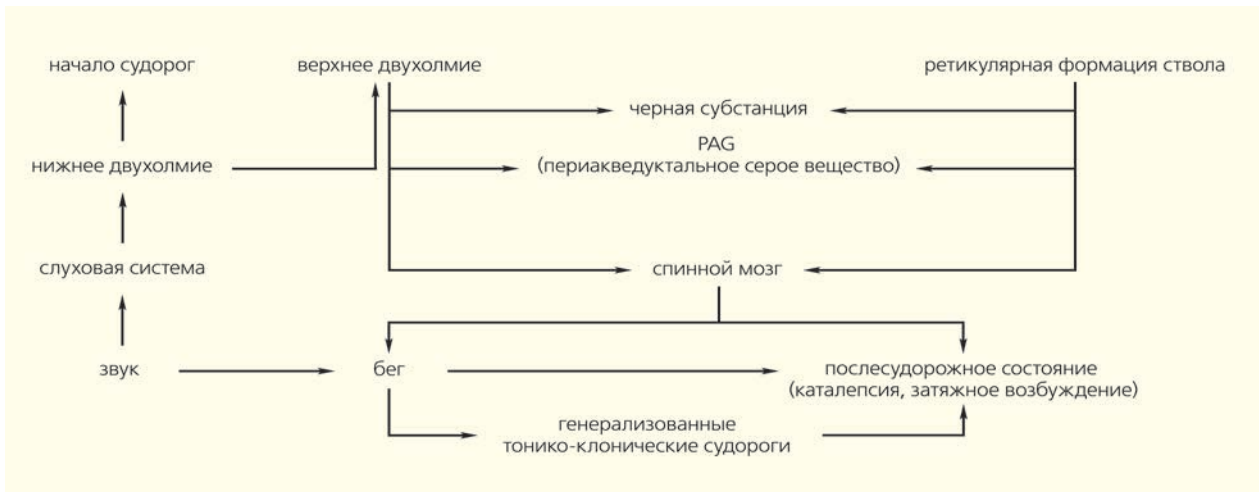


Схема связей структур ствола мозга крысы при развитии аудиогенного судорожного припадка.

тической структурой, судя по этим данным, является нижнее двуххолмие, поскольку активация нейронных разрядов в ней предшествует началу приступа. Для фазы двигательного возбуждения критически важным оказывается распространение возбуждения на глубинные отделы верхнего двуххолмия, поскольку усиление нейронных разрядов в нем предшествуют началу двигательного возбуждения. Распространение возбуждения в ретикулярное ядро моста и околородопроводное серое вещество приводит к началу клонико-тонической фазы приступа [11].

Миоклонический гиперкинез и раскачка

Повторное воспроизведение аудиогенного судорожного приступа постепенно приводит к развитию судорожного состояния другой природы. Ежедневное действие звука на крыс, предрасположенных к аудиогенной эпилепсии, вызывает постепенное формирование тикоподобных подергиваний сначала отдельных мышц головы, а затем туловища и конечностей (миоклонического гиперкинеза). Отнюдь не сразу, а только после подробного анализа этого феномена, стало ясно, что этот тип судорог идентичен судорожным состояниям, которые развиваются в мозге крыс при ритмическом, подпороговом (т.е. не вызывающем судорог) электрораздражении либо гиппокампа, либо структур миндалевидного комплекса. Этому явлению в русскоязычной литературе подобрано удачное название — «раскачка» (в англоязычной — kindling, зажигание). А такая раскачка, по многим достаточно убедительным данным, рассматривается как модель «височной» формы эпилепсии человека.

Как уже говорилось, судорожный припадок и миоклонический гиперкинез, которые вызывает один и тот же агент, различаются по физио-

логическим механизмам. Если «очаг» аудиогенного судорожного припадка — в стволе мозга, то формирование миоклонического гиперкинеза у крыс КМ было возможным только при условии целостности новой коры — хирургическое удаление новой коры предотвращало их появление. По ходу формирования миоклонического гиперкинеза эпилептиформные разряды «пик-волна» у крыс КМ первоначально возникали в подкорковых структурах, но их внешние проявления можно было наблюдать только после появления таких разрядов в новой коре. Распространяющаяся депрессия в коре полностью устраняла этот тип судорог.

Экспериментальные свидетельства важной роли гиппокампа в генезе миоклонических судорог у крыс линии КМ были получены в исследовании З.А.Зориной и Д.А.Флесса [14]. Они выяснили, что аудиогенный приступ можно затормозить (т.е. остановить фазу быстрого бега) активацией гиппокампа, воздействуя на него слабым электрическим раздражением. Точно такой же эффект имело введение мепротана или брома, заведомо снижающих возбудимость переднего мозга. Однако более сильная электростимуляция гиппокампа провоцировала появление типичных миоклонических судорог [2].

Мозговые нейротрансмиттеры

У крыс с аудиогенной эпилепсией на высоте припадка четко изменяются уровни важных нейрохимических показателей активности мозга, причем у крыс КМ имеются отклонения и в фоновых уровнях ряда нейромедиаторов [2]. В большом числе нейрохимических исследований были надежно продемонстрированы и связь аудиогенной эпилепсии с дисбалансом в уровнях моноаминов, нейромедиаторных аминокислот и их метаболи-

тов, и аномалии процессов перекисного окисления липидов и системы, связанной с механизмами действия NO [15]. У крыс GEPR-9 эпилептиформная активность структур ствола сопровождалась повышенной активацией глутаматергической системы и сниженной функцией ГАМК-ергической системы. Оказалось также, что в нижнем двуххолмии крыс этих линий увеличено (до 70%) число мелких ГАМК-ергических нейронов. Недавно особенности экспрессии белков ГАМК-системы в нижнем двуххолмии были продемонстрированы и у крыс КМ [16].

В стриатуме крыс КМ вне приступа обнаруживаются аномалии в уровнях дофамина и его метаболитов, что может быть непосредственно связано с дефицитом «тормозного контроля» при действии сильного звука. Повышенный уровень дофамина в стриатуме крыс КМ был обнаружен также и с помощью прижизненного микродиализа [17]. При исследовании активности ERK1/2 киназ в нигростриатной системе крыс линии КМ было отмечено, что активация этой системы также может быть причиной снижения тонуса ГАМК-ергической системы и, соответственно, повышения возбудимости [18], тогда как компенсаторные изменения на клонико-тонической стадии приступа могут быть одним из механизмов остановки судорог, изучение которого также немаловажно.

* * *

Есть вопрос, который практически не затрагивается в современной литературе по аудиогенной эпи-

лепсии: почему аудиогенная эпилепсия обнаруживается только у грызунов? Можно предположить, что высокая чувствительность животных этой группы к звуку — отражение их экологической специализации. Большинство грызунов — ночные животные, и обостренный слух для них — важный фактор защиты от неприятностей. Можно предположить, что аудиогенные судороги в том виде, в каком мы их наблюдаем, — это «побочный результат» такой специализации. Можно предположить, что аудиогенный припадок (с его уникальной фазой «стремительного бега») — это усиленная (по генетическим причинам) реакция избегания сильного источника звука, а каталепсия, которой заканчивается такой припадок (и для описания которой в настоящей статье места не хватило, как не хватило места для более подробного описания работ последних лет), — это так же патологически усиленная реакция замирания (как вариант реакции на опасность). Но это предположение, хотя, возможно, и доступно экспериментальной проверке, пока остается лишь предположением.

Исследования феноменологии и фармакологии аудиогенного приступа, проведенные Л.В. Крушинским и его коллегами достаточно давно, показали, что в основе развития такого припадка лежит нарушение равновесия между возбуждением и торможением. Современные взгляды на эти процессы полностью совпадают с чисто гипотетическими объяснениями, которые дал этим явлениям Л.В. Крушинский. Следовало бы сделать вывод, что надо иногда перечитывать классиков. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-04-01732).

Литература / Reference

1. Ross K.S., Coleman J.R. Developmental and genetic audiogenic seizure models: behavior and biological substrates. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2000; 24(6): 639–653.
2. Семиохина А.Ф., Федотова И.Б., Поletaева И.И. Крысы линии Крушинского—Молодкиной: исследования аудиогенной эпилепсии, сосудистой патологии и поведения. *Журн. высш. нерв. деят.* 2006; 56: 298–316. [Semiokhina A.F., Fedotova I.B., Poletaeva I.I. Rats of Krushinsky-Molodkina strain: studies of audiogenic epilepsy, vascular pathology and behavior. *I.P.Pavlov Journal of Higher Nervous Activity.* 2006; 56: 298–316. (In Russ.)]
3. Consroe P., Piccioni A., Chin L. Audiogenic seizure susceptible rats. *Fed. Proc.* 1979; 38(10): 2411–2416.
4. Doretto M.C., Fonseca C.G., Lobo R.B., Terra V.C., Oliveira J.A., Garcia-Cairasco N. Quantitative study of the response to genetic selection of the Wistar audiogenic rat strain (WAR). *Behav. Genet.* 2003; 33(1): 33–42.
5. Кузнецова Г.Д. Аудиогенные судороги у крыс разных генетических линий. *Журн. высш. нервн. деят.* 1998; 48(1): 143–152. [Kuznetsova G.D. Audiogenic seizures in rats of different genetical strains. *I.P.Pavlov Journal of Higher Nervous Activity.* 1998; 48(1): 143–152. (In Russ.)]
6. Klein B.D., Fu Y.H., Ptacek L.J., White H.S. Auditory deficits associated with the Frings vmgr1 (mass1) mutation in mice. *Dev Neurosci.* 2005; 27(5): 321–332.
7. Fless D.A., Salimov R.M. An analysis of the phase of prespasmodic motor excitation in rats with audiogenic seizures. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine.* 1974; 78(9): 31–33. (In Russ.)
8. Романова Л.Г., Поletaева И.И., Ремус Б. Анализ наследования чувствительности к звуку у крыс. *Журн. высш. нерв. деят.* 1976; 26 (4): 772–777. [Romanova L.G., Poletaeva I.I., Remus B. The analysis of audiogenic sensitivity in rats by means of diallel cross. *I.P.Pavlov Journal of Higher Nervous Activity.* 1976; 26(4): 772–777. (In Russ.)]
9. Федотова И.Б., Костына З.А., Поletaева И.И. и др. Генетический анализ предрасположенности крыс линии Крушинского—Молодкиной к аудиогенной эпилепсии. *Генетика.* 2005; 41:1487–1494.

- [Fedotova I.B., Kostyna Z.A., Poletaeva I.I. et al. Genetic analysis of the predisposition to audiogenic seizure fits in Krushinsky-Molodkina rat strain. Russian Journal of Genetics. 2005; 41(11): 1223–1229. (In Russ.)]
Doi:10.1007/s11177-005-0223-5.
10. Ribak C.E., Roberts R.C., Byun M.Y. et al. Anatomical and behavioral analyses of the inheritance of audiogenic seizures in the progeny of genetically epilepsy-prone and Sprague-Dawley rats. *Epilepsy Res.* 1988; 9(2): 345–355.
 11. Garcia-Cairasco N. A critical review on the participation of inferior colliculus in acoustic-motor and acoustic-limbic networks involved in the expression of acute and kindled audiogenic seizures. *Hear. Res.* 2002; 168(1–2): 208–222.
 12. Misawa H., Sherr E.H., Lee D.J., Chetkovich D.M., Tan A., Schreiner C.E., Brecht D.S. Identification of a monogenic locus (*jams1*) causing juvenile audiogenic seizures in mice. *J. Neurosci.* 2002; 22(23): 10088–10093.
 13. Faingold C.L., Randall M.E. Neurons in the deep layers of superior colliculus play a critical role in the neuronal network for audiogenic seizures: mechanisms for production of wild running behavior. *Brain Res.* 1999; 815(2): 250–258.
 14. Зорина З.А., Флесс Д.А. Фармакологический анализ механизма миоклонических судорог крыс. Бюлл. эксп. биол. и мед. 1969; 67(1): 45–47. [Zorina Z.A., Fless D.A. Pharmacological analysis of the mechanism of myoclonic convulsions in rats. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine.* 1969; 67(1): 45–47.]
 15. Poletaeva I.I., Surina N.M., Kostina Z.A., Perepelkina O.V., Fedotova I.B. The Krushinsky–Molodkina rat strain: The study of audiogenic epilepsy for 65 years. *Epilepsy Behav.* 2015; S1525-5050(15)00251-6. Doi:10.1016/j.yebeh.2015.04.072.
 16. Солюс Г.М., Ревущин А.В., Павлова Г.В., Поletaева И.И. Аудиогенная эпилепсия и ГАМК-ергическая система нижнего двухолмия у крыс линии Крушинского—Молодкиной. ДАН. 2016; 466: 32–34. [Solius G.M., Revisbchin A.V., Pavlova G.V., Poletaeva I.I. Audiogenic Epilepsy and GABAergic System of the Colliculus Inferior in KrushinskyMolodkina Rats. *Doklady Biochemistry and Biophysics.* 2016; 466: 32–34. (In Russ.)]
Doi:10.1134/S1607672916010099.
 17. Сорокин А.Я., Полтаева И.И., Кудрин В.С. и др. Межлинейные различия в эффектах амфетамина и раклоприда на активность дофаминергической системы в дорзальном стриатуме крыс линии КМ и Вистар (микродиализное исследование). Генетика. 2004; 40(6): 846–849. [Sorokin A.Ya., Poletaeva I.I., Kudrin V.S. et al. The interstrain differences in the effects of D-amphetamine and raclopride on dorsal striatum dopaminergic system in KM and Wistar rats (microdialysis study). *Russian Journal of Genetics.* 2004; 40(6): 688–690. Doi:10.1023/B:RUGE.0000033318.86523.59.]
 18. Коротков А.А., Глазова М.В., Никитина Л.С., Дорофеева Н.А., Кириллова О.Д., Черниговская Е.В. Роль ERK1/2 киназ в молекулярных механизмах регуляции глутамат- и ГАМК-ергических нейронов в ходе развития судорожных припадков у крыс линии Крушинского-Молодкиной. РФЖ им. И.М.Сеченова. 2015; 101 (10): 1135–1149. [Korotkov A.A., Glazova M.V., Nikitina L.S., Dorofeeva N.A., Kirillova O.D., Chernigovskaya E.V. Molecular mechanisms of ERK1/2 kinases regulation in the glutamate- and GABA-ergic neurons during seizure expression in Krushinsky-Molodkina rats. *I.M.Sechenov Physiological Journal.* 2015; 101(10): 1135–1149. (In Russ.)]

Audiogenic epilepsy in rodents

Poletaeva I.I.

Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

The main problems of experimental models of epilepsy are delineated in this article, as epilepsy is one of the most serious human neurological diseases. The main attention was paid to the description of the so called audiogenic epilepsy in rodents — the epileptiform seizures which develop in rats and mice of several strains in response to loud sound. The mechanism of this phenomenon is the issue which interests both neurophysiologists and molecular biologists. The peculiarities of audiogenic epilepsy and the main results of its analysis are described. The special attention was paid to the history of Russian rat strain Krushinsky—Molodkina and the main results obtained using these animals.

Key words: audiogenic epilepsy, Krushinsky—Molodkina rat strain.

Глиняное совершенство амурского неолита

В.Е.Медведев

Институт археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск, Россия)

Представлены результаты изучения керамики пяти неолитических культур Нижнего Приамурья, появившейся как нигде в России рано (около 14 тыс. лет назад) и отличающейся особым обилием и разнообразием. Обломки древнейших сосудов из обожженной глины были обнаружены в слоях начального неолита (относимых прежде к мезолиту) осиповской культуры в памятниках Гасы и Гоян. Найден раздавленный сосуд усеченно-конической формы с рифленой поверхностью. Развитая керамика представлена мариинской культурой раннего неолита (10–9 тыс. лет назад). Более совершенное гончарное мастерство было у носителей кондонской и малышевской культур поздней стадии раннего и среднего неолита. Ассортимент их посуды весьма широк, почти вся она декорирована. В период функционирования в позднем неолите вознесенской культуры ее создатели оставили после себя богатейшую, зачастую технически филигранно изготовленную керамику с художественно-утонченной орнаментикой. Подобные образцы сосудов, не имеющих аналогий в неолите соседних регионов, поистине сродни таинственной феерии.

Ключевые слова: Приамурье, неолитические культуры, керамика, сосуды, орнамент, гончарство.

Изделия из глины (керамика — первый искусственный материал, воплощенный в посуде) оказали огромное влияние на развитие практической по крайней мере за последние 13–14 тыс. лет. Многие специалисты считают именно сосуды из глины одним из главных и диагностических критериев определения неолита — новокаменного века. Хочется заметить, что сегодня на планете найдется немного людей, не обладающих хотя бы одним сосудом, сделанным из глины. Без изделий из обожженной глины (украшений, игрушек, строительного материала, а в последнее время деталей механизмов, медицинских приспособлений и др.) трудно представить нашу современную жизнь.

Приамурье — очаг древнейшего гончарства

До 1960-х годов, когда на японских островах Кюсю и Сикоку (пещера Фукуи и скальный навес Камикоураива) была найдена керамика, возраст которой оказался свыше 11–12 тыс. лет, древнейшей в мире считалась керамика, созданная не ранее 7–9 тыс. лет назад. Найденные в позднелепесточных культурных слоях японских памятников обломки сосудов были обеспечены радиоуглерод-



Виталий Егорович Медведев — доктор исторических наук, заведующий сектором неолита Института археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск), заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов — археология, история древности и Средневековья Дальнего Востока, Восточной и Центральной Азии.

ными изотопными датировками (затем другие соседние островные памятники с подобными находками удивительно раннего возраста были датированы и иными методами). Первоначально реакция большинства исследователей на это открытие была скептической, в лучшем случае находки считали локальным явлением.

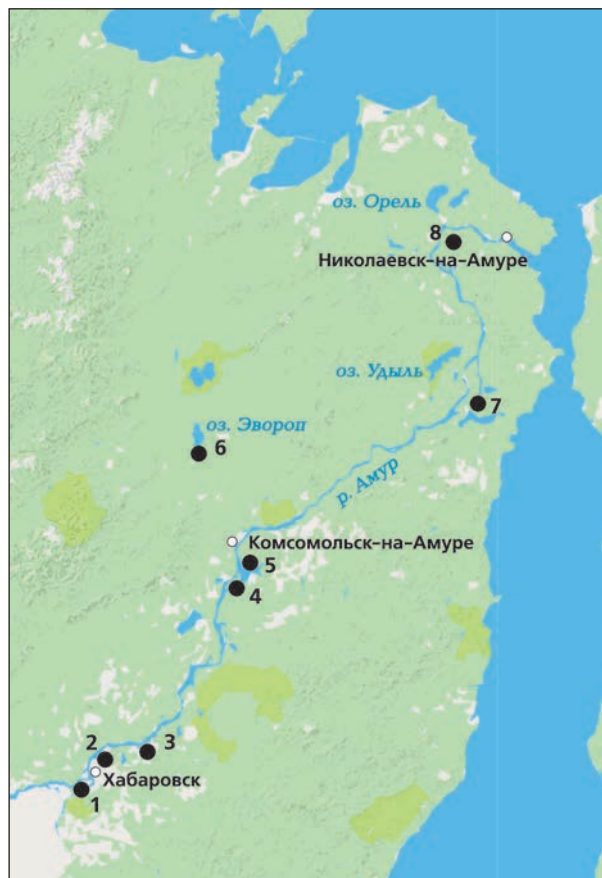
Уже в 1970-х годах в ходе работ археологического отряда Института истории, филологии и философии СО АН СССР (ныне Институт археологии и этнографии СО РАН) в окрестностях амурского села Сакачи-Алян были открыты три многослойных памятника. В их нижних слоях, относящихся к осиповской археологической культуре, уверенно зафиксирована керамика, датируемая периодом 11–13 тыс. лет назад. Первый памятник с керамикой названной культуры (ее считали в то время из-за отсутствия в ней изделий из обожженной глины мезолитической) был выявлен на нижней

окраине Сакачи-Альяна. В 1975 г. на противоположной, верхней, окраине села, на утесе Гася, в основании осиповского культурного горизонта вместе с каменным инвентарем и остатками очага были найдены фрагменты необычного сосуда, не имевшего аналогов среди известной керамики Дальнего Востока и сопредельных регионов. Впервые под двухметровой толщей грунта в стратиграфически безупречной ситуации (*in situ*) в осиповском «мезолитическом»* слое была зарегистрирована керамика — один из основополагающих компонентов материальной базы культур неолитического времени.

Новые материалы были получены в 1980 г. в ходе возобновленных на древнем поселении раскопок. Наряду с разрозненными черепками обнаружены части раздавленного сосуда. Они залегали на глубине 210–224 см от современной поверхности в нижней надматериковой пачке того же слоя (литологически связанного с плотными глинами и суглинками), что и находки 1975 г. Остатки сосуда размещались в пределах обширного углистого прокаленного пятна, образовавшегося на месте существовавшего наземного жилища типа чума. Располагавшаяся сплошным аморфным пластом наподобие большой бесформенной лепешки керамика представляла собой едва различимую по цвету и плотности массу. Она была в основном мягкой, словно сосуд древние не обжигали. После тщательной просушки под слоем бумаги его фрагменты затвердели, и их удалось отделить друг от друга, что позволило реконструировать сосуд. Емкость представляла собой простейшую усеченно-коническую форму типа ситутлы** с плоским дном (плоскодонность — характерная черта керамики амурского неолита). Высота его была до 26 см, толщина стенок и дна 1.2–1.7 см. Внешняя поверхность изделия покрыта узкими параллельными вертикальными желобками, внутренняя — тоже желобками, но ориентированными горизон-

* Палеолит, мезолит и неолит — подразделения каменного века, выделяемые преимущественно по особенностям каменной индустрии. В Евразии поздний палеолит в основном датируется периодом 40–12 тыс. лет назад, что соответствует концу плейстоцена по геохронологической шкале. Мезолит (средний каменный век) относится к периоду от 15–10 до 8–5 тыс. лет назад. На мезолит приходится рубеж плейстоцена и голоцена (современной геологической эпохи — последнего незавершенного подразделения четвертичной системы), датированный временем около 10 тыс. лет назад. Начало неолита во многих регионах относят ко времени 9–8 тыс. лет назад. Окончание его в различных природно-климатических зонах происходило в разное время. На юге Дальнего Востока России, включая Приамурье, — около 3.5–3.3 тыс. лет назад. Под начальным неолитом предлагается понимать эпоху в возрастных границах 14–11 тыс. лет назад, когда в культуре на фоне мезолитических орудий появляются признаки неолитичности.

** Ситутла — сосуд в форме ведра. В неолите изготавливали из терракоты, в эпоху металла часто использовалась также бронза.



Карта расположения основных рассматриваемых памятников неолита в Нижнем Приамурье: 1 — Гончарка-1; 2 — Осиповка-1; 3 — Гася, Госян; 4 — Вознесенское; 5 — Хумми; 6 — Кондон-Почта, Кондон-Школа; 7 — Сучу; 8 — Тахта.

тально. Возраст сосуда, определенный радиоуглеродным методом, — 12 960±120 лет назад [1, 2]. Уже при первом петрографическом анализе керамики в Институте геологии и геофизики СО РАН (Новосибирск) выяснилось, что в ее глинистом тесте имеются примеси искусственного характера (кусочки горной породы без следов корки выветривания, окатанные зерна кварца и полевого шпата). Есть в нем также органика, следы растительных остатков, дробленный шамот***. Температура обжига первого реконструированного сосуда осиповской культуры была очень низкой — около 350°C. Позже керамика из раскопок Гаси, включая описываемый сосуд, была подвергнута технико-технологическому анализу в лаборатории «История керамики» Института археологии РАН (Москва). Было, в частности, установлено, что при конструировании сосуда использовался лоскутный налеп, когда на подготовленную форму-модель, покрытую каким-то материалом во избежание прилипания к ней, накладывались бесформенные кусочки глинистой (илистой) массы. По-

*** Петрографический анализ проведен Н.Н.Добрецовым.



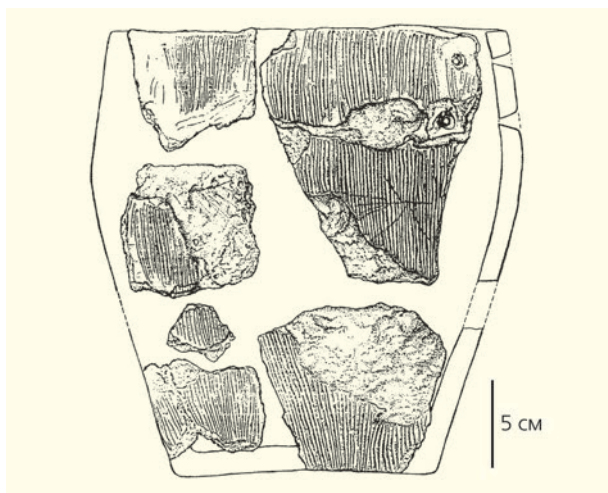
Раскоп I в момент зачистки сосуда осиповской культуры начального неолита возрастом 13 тыс. лет. Гася, 1980 г.

Фото О.С.Медведевой



Фрагмент «осиповского» сосуда. Гася.

Фото В.Н.Кавелина



«Осиповский» сосуд, реконструкция автора. Гася.

Прорисовка Ю.В.Таваревой

верхность изделия заглаживали орудием с гребенчатым рабочим краем, отчего она становилась желобчато-рифленной (подобная поверхность характерна для всей осиповской керамики). Выявлено также, что гончары поселения Гася применяли обваривание раскаленных сосудов (вероятнее всего, в целях ритуального очищения новых изделий перед их использованием в быту) [3].

Спустя непродолжительное время исследования Гася были продолжены. В восьми раскопах и одной разведочной траншее общей площадью около 1 тыс. м² найден многочисленный «осиповский» инвентарь различного назначения, а также выявлены образцы мобильных форм искусства (мелкая пластика) и украшения. Развалы или крупные части сосудов обнаружить не удалось, однако было встречено значительное количество небольших фрагментов. Относятся они к нескольким хронологическим фазам осиповской культуры, существовавшей в самом конце плейстоцена. Это подтверждено серией радиоуглеродных датировок, укладывающихся во временной диапазон от 12 960±120 до 10 875±90 лет назад. Одновременно с исследованием поселения Гася проведены раскопки расположенного рядом другого памятника (Госян) с осиповским культурным слоем, в котором также была зафиксирована керамика, во многом близкая гасинской.

Открытие столь древней керамики на амурском берегу многими учеными было принято не сразу. Только спустя полтора-два десятка лет, после находок обломков сосудов в других памятниках осиповской культуры на Амуре (Хумми и Гончарка-1) [4], подтверждающих наши исследования, специалисты признали проблему древнейшего гончарства на Российском Дальнем Востоке одной из приоритетных и значимых в археологии.

Исчезли сомнения, что в «мезолите» (переходном периоде) региона могла быть керамика.

Осиповская культура с зародившимися и удивительно рано укоренившимися в ней признаками неолитичности*, которые проявились также в ее общем облике и в образе жизни ее носителей, была образцом передовой формы бытия той эпохи. Наряду с керамикой, разнообразнейшим каменным инструментарием (в том числе шлифованными орудиями), жилищами-полуземлянками, продуктивной экономикой (с высокой ролью рыболовства) в ней развивалось яркое искусство — петроглифы, круглая каменная и керамическая скульптура, известны даже украшения (серьги, бусы). Эти компоненты, отражающие материальную и духовную жизнь, — наиболее древние (или одни из наиболее древних) не только в Дальневосточном регионе, но и на территории всей Евразии. Осиповскую культуру теперь исследователи не без оснований относят к продуктам древнейшей проточивилизации.

Следует сказать, что люди (преимущественно в ряде регионов Северной Евразии) уже в позднем палеолите были способны использовать в быту и обжигать глину. Это относится, прежде всего, к изделиям, связанным с магическими обрядами (фигуркам животных, человека). Появление именно глиняной посуды и ее постоянное, а не спорадическое производство в финале палеолита — начальном неолите прослеживается в районах Восточной Азии, куда входит также Нижнее Приамурье [5, с.33]. Любопытным представляется результат исследования глиняной чашечки из палеолитического святилища возрастом 14–16 тыс. лет в Каповой пещере (Южный Урал). У чашечки обожжена только внутренняя поверхность, поэтому предполагается, что она служила жировой лампой и обжиг ее происходил за счет горения расплавленного жира. Легко допустить, что в памятниках палеолита глиняные сосуды могли просто не сохраниться, поскольку не были обожжены [6, с.56, 60]. Настоящее же гончарство в те времена существовало лишь в восточной части Азии.

Культурно-хронологический вакуум и его заполнение

До введения осиповской культуры в статус неолитической общее количество культур данной эпохи

* Началом неолита чаще всего считают появление керамики, терракотовых сосудов — своего рода маркера перемен в производственной деятельности древних — и другие новации в их первобытной технике (широкое распространение шлифования, пиления, сверления и др., разнообразные орудия по обработке дерева). К признакам неолитичности относится также строительство деревянных жилищ, изготовление лодок, большая роль в экономике рыболовства, разножанровое искусство, в том числе объемная скульптура.

в регионе ограничивалось тремя — малышевской и кондонской (конец раннего — средний неолит) и вознесенской (поздний неолит). Сложилась ситуация, в которой между наиболее поздними памятниками осиповской и наиболее ранними малышевской культур образовался более чем двухтысячелетний культурно-хронологический вакуум. Можно было лишь гадать, чем он заполнится, но продолжалось это недолго. В конце 90-х годов прошлого столетия и в начале нынешнего века при раскопках на о.Сучу поблизости от села Мариинского был обнаружен культурный пласт с обильными каменными и керамическими находками, необычными в сравнении с известными древностями нижнего Амура. Они залежали под погребенной почвой глубже артефактов среднего и позднего неолита. Материал был датирован по углю радиоуглеродным методом, возраст его оказался 9–10 тыс. лет. Помимо Сучу, вещевые комплексы, отнесенные ввиду их оригинальности и многочисленности к новой, мариинской, культуре раннего неолита, были также выделены в материалах других нижнеамурских памятников (таких, как Кондон-Почта, Иннокентьевка, Петропавловка-Остров и др.). Так мариинская культура стала пятой неолитической культурой, охватившей многие районы северо-восточной, средней и юго-западной частей Нижнего Приамурья.

Первые же исследования керамики этой культуры позволили выявить ряд особенностей гончарных традиций ее носителей. При всей внешней архаичности ее сохранность лучше осиповской. Это плоскодонные, чаще приземистые, горшковидные, ситуловидные и бочонковидные сосуды преимущественно средних и малых размеров с диаметром



Склеенный сосуд. Мариинская культура раннего неолита (10–9 тыс. лет назад). Сучу.

Фото О.С.Медведевой

тулова и высотой до 32 см. Орнамент наносился в районе венчика или чуть ниже его и на торце различными гребенчатыми штампами [7]. Конструирование сосудов производилось в основном лоскутным налепом на форме-основе. В целом гончарные традиции носителей мариинской культуры более развитые по сравнению с традициями создателей осиповской культуры [8].

Находки из обожженной глины, керамика осиповской и мариинской культур начального и раннего этапов неолита наглядно демонстрируют, что такая сфера производственной деятельности обитателей берегов Амура и его окрестностей, как гончарство, развивалась устойчиво, хотя, исходя из наших современных представлений, весьма медленными темпами. Раскопаны значительные площади памятников от 8–10- до 14-тысячелетней давности с артефактами осиповской и мариинской культур. Но при сотнях и тысячах встреченных разобщенных обломков посуды найдены лишь единичные едва целые сосуды (развалы), принадлежащие прежде всего второй из упомянутых культур. Конечно, не исключено, что будущие исследования других объектов начального и раннего этапов неолита изменят количественное соотношение древностей. Сегодня же можно сделать вывод: возникшее весьма рано производство глиняной посуды в Приамурье совершенствовалось в условиях эволюционной стабильности без каких-либо потрясений и влияний извне. И лишь на более поздних этапах нового каменного века амурское гончарство, используя накопленный опыт и потенциал, поднимется на самые высокие ступени мастерства.

Творения вдохновенных горшечников

Ничуть не преувеличивая, подчеркнем, что нижеамурские неолитические культуры своим своеобразием, яркостью и общим содержанием отчетливо выделяются среди культур своего времени не только дальневосточно-сибирских регионов, но и на значительно более обширных пространствах, что признается многими исследователями. Все это в полной мере, даже, может быть, в первую очередь относится к дошедшей до нас ископаемой продукции, созданной древними амурскими гончарами-горшечниками.

Керамика нижнего Амура вылеплена вручную без применения гончарного круга. Но она по технологическим (используемым материалам и способам изготовления), формальным (формам сосудов, их параметрам) и стилистическим (украшениям, цвету, обработке поверхности и др.) атрибутам не уступает знаменитой керамике культуры яншао китайского неолита и японского дзёмона того же времени.

Многие из названных атрибутов наблюдаются в глиняной посуде уже кондонской (8,5–6 тыс. лет назад) и особенно малышевской (8–5 тыс. лет на-

зад) культурах. Последняя до выделения осиповской и мариинской культур считалась самой ранней, но с появлением недавно более древних датировок кондонской культуры последняя стала несколько старше малышевской. Однако основное свое время (8–6 тыс. лет назад) обе эти культуры сосуществовали в рамках среднего неолита в пределах одного большого амурского ареала, но характер их взаимоотношений пока еще полностью не выяснен. Кондонская своим происхождением связана с мариинской культурой, в малышевской же просматриваются сохранившиеся осиповские традиции [9].

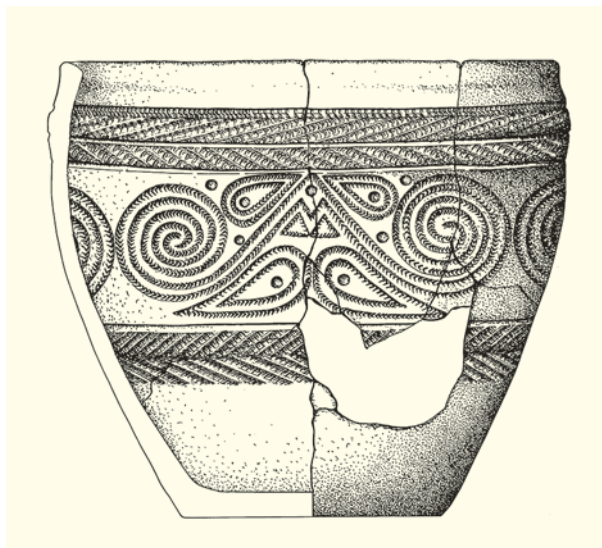
Гончары неолитических кондонских поселений изготавливали сосуды самых различных размеров и форм. Подавляющее большинство керамики (всего более 40 тыс. находок, включая целые сосуды) наиболее исследованного поселения этой культуры Кондон-Почта богато орнаментировано. Типичен орнамент в форме ромбов и треугольников, а также «амурская плетенка» — нечто похожее на ячейки рыболовной сети. Керамике кондонской культуры присущ также чешуйчатый декор — композиции из дуговидных оттисков, создающих иллюзию рыбьей чешуи.

Создатели малышевской культуры обладали еще более высоким гончарным мастерством. Их керамика — чрезвычайно щедрый и информативно емкий компонент культуры. Глиняное тесто, как правило, плотное, поверхности изделий заглажены, залощены, нередко покрыты ангобом (жидким раствором глины) или красной краской. Ассорти-



Сосуд с чешуйчатым орнаментом. Кондонская культура раннего неолита. Кондон-Почта [12].

Фото В.Н.Кавелина



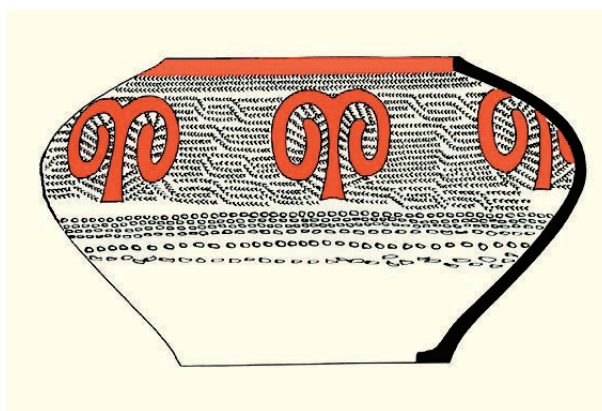
Сосуд (высота 34 см) со спиралевидным узором [13] (слева) и прорисовка сосуда (высота 21 см, показана внешняя поверхность и толщина стенки и дна — 0.5–0.8 см) с концентрическими спиралями и рыбообразными фигурами. Малышевская культура. Сучу.

мент посуды малышевцев шире, чем у кондонцев. Есть крупные (для варки пищи на огне) и небольшие ситиловидные сосуды, а также горшковидные и баночные, есть и чаши. Найдены бочонковидные, шаровидно-сферические, бутылевидные и округлые емкости. Практически все они богато украшены: для орнамента свойственно применение как одного, так и нескольких технико-декоративных элементов на одном сосуде, что создает эффектные композиции. К примеру, на некоторых сосудах, наряду с рельефным (чаще негативным) орнаментом, образованным различными штампами, имеется плоскостной узор в виде фигур растительного или зооморфного характера, нанесенный ярко-красной или малиновой краской. Помимо сосудов малышевцы изготавливали из обожженной глины и другие предметы: пряслица, штампы-качалки, колесики-орнаменты.

В позднем неолите, в период существования вознесенской культуры (5–3.3 тыс. лет назад) нижнеамурские гончары наряду с бытовой посудой оставили после себя богатейшую, зачастую технически филигранно изготовленную керамику с художественно-утонченной (порой с мифологическими сюжетами) орнаментикой. Подобные образцы изделий поистине сродни таинственной феерии. Особой яркостью выделяется жертвенная (или ритуально-обрядовая) посуда, разительно отличающаяся от той, что использовалась обитателями неолитических поселений в повседневной жизни. Эта керамика по многим признакам более высокого качества, чем бытовая посуда. Она зафиксирована главным образом в культовых центрах, существовавших в Приамурье, начиная с осиповской культуры и вплоть до этнографической современности [10].



Шаровидно-сферический сосуд, окрашенный в верхней части ярко-красной краской. Малышевская культура. Сучу.
Фото В.Н.Кавелина



Прорисовка сосуда с четырьмя волутообразными или древовидными фигурами. Малышевская культура. Сучу.



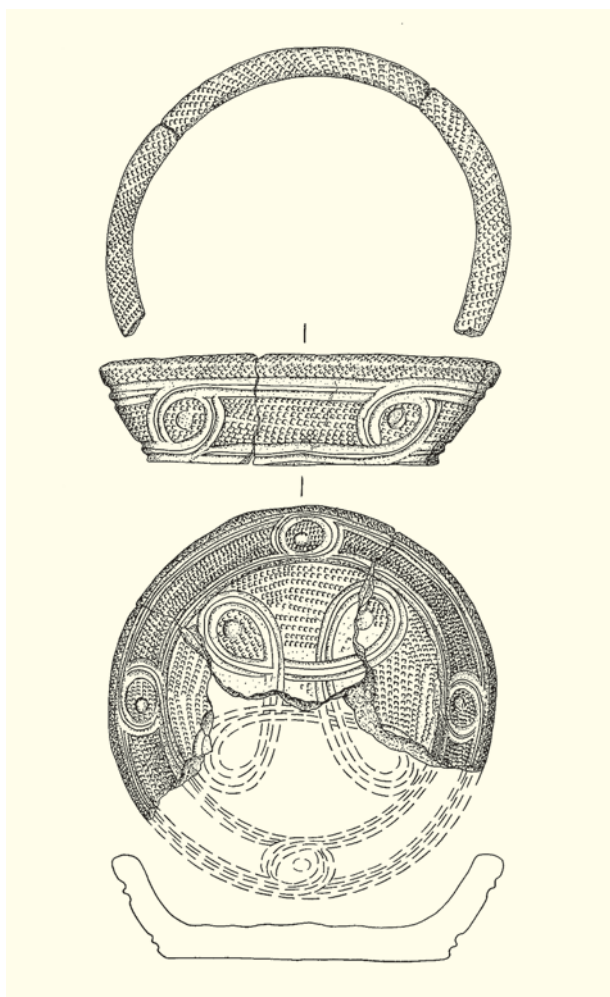
Керамическое пряслице с изображением личины. Малышевская культура. Сучу.

Фото В.Н.Кавелина



Обломок сосуда с изображением полоза. Вознесенская культура. Тахта.

Фото В.Н.Кавелина



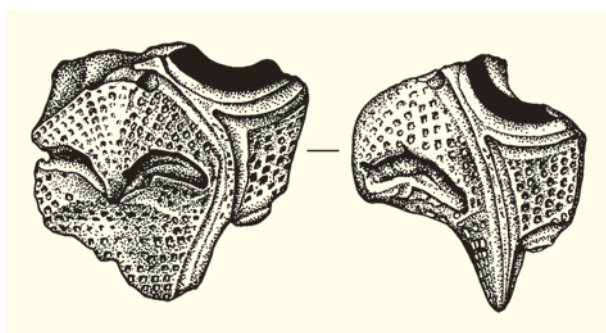
Чаша (реконструкция). Могла использоваться в качестве светильника. Вознесенская культура. Сучу [14].

Прорисовка Ю.В.Табаревой



Верхняя часть сосуда с резными фигурами-дугами на мелкоячейстом фоне и красной краской на цилиндрической горловине. Вознесенская культура. Культурный центр Тахта.

Фото В.Н.Кавелина



Фрагмент керамики с наклепным изображением клюва совы. Вознесенская культура. Тахта.

Прорисовка Ю.В.Табаревой



Склеенный сосуд со следами ремонта — отверстиями вдоль трещин. Вознесенская культура. Кондон-Почта.
Здесь и далее фото В.Н.Кавелина

Ритуально-обрядовые сосуды, как правило, хотя бы частично окрашены красной краской (охрой) различных оттенков. Известно, что у многих народов с древности красный цвет был знаком крови, символизировал силу и вообще жизнь. На отдельных экземплярах керамики сохранились также следы черной и белой краски.

Производство ритуальной керамики неолитических обществ нижнего Амура формировалось под влиянием традиций древнего гончарства Японии и Китая, которое проявилось скорее в технологии, тогда как в системе орнаменталь-



Фрагмент сосуда с изображенным синкретическим ликом Женщины-прародительницы. Различимы: контур личины, нос, рот, на лбу треугольная фигура — женский символ; глаза — в виде стилизованных большеголовых рыб; рельеф над глазами (надбровные дуги) в форме летящей птицы (анфас) с широко распростертыми крыльями; ромб на шее, трактуемый в археологии и этнографии чаще как символ солнца; тюлень — ласты с пальцами, соединенными перепонками. Таким образом лик объединяет изображения женщины, птицы, рыбы, солнца и тюленя.

ных композиций воплотились местный колорит и архаика мировоззрения. Главными объектами поклонения у неолитического населения Нижнего Приамурья (судя по иконографии керамических находок) были рыба, птица (сова), тюлень,



Слева — штамп-качалка. Малышевская культура. Сучу. Справа — обломок чаши с наклепным антропоморфным барельефом. Вознесенская культура. Кондон-Школа.





Зачистка остатков кана на полу жилища вознесенской культуры. Сучу.

Фото автора

змея (полоз). Большинство из этих религиозно-мифологических персонажей полностью или частично представлены на самых ярких личинах и изображениях на сосудах вознесенской культуры. Прежде всего следует назвать шедевр вдохновенных гончаров неолита — известнейшую личину (скорее всего, образ Женщины-родоначальницы, Хозяйки неба, воды и земли), изображенную на обломке (размером 21.6×18.6 см) сосуда данной культуры, который был найден А.П.Дервянко и А.П.Окладниковым у с.Вознесенское [11]. Уникален также обломок чаши с наlepным барельефным антропоморфным изображением.

Хочу отметить, что носители нижнеамурских неолитических культур также могут претендовать на роль весьма искусственных, подлинно изобретательных строителей жилищ. После них сохранилось огромное количество остатков жилых сооружений различных размеров и глубины, по которым прослеживается постепенное усовершенствование их внутренних интерьеров, направленное прежде

всего на утепление полуподземных, а порой и целиком подземных зимних домов-землянок. Особенно это относится к большим жилищам позднего неолита на о.Сучу. В них, наряду с несколькими одновременно действующими очагами или одним большим очагом и теплыми спальными ямами вокруг него, была в отдельном случае сооружена отопительная система типа кана*. Дымоходные каналы сделаны примитивно из плашек и жердей, обмазанных глиной, но с соблюдением форм и способов, свойственных подобным конструкциям более позднего времени. Найденный кан, точнее протокан, в настоящее время старше (почти на тысячу лет) всех известных в науке аналогичных отопительных устройств, возведенных из других материалов (камня, земли) [1, с.255].

Неолит нижней части Амурского бассейна с его культурами, древнейшей и весьма яркой керамикой, другими составными компонентами, как можно надеяться, будет со временем пополнен новыми археологическими свидетельствами. Но и сегодня он представляет собой оригинальное явление с выраженным локальным своеобразием в сфере производства, бытового уклада, обрядов, различных сторон материальной и духовной жизни первобытных оседлых рыбаков, охотников, собирателей. ■

* Кан — отопительная система в виде труб (дымоходных каналов), сделанных из каменных плит (иногда из земли) и проложенных обычно вдоль стен жилища. По трубам шли теплый воздух и дым, поступающие из очага-топки. Подобные обогреваемые нары-лежанки существовали у населения юга Дальнего Востока России, как считает ряд исследователей, с раннего железного века (2400–1500 лет назад) до этнографической современности (в жилищах нанайцев на Амуре каны были и в первые десятилетия XX в.).

Литература / Reference

1. *Медведев В.Е.* Неолитические культуры Нижнего Приамурья. Российский Дальний Восток в древности и средневековье. Владивосток, 2005; 234–267. [*Medvedev V.E.* Neolithic cultures of the Lower Cis-Amur Region. Russian Far East in the ancient time and Middle Ages. Vladivostok, 2005; 234–267. (In Russ.).]
2. *Окладников А.П., Медведев В.Е.* Исследование многослойного поселения Гася на Нижнем Амуре. Известия Сибирского отделения АН СССР. Сер. общественных наук. 1983; 1: 93–97. [*Okladnikov A.P., Medvedev V.E.* Research of the multilayered settlement of Gasia on the Lower Amur. Izvestiya of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences: Series of Social Sciences. 1983; 1: 93–97. (In Russ.).]
3. *Медведев В.Е., Цетлин Ю.Б.* Техничко-технологический анализ древнейшей керамики Приамурья (13–10 тыс. л.н.). Археология, этнография и антропология Евразии. 2013; 2: 94–107. [*Medvedev V.E., Tsetlin Yu.B.* Technical and technological analysis of the most ancient ceramics of the Cis-Amur Region (13–10 thousand years ago). Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia. 2013; 2: 94–107. (In Russ.).]

4. Шевкомуд И.Я., Яншина О.В. Начало неолита в Приамурье: поселение Гончарка-1. СПб., 2012. [Shevkomud I.Ya., Yanschina O.V. The beginning of the Neolithic in the Cis-Amur Region: settlement Goncharka-1. Sankt-Petersburg, 2012. (In Russ.).]
5. Праслов Н.Д. О керамике эпохи верхнего палеолита в Северной Евразии. Археологические вести. 1992; 1: 28–39. [Praslov N.D. About an Upper Paleolithic ceramics in Northern Eurasia. Archaeological News. 1992; 1: 28–39. (In Russ.).]
6. Щелинский В.Е., Вандивер П.Б. Глиняная чашечка из культурного слоя палеолитического святилища в Каповой пещере: первые опыты изготовления и использования изделий из глины. Традиции и инновации в изучении древнейшей керамики. Материалы международной научной конференции. СПб., 2016; 56–61. [Shchelinsky V.E., Vandiver P.B. Clay cup from an occupation layer of a Paleolithic sanctuary in the Kapovaya cave: the first experiences of production and use of products from clay. Traditions and innovations in studying of the most ancient ceramics. Materials of the International Scientific Conference. Sankt-Petersburg, 2016; 56–61. (In Russ.).]
7. Медведев В.Е. Мариинская культура и ее место в неолите Дальнего Востока. Труды II (XVIII) Всероссийского археологического съезда в Суздале. Т.1. М., 2008; 244–248. [Medvedev V.E. Maryinsk culture and its place in the Neolithic of the Far East. Scientific works of the II (XVIII) All-Russian archaeological congress in Suzdal. V.1. Moscow, 2008; 244–248. (In Russ.).]
8. Цетлин Ю.Б., Медведев В.Е. Керамика мариинской культуры Нижнего Приамурья. Археология, этнография, антропология Евразии. 2014; 4: 30–40. [Tsetlin Yu.B., Medvedev V.E. Ceramics of Maryinsk culture of the Lower Cis-Amur Region. Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia. 2014; 4: 30–40. (In Russ.).]
9. Медведев В.Е., Филатова И.В. Керамика эпохи неолита Нижнего Приамурья (орнаментальный аспект). Новосибирск, 2014. [Medvedev V.E., Filatova I.V. Neolithic ceramics of the Lower Cis-Amur Region (Ornamental aspect). Novosibirsk, 2014. (In Russ.).]
10. Медведев В.Е. Неолитические культовые центры в долине Амура. Археология, этнография и антропология Евразии. 2005; 4: 40–69. [Medvedev V.E. The Neolithic Cult centers in the valley of Amur. Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia. 2005; 4: 40–69. (In Russ.).]
11. Окладников А.П., Деревянко А.П. Далекое прошлое Приморья и Приамурья. Владивосток, 1973. [Okladnikov A.P., Derevyanko A.P. Remote past of Primorye and Priamurye. Vladivostok, 1973. (In Russ.).]
12. Окладников А.П. Керамика древнего поселения Кондон. Новосибирск, 1984. [Okladnikov A.P. Ceramics of the ancient settlement of Kondon. Novosibirsk, 1984. (In Russ.).]
13. Окладников А. Ancient Art the Amur Region. Leningrad, 1981.
14. Деревянко А.П., Чо Ю-Чжон, Медведев В.Е. и др. Исследования на острове Сучу в Нижнем Приамурье в 2001 году: В 3 т. Сеул, 2002 (на рус. и кор. яз.). [Derevyanko A.P., Cho Yoo-Jon, Medvedev V.E. et al. Researches on the Suchu-island in the Lower Cis-Amur Region in 2001. In 3 volums. Seoul, 2002. (In Russ. and Korean.).]

Clay perfection of the Amur Neolithic

V.E.Medvedev

Institute of Archeology and Ethnography, Siberian Branch of RAS (Novosibirsk, Russia)

The article represents the results of investigation of the ceramics of five Neolithic cultures of the Lower Amur Region, which appeared nowhere else in Russia that early, about 14 thousand years ago, and it is characterized by a special abundance and diversity. The fragments of the ancient vessels from hardened clay were discovered in the layers of the Earliest Neolithic (formerly attributed to the Mesolithic Age) of Osipovo culture of Gasia and Gosyan sites. There was found a crushed vessel of a truncated-conical shape with a corrugated surface. Ceramics of the Maryinsk culture of the Early Neolithic (10–9 thousand years ago) is more advanced. The potter's skills of Kondon and Malyshevo cultures of the end of Early — Middle Neolithic were even higher. The variety of pottery was very wide, almost all of the findings were decorated. In the period of functioning of Voznesenovskoye culture in the late Neolithic the ancient tribes left a rich, often technically filigree ceramics made with artistically refined ornamentation. These samples of vessels that do not have analogies in the Neolithic of neighboring regions are truly akin to a mysterious extravaganza.

Key words: Amur region, Neolithic culture, pottery, vessel, ornament, pottery-making.

Трагедия гималайского медведя

кандидаты биологических наук С.А.Колчин¹, К.Н.Ткаченко¹, В.Г.Юдин², А.Ю.Олейников¹, Г.П.Салькина³

¹Институт водных и экологических проблем ДВО РАН (Хабаровск, Россия)

²Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (Владивосток, Россия)

³Объединенная дирекция Лазовского государственного заповедника имени Л.Г.Капанова и национального парка «Зов тигра» (с.Лазо, Приморский край, Россия)

В 2015 и 2016 гг. на юге Дальнего Востока России произошла масштабная природная катастрофа, связанная с аномальным неурожаем осенних кормов гималайского медведя (*Ursus thibetanus*). Массовые выходы голодных животных в населенные пункты привели к элиминации значительной части популяции этого вида. Впервые в истории изучения гималайского медведя в России наблюдались бодрствующие зимой медвежата и взрослые особи, фиксировались многочисленные случаи гибели животных от истощения. Продолжающиеся заготовки древесины в кедрово-широколиственных лесах усугубляют негативное воздействие природных факторов, что осложняет перспективу дальнейшего существования популяции гималайского медведя в России.

Ключевые слова: гималайский медведь, кедрово-широколиственные леса, миграция, Сихотэ-Алинь, Хехцир.

Гималайский медведь (*Ursus thibetanus*) еще в недавнем прошлом был широко распространен в горных лесах Южной, Юго-Восточной и Восточной Азии. В настоящее время из-за сведения лесов и незаконной охоты этот вид оказался под угрозой исчезновения в большинстве частей своего ареала, представленного теперь множеством изолированных участков. На юге Дальнего Востока России, в зоне кедрово-широколиственных лесов, обитает самый северный подвид гималайского медведя — уссурийский (*U.thibetanus ussuricus*). Наиболее многочисленная его популяция населяет хребет Сихотэ-Алинь (Приморский край и южные районы Хабаровского края). Значительно меньшие по площади очаги обитания существуют в юго-западной части Приморского края и на левобережье Амура (Хабаровский край, Еврейская автономная область, юго-восточная окраина Амурской обл.). Кроме России уссурийский подвид в небольшом количестве встречается в Северо-Восточном Китае и на Корейском п-ове.

Тесная эволюционная связь со старовозрастными коренными лесами и полудревесный образ жизни позволили гималайскому медведю существовать в условиях суровых многоснежных зим и соседства с такими опасными для него хищниками, как тигр и бурый медведь. Дупла деревьев, которые гималайские медведи используют зимой в качестве берлоги, одновременно служат им убежищами при рождении потомства. Семейные группы и молодые особи проводят в них до полугода, взрослые самцы — обычно на 1–2 месяца меньше.

В период зимнего сна у медведей снижен уровень метаболизма. Жизнедеятельность организма

обеспечивается вовлечением в обменные процессы внутриполостных и подкожных жировых отложений. Накапливаются они в осенний период за счет так называемых нажировочных кормов — в основном орехов кедрового корейского (*Pinus koraiensis*) и желудей дуба монгольского (*Quercus mongolica*). От их урожая зависит пищевая стратегия животных осенью и успешная зимовка.

Специалисты, изучавшие медведей на юге Дальнего Востока, пришли к выводу, что гималайский медведь несравненно лучше бурого приспособлен к жизни в кедрово-широколиственных лесах [1, 2]. Благодаря способности лазать по деревьям гималайский медведь начинает активно поедать желуды и орехи за полмесяца до их созревания. Впоследствии зрелые желуды полностью осыпаются, а спелые шишки кедрового дерева в отдельные годы прочно удерживаются на ветвях, поэтому у медведей-древолазов явное преимущество, например, перед бурым медведем или кабаном. Таким образом, даже в низкоурожайные годы гималайские медведи уже к началу октября бывают хорошо упитаны и залегают в берлоги до выпадения первого снега. Однако в последние годы мы стали свидетелями настоящей трагедии гималайских медведей.

В плодоношении кедрового корейского отчетливо прослеживались четырехлетние циклы: на год богатого урожая приходилось два года среднего или низкого и один — с полным неурожаем орехов. Раз в десятилетие наблюдалось исключительно обильное плодоношение, после которого шишки сохранялись на деревьях до середины—конца лета следующего года [3]. Дуб монгольский, входящий с высокой долей участия в состав кедрово-широколиственных лесов и образующий чистые насаждения, практически ежегодно обеспечивал

желудями лесных обитателей. Годы с одновременным неурожаем кедровых орехов и желудей случались крайне редко. Конечно, недостаток основных кормов медведи могут восполнить плодами других растений (маньчжурского ореха, лещин, элеутерококка, аралии, винограда, бархата, боярышника, дикой яблони, шиповника, липы и др.), но и они не каждый год имеются в достаточном для медведей количестве.

Во второй половине XX в. начались масштабные заготовки древесины кедра, объемы которых неуклонно нарастали до конца 1980-х годов. Более 90% площади кедрово-широколиственных лесов пострадали от рубок и фактически утратили доминирующую роль среди лесонасаждений Сихотэ-Алиня [4]. В этих лесах и сейчас продолжают интенсивные лесозаготовки. В последние два десятилетия в объеме вырубаемой древесины дуб занял одно из первых мест. Коренные древостои сменились мозаичными насаждениями с большими площадями молодняков и мелколиственных лесов, имеющих ограниченные пищевые ресурсы для большинства животных. Вместе с общим снижением биомассы кормов в трансформированных лесах нарушились естественные циклы плодоношения кедра и дуба. В преобразованной человеком среде обитания гималайский медведь стал особенно уязвим перед различными природными бедствиями. Наиболее ярко трагические последствия неурожая осенних кормов проявились в 2015 и 2016 гг.

Медведи-мигранты

Гималайские медведи, населяющие Сихотэ-Алинь, только в одном месте имеют территориальную связь с небольшими популяциями этого вида в Северо-Восточном Китае (в провинции Хэйлуцзян). С российской стороны это хребет Стрельникова (крайний западный отрог Сихотэ-Алиня, вытянувшийся вдоль р.Уссури по границе между Хабаровским и Приморским краями южнее устья р.Бикин), с китайской — хребет Ваньдашань. Эти горные массивы разделены только р.Уссури. Хребет Стрельникова исторически играл роль миграционного моста, по которому крупные млекопитающие перемещались между Сихотэ-Алинем и Ваньдашанем. С севера и юга к хребту подступают освоенные равнины, пирогенные дубняки и вторичные мелколиственные леса, где гималайский медведь постоянно не обитает. Эта область, шириной от 10 до 20 км, за-



Хребет Стрельникова — район миграции гималайских медведей в 2015 г.

ключена между р.Уссури на западе и линиями железной дороги и автомагистрали Хабаровск—Владивосток на востоке. Здесь же расположены многочисленные населенные пункты, самые крупные из них — г.Бикин (Бикинский р-н Хабаровского края) и пос.Лучегорск (Пожарский р-н Приморского края). На некотором удалении от государственной границы проходит линия инженерно-технических сооружений (ИТС) в виде столбов с рядами колючей проволоки, которую медведи преодолевают без особого труда. На противоположном (китайском) берегу Уссури находится г.Жаохэ.

В 2015 г. на большей части ареала гималайского медведя в России был неурожай осенних кормов, и уже в конце лета звери стали перемещаться в поисках пищи. Волна миграции, начавшейся в середине августа на хребте Стрельникова, остановилась в освоенных человеком приграничных районах, включая самые большие населенные пункты, где в течение недели образовались массовые скопления гималайских медведей.

В Хабаровском крае основной миграционный поток гималайских медведей разного пола и возраста (немало среди них было самок с сеголетками и молодых зверей) проходил у подножья хребта Стрельникова в долине р.Бикин, на левом берегу которой расположено с.Лесопильное, на правом — г.Бикин. Голодных животных привлекали приусадебные сады с плодоносящими грушами и яблонями, виноградники, пасеки на частных подворьях и свалки пищевых отходов. Медведи обследовали окружающие хребет дубовые релки и склоны сопок, оставляя кормовые «гнезда» на отдельных слабоплодоносящих деревьях. Особенно активно звери штурмовали пасеки, расположенные в лесной зоне, и пчеловоды были вынуждены спешно вывозить ульи в населенные пункты.



Окраина г.Бикина.

Здесь и далее фото С.А.Колчина



Кормовые «гнезда» (заломы ветвей дуба), сделанные гималайским медведем (окраина г.Бикина, осень 2015 г.).

Жители Лесопильного стали регулярно замечать переплывающих реку медведей и нередко преследовали их на моторных лодках. Так, 23 августа в подобной ситуации оказалась медведица с двумя медвежатами, один из которых, уходя от преследования, выбрался на берег в черте села. Там же 5 сентября сотрудники полиции застрелили медведицу, а спустя несколько дней были обнаружены трупы еще двух взрослых медведей (причем у одного из них были отрезаны лапы и вырезан желчный пузырь). Согласно опросам, с третьей декады августа до середины сентября в с.Лесопильном было убито не менее 10 гималайских медведей.

Скопление животных образовалось и на восточных окраинах г.Бикина, где частные подворья и дачные участки перемежаются с заброшенными садами и огородами и граничат с покрытыми мелколиственными и дубовыми лесами сопками. На участке федеральной автотрассы Хабаровск-Владивосток, огибающем с востока г.Бикин, при столкновении с автотранспортом погибли не менее шести медведей. Поздним вечером 1 сентября автофургон сбил взрослого самца. Страдания зверя, получившего многочисленные переломы челюстей, позвоночника и задних конечностей, прекратил выстрел сотрудника охотнадзора. Через несколько часов буквально в этом же месте под колесами автомобиля погиб 2,5-летний самец.

Иногда медведей наблюдали на обрывающемся к автотрассе скалистом склоне. Так, 27 августа под одним из скальных выступов укрылся испугавшийся шума автомобилей полугодовалый

медвежонок. Помочь зверю вызвались сотрудники МЧС, прибывшие на пожарном автомобиле, оборудованном подъемной стрелой. Начатую было операцию по «спасению» животного, вовсе не нуждавшегося в спасательных мерах, остановил проезжавший мимо сотрудник охотнадзора. Разогнав горе-спасателей, собравших толпу зевак и колонну автомобилей, он поспешил на очередное ЧП с участием медведя. Медвежонок же не оставил в покое — местные жители столкнули его со скалы при помощи длинного шеста. Вблизи пос.Перелесок, расположенного у железной дороги в 7 км к северу от г.Бикина, 24 августа и 16 сентября два медведя были задавлены электровозом.

Гималайские медведи по своей природе очень осторожны, поэтому поведение большинства мигрантов удивляло — они спокойно перемещались в дневное время, порой не реагировали даже на бросаемые в них камни или выстрелы под ноги. Примечательно, что за полтора месяца пребывания в населенных пунктах Бикинского р-на медведи ни разу не напали на человека. К сожалению, отношение людей не всегда отличалось адекватностью. Вечером 7 сентября отдохавший в лесополосе г.Бикина взрослый самец, потревоженный людьми, бросился бежать через огороды, но был ранен в живот, а затем добит местными жителями. Этот медведь отличался мирным поведением и в течение двух недель приходил кормиться на приусадебные участки, не вызывая агрессии к людям. Другого медведя застрелили 13 сентября военные на территории воинской части города.

Если соседство с взрослыми медведями беспокоило население, то к медвежатам многие (особенно женщины и дети) относились доброжелательно — их подкармливали и опекали. В ночь на 8 сентября полуторагодовалый медвежонок разорил несколько ульев на пасеке одного из городских подворий. Днем он отдыхал в тени раскидистой груши, растущей у забора в соседнем заброшенном дворе. Медвежонок не обращал внимания на стоящих за забором людей, поднялся лишь при нашей попытке приблизиться к нему и, пройдя через высокие заросли полыни, скрылся на другом конце огорода.

В несколько меньшем числе звери заходили в другие села Бикинского р-на (Пушкино, Бойцово, Покровку, Васильевку, Лончаково, Перелесок, Оренбургское). На окраине с.Лермонтовка медведица с двумя медвежатами долгое время обитала вблизи свалки, расположенной рядом с воинской частью и автозаправочной станцией.

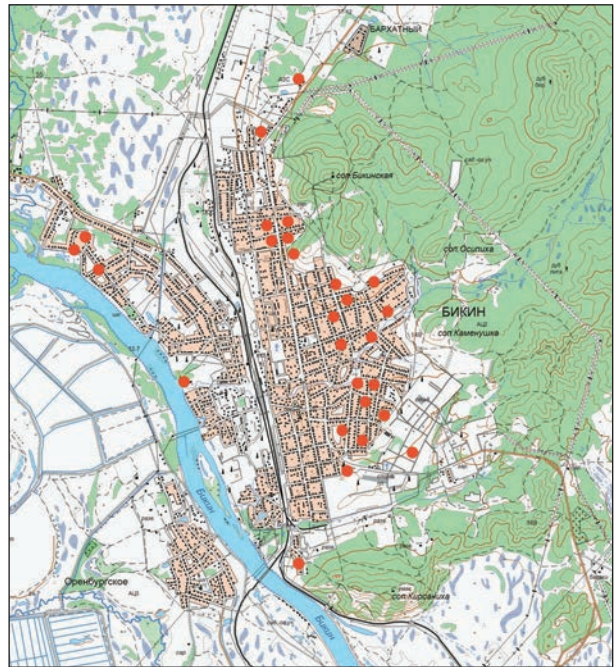


Схема г. Бикина, на которой красными точками отмечены места регулярных встреч гималайских медведей в августе—сентябре 2015 г.

На противоположной стороне хребта Стрельникова леса, которых придерживаются медведи, сменяются открытыми пространствами и обширным водохранилищем. Здесь в третьей декаде августа медведи посещали частные подворья, пасеки и дачные участки в Федосьевке, Благовещенке, Нагорном, Никитовке. Наиболее напряженная ситуация сложилась в пос.Лучегоorsk. Утром 21 августа



Обследование медведя-самца, убитого на огородах г.Бикина (7.09.2015).

Фото А.Ю.Олейникова



Убежище медвежонка (самка), убитого собаками (7.10.2015, с.Нагорное, Пожарский р-н, Приморский край).

Фото С.А.Колчина

ста во дворе пятиэтажного дома, стоящего на окраине Лучегорска вблизи юго-западного берега водохранилища, при столкновении с медведем пострадал мужчина. Некрупный зверь, укрывшийся под балконом за обширным палисадником, бросился на него, когда он выходил из подъезда вместе с собакой. Укусив человека за руку, медведь убежал. Через несколько часов с тем же зверем, спрятавшимся на этот раз под теплотрассой на заросшем кустарником пустыре вблизи автостанции, столкнулся пассажир автобуса. Потрясенный зверь сбил человека с ног и тоже скрылся.

Заметим, что преднамеренно на человека гималайские медведи никогда не набрасываются, и в людоедстве они не замечены [5]. Нападение в населенном пункте может произойти из-за стра-

ха и стрессового состояния зверя, оказавшегося в непривычной обстановке. Он может воспринять человека, приблизившегося на критическое расстояние, как опасность. Неквалифицированные действия по отпугиванию медведей в Лучегорске вполне ожидаемо привели к еще нескольким трагедиям. Сотрудники МЧС и полиции преследовали животных на автомобилях с сиренами, поливали из пожарных брандспойтов. Такие действия только усиливали панику и без того напуганных зверей.

Поздним вечером 26 августа в Лучегорске местным жителем был убит медвежонок, раненный полицейским из табельного оружия. Утром следующего дня на берегу водохранилища сотрудник полиции ранил из пистолета взрослую самку, после чего стал преследовать зверя. Медведица бросилась на него, повалила на землю и успела укусить за ногу, прежде чем ее застрелили подоспевшие полицейские.

Таким образом, в конце августа — сентябре вблизи хребта Стрельникова сложилась катастрофическая ситуация, к которой природоохранные службы Хабаровского и Приморского краев оказались совершенно не готовы. Попавшие в беду животные нуждались в квалифицированной помощи специалистов. Но единственной ответной мерой, принятой профильными госструктурами, стали мероприятия по регулированию численности. Министрство природных ресурсов Хабаровского края экстренно увеличило квоту на отстрел гималайского медведя на 57%. Однако официальная статистика министерства учла только пять медведей, изъятых в Бикинском р-не в рамках квоты.

Можно было не прибегать к крайней мере и многих животных спасти, отловив специальными клетками с последующим выпуском в более

благополучных лесных районах. Клетками с приманкой и падающей дверцей для изъятия «проблемных» медведей успешно пользуются специалисты многих стран. Медвежат, не представлявших большой опасности для населения, можно было отлавливать с помощью сетей и больших сачков, а также обездвиживать транквилизаторами. Но Управления охотничьего хозяйства Хабаровского и Приморского краев устранились от решения проблемы. Она была переложена на местных жителей, которые были вынуждены уничтожать медведей-мигрантов на пасаках и приусадебных участках. Судя по всему, большинство зверей, не успевших накопить необходимых для зимовки жировых отложений и уйти в лес, были убиты.

К концу сентября ситуация в населенных пунктах стала выправляться. Лишь отдельные уцелевшие взрослые особи и медвежата продолжали оставаться вблизи жилья человека. Один из детенышей находился на попечении жителей с.Нагорного (окрестности Лучегорска). На окраине дачного участка он устроил убежище-нору под кучей мусора. 7 октября этот медвежонок погиб в схватке с собаками. Осмотренный нами детеныш (самка) имел низкую упитанность и весил 19 кг. Под шкурой на шее медвежонок была обнаружена резиновая пуля от травматического пистолета, — одни люди заботились о детеныше, для других же он стал объектом жестокого развлечения. Благодаря группе местных активистов еще двух медвежат под Лучегорском удалось отловить и вернуть в лес. Отдельных детенышей наблюдали в граничащих с хребтом Стрельникова населенных пунктах и дачных поселках до начала января.

Откуда шли медведи?

На этот вопрос до сих пор нет четкого ответа. Мы не исключаем, что основной частью мигрантов были звери, покинувшие хребет Ваньдашань. Начало массовых появлений медведей в населенных пунктах по времени совпало с обильными ливневыми дождями, прошедшими в приграничных с Россией провинциях КНР. Наряду с отсутствием естественных кормов причиной миграции, возможно, стало подтопление части местообитаний медведей, повреждение дождем и ветром активно посещаемых ими посадок зерновых культур. Сообщения о переходах медведей из Китая на территорию России в районе хребта Стрельникова поступали из разных независимых источников: от офицеров пограничных застав и жителей приграничных районов. Согласно опросным данным, участки государственной границы в зоне ответственности одной заставы за одну ночь пересекали до 17 медведей.

Официальные данные Управлений пограничной службы Хабаровского и Приморского краев носили несколько иной характер. Так, в Пожарском р-не Приморского края в августе и сентябре

пограничниками было зафиксировано 90 переходов медведей через линию ИТС со стороны Китая и 111 переходов со стороны России. В Бикинском р-не Хабаровского края за август и сентябрь зарегистрировано 99 пересечений медведями государственной границы со стороны КНР. О том, насколько эти цифры отражают реальную картину, судить сложно.

К сожалению, получить какие-либо сведения от китайских коллег нам не удалось. Во время миграции средства массовой информации КНР периодически сообщали о медведях, переплывающих Уссури со стороны России. В окрестностях г.Жаохэ берег реки был оборудован специальными аншлагами, предупреждающими о возможном появлении зверей. Здесь же сотрудники природоохранных служб отловили несколько медвежат. Медведи питались на кукурузных полях, разорвали пасаки. В октябре крупный медведь был убит в здании одной из школ г.Жаохэ.

Безбоязненное отношение к человеку и антропогенным ландшафтам, наблюдавшееся у большинства мигрантов, возможно, сформировалось у животных в процессе близкого соседства с людьми на китайской стороне. В густонаселенных районах Северо-Восточного Китая местообитания гималайского медведя перемежаются с обширными сельскохозяйственными угодьями, куда медведи выходят кормиться.

Так или иначе, массовое скопление гималайских медведей в населенных пунктах и сельскохозяйственных угодьях, независимо от того, трансграничное это перемещение или подвижка с Сихотэ-Алиня, свидетельствовало о природном бедствии. Вынужденная концентрация животных привела к их массовой гибели, что, несомненно, сказалось на численности группировки гималайского медведя, особи которой стали мигрантами. Исторические факты массовых перемещений гималайского медведя с территории Маньчжурии (КНР) описаны еще в 1960 г. именно для этого географического района. Они также были вызваны неурожаем осенних кормов [6].

На сопредельных территориях

Мы обследовали типичные местообитания гималайского медведя в заказнике «Бирский» (Бикинский р-н Хабаровского края), которые расположены близко к зоне миграции. Концентрации животных здесь не было, а отдельные встреченные особи питались плодами бархата амурского (*Phellodendron amurense*), которые обычно медведи не едят. Голодные медведи заходили осенью 2015 г. в населенные пункты большинства районов Хабаровского и Приморского краев, однако не столь массово, как на хребте Стрельникова.

В окрестностях Хабаровска, на Хехцире (хребте, отделенном от Сихотэ-Алиня малооблесенны-



Медвежонок на приусадебном участке (19.10.2015, пос. Терней, Приморский край).
Фото М.Н. Громыко

ми, частично освоенными равнинными пространствами), существовала полноценная популяция гималайского медведя под опекой Большехехцирского заповедника и заказника федерального значения «Хехцир» [7]. В годы недостатка естественных кормов медведи активнее выходят с охраняемой территории к окружающим ее дачным участкам, пасекам и населенным пунктам. В 2015 г. эта локальная группировка медведей понесла большие потери. Звери настойчиво посещали мусорные свалки и дачные участки сел, расположенные у северной границы заповедника. В течение осени 2015 г. сотрудники охотнадзора изъяли в Хабаровском р-не 11 гималайских медведей. 23 августа они убили молодого медведя в подвале двухэтажного каменного дома в с.Сергеевка (Хабаровский р-н).

29 августа при столкновении с медведем пострадал мужчина в пос.Мухен (р-н имени Лазо Хабаровского края). Кормившегося в зарослях винограда зверя заметили дети. Один из местных жителей, будучи в состоянии опьянения, вооружившись палкой, решил проучить медведя, в результате чего получил рваные раны уха и ног. Через три дня медведь был застрелен на окраине поселка сотрудниками охотнадзора. 5 сентября житель с.Полетного (р-н имени Лазо), обнаружив на своем приусадебном участке кормившегося на груше медведя, стал прогонять зверя. Медведь бросился на человека, поранил ему лицо и повредил глаз.

Интересно, что как в зоне миграции, так и на остальной части ареала, где был неурожай осенних кормов, наблюдалось большое количество одиноких медвежат-сеголеток. Причин этому, на наш взгляд, было несколько. Во-первых, в условиях аномального голода физически более слабые медвежата могли отстать от самок, быстро и далеко пере-

мещавшихся в поисках пищи. Во-вторых, некоторые медвежата были вынуждены отходить от медведиц и искать пищу самостоятельно из-за неизбежно возникающей конкуренции: крайне ограниченные естественные корма не восполняли энергетических потребностей всех членов семьи одновременно. В-третьих, при выходе в антропогенные ландшафты, в стрессовой ситуации, семейные группы могли распадаться без возможности последующего воссоединения. И если в лесу медвежонок способен легко отыскать медведицу по следу, который хранит ее запах в течение нескольких суток, то в населенном пункте найти мать отставшему детенышу практически невозможно. В-четвертых, часть медведиц были убиты.

В Хабаровском крае, помимо Бикинского р-на, медвежат до начала января 2016 г. регистрировали в населенных пунктах Вяземского, имени Лазо, Нанайского и Хабаровского районов. В Приморском крае, кроме окрестностей Лучегорска, встречи одиноких медвежат были наиболее обычны в селах Красноармейского, Дальнереченского, Чугуевского и Спасского районов. Только в течение третьей декады октября три медвежонка были отловлены в г.Дальнегорске. 22 ноября медвежонок проник на овощную базу в пос.Ольга. В начале декабря два медвежонка были убиты в Спасском р-не. В пос.Терней сотрудники Сихотэ-Алинского заповедника организовали отлов трех медвежат, один из которых забрался в сарай и ел комбикорм. Все медвежата после оказания им необходимой помощи были выпущены на территории заповедника. В пос.Преображение (Лазовский р-н) вечером 9 октября медвежонок, спасаясь от собак, спрятался в подвале слесарной мастерской. Инициативная группа из числа местных жителей и сотрудников Лазовского заповедника начала строить клетку для отлова и передержки медвежонка, но ночью его убил полицейский. На окраине пос.Заповедного (бухта Киевка, окрестности Лазовского заповедника) местная жительница подкармливала медвежонка до середины января. Специалисты заповедника отмечали в зимние месяцы следы и других медведей. Два истощенных медвежонка поступили в центр реабилитации тигров в с.Алексеевка (Надеждинский р-н) и после передержки были выпущены в природу.

Бодрствующие зимой истощенные гималайские медведи, взрослые особи и медвежата, стали своего рода новым феноменом. За всю историю изучения гималайского медведя в России ничего подобного не происходило.

На фоне массового уничтожения медведей местным населением активизировалась деятельность скупщиков дериватов. 21 декабря 2015 г. в с.Чугуевка Приморского края была обнаружена контрабандная партия из 527 лап медведей, подготовленных для транспортировки в Китай.

Феноменален и тот факт, что отдельным медведям-мигрантам удалось успешно дожить до весны в непосредственном соседстве с человеком. 10 апреля 2016 г. в дачном поселке вблизи Лучегорска местные жители поймали медвежонка-второгодку в крайней степени истощения. Другого ослабленного детеныша наблюдали здесь 28 апреля. Отмечались ранней весной медведи и в окрестностях с.Лесопильного.

Ранним утром 29 апреля с медведем повстречалась жительница г.Бикина. На громкие крики женщины прибежали люди и собаки. В испуге медведь вскочил на небольшое дерево, но тут же спрыгнул на землю и скрылся в погребе стоящего в 15 м полуразрушенного заброшенного строения из железнодорожных шпал. Через несколько часов затаившегося в погребе зверя обездвигили прибывшие из Хабаровска сотрудники охотнадзора. Отловленный медведь оказался самцом старше трех лет. Этому зверя регулярно наблюдали предыдущей осенью владельцы гаражей, бли-



Медвежонок, спрятавшийся в подвале мастерской. Ночью его убьет сотрудник полиции (9.10.2015, пос.Преображение, Лазовский р-н, Приморский край).

Фото О.Н.Дробаха

жайшие из которых располагались в 12 м от погреба. Медведь практически не обращал внимания на людей и нередко лежал на возвышении, обозревая окрестности. С наступлением темноты он уходил кормиться на ближайшую мусорную свалку. Вполне возможно, что в этом погребе медведь и провел зиму.



Место отлова взрослого медведя-самца в г.Бикине (29.04.2016); справа внизу — строение, в погребе которого располагалось необычное его убежище длиной 2.5 м, шириной 2 м и высотой 1.5 м.

Фото С.А.Колчина

Обитание медведей-мигрантов в населенных пунктах даже после наступления благоприятного времени года служит косвенным подтверждением того, что эти звери пришли издалека и плохо ориентировались на незнакомой для них территории. Не всем сумевшим залечь в берлоги медведям удалось пережить зиму. Например, погибший зимой от истощения некрупный медведь был найден в дупле тополя на территории Лазовского заповедника.

Новая катастрофа

Весной 2016 г. вышедшие из берлог медведи были ослаблены голодом. В полной мере восполнить потребность в питательных веществах за счет естественных кормов — травы и личинок муравьев — звери не могли, поэтому летом они вновь стали совершать набеги на пасеки. Но настоящая катастрофа наступила осенью, когда в Хабаровском крае и в некоторых районах Северного и Центрального Приморья повторился неурожай кедровых орехов и желудей. Не успев восстановить силы после голодного 2015 г., медведи подверглись новому испытанию. Уже в сентябре на юге Хабаровского края стали встречаться гималайские медведи необычного облика: у них почти полностью отсутствовал или был редким волосяной покров. Шерсть сохранилась лишь на голове, ногах, вокруг анального отверстия и на хвосте. Питание было столь скудным, что его едва хватало на подержание жизни животного.

Масштабы новой трагедии наглядно отражает ситуация на хребте Хехцир. 14 сентября 2016 г. в расположенном у границы Большехехцирского заповедника с.Казакевичево была отловлена кормившаяся грушами некрупная медведица. Внешний вид животного свидетельствовал о его бедственном состоянии. Необходимо было организовать передержку медведицы, но ее в тот же день выпустили в заповеднике на верную гибель. В последующие 2,5 месяца, согласно официальным данным Министерства природных ресурсов Хабаровского края, только в населенных пунктах и дачных поселках, находящихся вблизи северной окраины заповедника, были изъяты (отстреляны или отловлены) еще 11 гималайских медведей с признаками истощения и нарушением волосяного покрова. Некоторые особи были настолько ослаблены, что потеряли способность перемещаться и оказывать сопротивление. К сожалению, необходимого ветеринарного обследования мед-



Места выходов и гибели (отмечено красными точками) гималайских медведей в 2015 и 2016 гг. в окрестностях хребта Хехцир.

ведей проведено не было. Последний зверь был убит сотрудниками охотнадзора на хехцирских дачах 13 декабря. На трех пасеках, расположенных у южной границы заповедника, согласно опросным данным, в течение лета и осени 2016 г. были отстреляны 13 гималайских медведей. Волосяной покров животных был редким либо практически отсутствовал. В совокупности за два смежных года (2015 и 2016) группировка гималайского медведя хребта Хехцир потеряла не менее 36 животных. Учитывая, что популяция гималайского медведя в заповеднике насчитывала всего 30–35 особей [8, 9], есть все основания предполагать, что в настоящее время ее состояние приблизилось к критической отметке.



Обездвиженная самка гималайского медведя, отловленная в с.Казакевичево (14.09.2016, Хабаровский р-н, Хабаровский край).

Фото ФГБУ «Заповедное Приамурье»



Берлога гималайского медведя, устроенная под корнями упавшей осины в 100 м от пос.Хехцир (Хабаровский р-н, Хабаровский край). Двухлетний самец из-за истощения проснулся в середине февраля 2017 г. (фото сделано чуть позже — 11.03.2017).

Здесь и далее фото С.А.Колчина

В феврале-марте 2017 г. четыре медведя были обнаружены на Хехцире вблизи сел Казакевичево и Новотроицкое, неподалеку от пос.Хехцир и на территории войсковой части в пос.Корфовском. Все они зимовали в нетипичных местах и покинули свои убежища на 1.5–2 месяца раньше обычных сроков из-за истощения. Одного из них — двухлетнего самца, зимовавшего под корнями упавшей осины в 100 м от окраины пос.Хехцир и оставившего берлогу в середине февраля, — мы своевременно обнаружили и начали подкармливать. В середине марта, немного окрепнув, медведь отошел от поселка на 1.5 км и залез в дупло дуба. Зверя продолжали подкармливать и 30 марта вернули на территорию заповедника. Этот медведь стал одним из немногих выживших при содействии людей.

Несмотря на то что все без исключения терпящие бедствие гималайские медведи на Хехцире — обитатели Большехехцирского заповедника и заказника «Хехцир», они, к сожалению, не получают должной помощи от государственных природоохранных учреждений.

Масштабы гибели гималайских медведей на хребте Хехцир отражают общую ситуацию, возникшую у северной границы ареала этого вида. Истощенные звери с редким волосным покровом отмечались на всем пространстве распространения гималайского медведя в Хабаровском крае. В Бикинском р-не две взрослые облысевшие самки были отстреляны в с.Лермонтовка. На территории расположенного в этом же районе заказника «Бирский» два медведя, запечатленные с помощью фотоловушек поздней осенью, также имели признаки истощения и облысения. Никаких шансов пережить зиму у этих животных не было.



Истощенный медведь около берлоги (13.11.2016, бассейн р.Бира, Бикинский р-н, Хабаровский край).



Взрослый самец бурого медведя (12.11.2016, бассейн р.Бира, Бикинский р-н, Хабаровский край).

В конце октября умирающий, уже не способный передвигаться медведь был отстрелен охотниками в с.Шереметьево (Вяземский р-н). В верхнем течении р.Немта (р-н имени Лазо) замерзший в дупле липы зверь был обнаружен охотниками. Отчаявшись выгнать медведя из дерева, они расстреливали давно окоченевший труп сквозь стенку берлоги.

В январе в междуречье Дурмин-Сидима при подготовке деляны для заготовки дров местные жители обнаружили мертвого медведя. Погибший зверь оказался взрослой самкой, вес которой составлял всего 45 кг вместо положенных 90—100.

В связи с низкой численностью копытных (кабана, изюбря) привычные местообитания стали покидать и тигры. 10 декабря на окраине пос.Хор (р-н имени Лазо), в 700 м от федеральной автодорожки Хабаровск—Владивосток тигрица убила не крупного гималайского медведя. До начала декабря медведь бродил за околицей поселка по островам и берегам протоков в поисках пищи, а затем устроил на краю обрывистого берега наземную берлогу в виде небольшого углубления под выгоревшим стволом крупного ясеня. Обреченный зверь уже не заботился о безопасности выбранного убежища, и спящего медведя вскоре заметили проходившие мимо рыбаки, решив на следующий день устроить охоту. Ночью их опередил тигр. Появление в антропогенных ландшафтах двух наиболее ярких представителей фауны кедрово-широколиственных лесов стало своеобразным индикатором современного состояния местообитаний этих животных. В Приморском крае осенью 2016 г. также

зарегистрированы дальние заходы гималайских медведей в несвойственные местообитания (Приханкайскую равнину). Так, на кладбище г.Спасска-Дальнего в сентябре 2016 г. крупный самец в течение четырех дней подбирал пищу на захоронениях. Медведь не реагировал на людей. В это же время была убита взрослая самка в с.Прохоры (Спасский р-н). Отмечались выходы медведей на Приханкайскую равнину и в Черниговском р-не.

Надо отметить, что популяция бурого медведя в сложившихся условиях не понесла серьезных потерь. К началу зимы осталась активна только часть крупных самцов — они настойчиво ходили за тиграми, подбирая остатки их добычи, преследовали кабанов, грабили таежные избушки, съедали приманку из капканов охотников. На р.Дурмин (Хабаровский край) в конце ноября бурый медведь

обнаружил в дупле трухлявой липы взрослого самца гималайского медведя, которого убил и съел. Следы отдельных самцов бурого медведя встречались на протяжении всей зимы. Среди представителей этого вида не было зарегистрировано ни одного случая естественного падежа и облысения: все животные имели длинный и густой волосяной покров. Гималайский медведь, по типу питания тесно связанный с плодами деревьев, оказался более уязвимым.

Кто виноват и что делать?

Катализатором произошедших в популяции гималайского медведя событий стали многолетние рубки кедр и дуба, коренным образом изменившие местообитания животных. В крупнейшем девственном массиве кедрово-широколиственных лесов среднего течения р.Бикин (Пожарский р-н Приморского края), непосредственно граничащем с районами описываемого бедствия, в 2015 г. отмечался слабый урожай кедровых орехов, а в 2016 г. — желудей. Стабильное плодоношение кедр и дуба с достаточным для успешной зимовки медведей ресурсом наживорочных кормов обеспечивают здесь обширные массивы нетронутых рубками лесов. Павшие, истощенные и бодрствующие зимой голодные животные в данном районе не встречались. Более того, в 2016 г. только на Бикине мы регистрировали медвежат-сеголеток: слабые урожаи осенних кормов не оказали здесь серьезного влияния на

рождение и выживание потомства. На сегодняшний день обитающая в бассейне среднего Бикина группировка гималайского медведя — самая многочисленная в России. Тем отраднее тот факт, что в 2015 г. здесь был организован национальный парк «Бикин».

С учетом непрекращающегося разрушения местообитаний, интенсивного браконьерского промысла, а теперь и резко возросшей естественной смертности гималайского медведя исчезает перспектива сохранения в фауне России целостной популяции этого вида. Гибель животных, принявшая характер катастрофы, стала последним предупреждением, требующим срочных глобальных изменений в подходах к природопользованию.

Изменить ситуацию в положительную сторону возможно лишь при полном прекращении всех видов рубок в кедрово-широколиственных лесах. Во всех «конфликтных» ситуациях или в случаях появления медведей в нетипичных местах к решению их судьбы следует привлекать компетентных зоологов. Всех погибших или отловленных особей должны обследовать специалисты, что позволит оценить случившееся и послужит накоплению данных, необходимых для выработки конкретных мер и предложений. Необходимо включить гималайского медведя в Красную книгу России и создать центр по передержке вынужденно изъятых особей с целью квалифицированного решения их дальнейшей судьбы. ■

Литература / Reference

1. Бромлей Г.Ф. Медведи юга Дальнего Востока СССР. М., 1965. [Bromlei G.F. Bears of South of the Far East of the USSR. Moscow, 1965. (In Russ.)]
2. Кучеренко С.П. Черный (белогрудый) медведь. Крупные хищники. М., 1976; 198–222. [Kucherenko S.P. The Asiatic Black (White-Chested) Bear. Large Carnivore. Moscow, 1976; 198–222. (In Russ.)]
3. Соловьев К.П. Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока и хозяйство в них. Хабаровск, 1956. [Solov'ev K.P. Cedar-broad-leaved forests of the Far East and the economy in them. Khabarovsk, 1956. (In Russ.)]
4. Гапонов В.В. История таежного природопользования Южно-Уссурийского региона. Владивосток, 2005. [Gaponov V.V. The History of Taiga Nature Resources' Use in Southern Ussuri Region. Vladivostok, 2005. (In Russ.)]
5. Юдин В.Г. Агрессивное поведение бурого и гималайского медведей в Приморье. Медведи СССР — состояние популяций. Ржев, 1991; 253–259. [Yudin V.G. Aggressive Behavior of the Brown Bear and the Asiatic Black Bear in the Primorye. Bears of the USSR — Population Status. Rzhev, 1991; 253–259. (In Russ.)]
6. Раков Н.В. Об особенностях сосуществования кабана, бурого и черного медведей в Амуро-Уссурийском крае. Зоол. журн. 1966; 45(4): 617–618. [Rakov N.V. On the features of the coexistence of wild boar, brown and black bears in the Amur-Ussuri region. Russian Journal of Zoology. 1966; 45(4): 617–618. (In Russ.)]
7. Ткаченко К.Н. Гималайские медведи Большого Хехцира. Природа. 2017; 4: 27–36. [Tkachenko K.N. Asiatic black bears of the Big Khekhtsir. Priroda. 2017; 4: 27–36. (In Russ.)]
8. Макаров Ю.М., Тагирова В.Т. Крупные хищники Большехехцирского заповедника. Териологические исследования на юге Дальнего Востока. Владивосток, 1989; 134–136. [Makarov Yu.M., Tagirova V.T. Large carnivores of the Bol'shekhekhtsirsky Nature Reserve. Theriological research in the South of the Far East. Vladivostok, 1989; 134–136. (In Russ.)]
9. Ткаченко К.Н. Экология хищных млекопитающих Большехехцирского государственного природного заповедника: дисс. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2008. [Tkachenko K.N. Ecology of carnivorous mammals of the Bol'shekhekhtsirsky Nature Reserve. Ph.D. (Biology) diss. Vladivostok, 2008. (In Russ.)]

The Tragedy of the Asiatic Black Bear

S.A.Kolchin¹, K.N.Tkachenko¹, V.G.Yudin², A.Yu.Oleinikov¹, G.P.Sal'kina³

¹Institute of Water and Ecological Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Khabarovsk, Russia)

²Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russia)

³Joint Directorate of L.G.Kaplanov Lazovsky Nature Reserve and «Zov Tigra» National Park (Lazo, Primorsky Krai, Russia)

A severe shortage of feed for Asiatic black bears (*Ursus thibetanus*) led to a devastating natural disaster in the south of the Russian Far East in 2015/16. Significant fraction of bear population was eliminated while forced to enter human populated areas. For the first time, both cubs and full grown bears were observed awake in winter time, many dying of starvation. Continued cutting of cedar-broad-leaved forests aggravates natural factors, dimming the future of Russian population of Asiatic black bears.

Key words: Asiatic black bear, cedar-broad-leaved forests, migration, Sikhote-Alin, Khekhtsir.

Лекторий Катастрофы на подводных склонах

доктор геолого-минералогических наук В.Г.Кузнецов

Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина (Москва, Россия)

В популярном очерке рассматриваются примеры того, как, изучая отдельные образцы осадочной горной породы, индивидуальные осадочные образования, формы осадочных тел, разрезы осадочных толщ, можно восстанавливать механизмы и способы образования отложений, выяснить изменения этих обстановок в геологической истории Земли.

Ключевые слова: литология, осадочная порода, кремни, стилолиты, микробиолиты, турбидиты, рифы.

В 1857 г. началась прокладка подводного кабеля, который должен был соединить телеграфной связью Европу и Северную Америку. После ряда неудач к началу августа 1858 г. его все же проложили, и 16 августа королева Великобритании Виктория и президент США Дж.Бьюкенен обменялись поздравительными телеграммами. К сожалению, кабель оказался недолговечным. Но благодаря энтузиазму и настойчивости инициатора проекта С.Филда работы продолжились, и постоянная связь была окончательно установлена в июле 1866 г.

К 1919 г. функционировало уже 19 телеграфных линий, и их количество постоянно увеличивалось. А 18 ноября 1929 г. произошло непредвиденное — казалось бы, устойчивая связь в мгновение ока прервалась. Исследование и выяснение причин катастрофы имело неожиданный, причем очень значительный, эффект для геологии.

Но прежде несколько слов о морфологии океанического дна. Непосредственно от берега в сторону океана распространяется относительно плоское и горизонтальное дно. Ширина этой зоны в разных местах весьма различна. В современных океанах она изменяется от нескольких десятков до многих сотен километров. В палеозое подобные «эпиплатформенные» моря достигали нескольких тысяч километров. Далее такое сравнительно горизонтальное дно резко погружается до глубины 3–5 км. Первая, мелководная, часть называется шельфом (англ. shelf — полка, уступ), вторая — континентальным склоном. Указанное обстоятельство — резкий перегиб морского дна — установил преподаватель географии колледжа Эдинбурга, член Шотландского географического общества, 26-летний Х.Р.Милл, когда проводил гидрологические исследования на рыболовном судне «Шакал». Значительно позднее стало ясно, что внешняя граница шельфа — континентальный, или материковый, склон — имеет важное геологическое значе-

ние. Это граница двух главных типов земной коры — континентальной и океанической.

Точку перегиба (вернее, глубину перехода мелководного шельфа в континентальный склон) долгое время определяли расчетным путем: замеряли площади морского дна от нуля до изобаты 200 м, затем — от 200 до 400 м и т.д. Данный перегиб попадал в интервал 0–200 м, и последнее значение принималось за внешнюю границу шельфа. Сейчас существуют сотни тысяч, скорее даже миллионы погонных километров различных профилей (акустических, сейсмических и др.), которые позволяют определять глубину перегиба уже фактически. Оказалось, что в абсолютном большинстве случаев она составляет 130–135 м, хотя иногда и доходит до 500 м.

Таким образом, подводные трансокеанические кабели располагаются на шельфе, континентальном склоне и собственно океанических равнинах.

Современные отложения покрывают практически все три области океанического дна, но есть одно *но*. Дело в том, что рыхлые водонасыщенные осадки на бровке шельфа очень неустойчивы. При наличии какого-нибудь воздействия (тектонического толчка, цунами, особенно сильных штормов) они взмучиваются. Образовавшаяся суспензия в виде мутного потока срывается вниз по склону, сметая все на своем пути и прорезая ложбины. Последние заполняются принесенным обломочным материалом, образуя обширные конусы выноса.

Одно из внезапных катастрофических событий и произошло в ноябре 1929 г. в районе Большой Ньюфаундлендской банки, у западных берегов Северной Америки. Возникший суспензионный поток порвал лежащие на дне телеграфные кабели. Учитывая время прекращения связи по разным кабелям и расстояние между ними, определили скорость потока. Она оказалась около 100 км/час. Сейчас эта величина считается завышенной, но значения 50–70 км/час — вполне реальны. Объем материала, перенесенного к подно-

жью материкового склона в результате этого события, составил ~200 млрд м³, а покрытая им площадь — около 200 м².

Позднее подобные явления отмечались и изучались во многих местах. Например, осадки подобных потоков обнаружены в желобе Тонга на глубине 7098 м, в Бугенвильском желобе — на глубине 8800 м и в желобе Кермадек — на глубинах 9008 и 10000 м. Это, кстати, говорит о возможности отложения относительно крупнозернистого материала алевритовой и песчаной размерности на больших глубинах, а не только на мелководье в прибрежной зоне.

Подобные потоки получили название гравитационных, а соответствующие отложения — гравититов. Последние, в свою очередь, подразделяются на три класса. Первый — оползневые и обвальные (подводные) образования (slumps, slides), распространенные на расстоянии до 400–500 км от места возникновения. Второй — вязкие потоки разжиженного материала большой плотности (mass-flow), которые в зависимости от крупности переносимого материала подразделяются на потоки обломков (debrisflow), зерен (grainflow) и иловые (mudflow). Во всех этих потоках плотность суспензии очень велика. Они напоминают жидкую пасту, которая стекает в режиме ламинарного течения и распространяется на расстояние до 1000 км. Наконец, третий класс — турбидитные потоки (turbidity currents). Вода в них, насыщенная взвесью, становится тяжелее, чем вмещающая водная толща, и эта плотная мутная масса с большой скоростью в режиме уже турбулентного течения перемещается вниз по склону. Дальность подобного переноса составляет 1000–1500 км.

Такой снос материала происходит не со всей бровки шельфа. Он обычно имеет относительно точечное начало, как правило, в устьях подводных каньонов и напоминает канал, который, достигая подножья континентального склона, дробится на ряд рукавов и образует веерообразное в плане тело — подводный конус выноса (рис.1).

В изучении подводных катастрофических событий сложилась своеобразная ситуация. Отложения древних водных потоков возрастом 180–200 млн лет исследованы подробнее и глубже, чем современные образования нынешних океанов. Дело, видимо, в доступности объектов. Древние осадки прекрасно обнажены во многих горно-складчатых областях, в то время как современные скрыты в глубинах океанов.

Как мы только что отметили, литологи изучают не сами процессы, а их результаты в виде специфических пород и их последовательностей.

Поток суспензии, с высокой скоростью спускающийся вниз по склону, размывает подстилающие более древние породы. На их поверхности образуются различные знаки течений. Смысл этих своеобразных знаков не всегда понятен. Некоторые из них неясны и поныне. Они получили

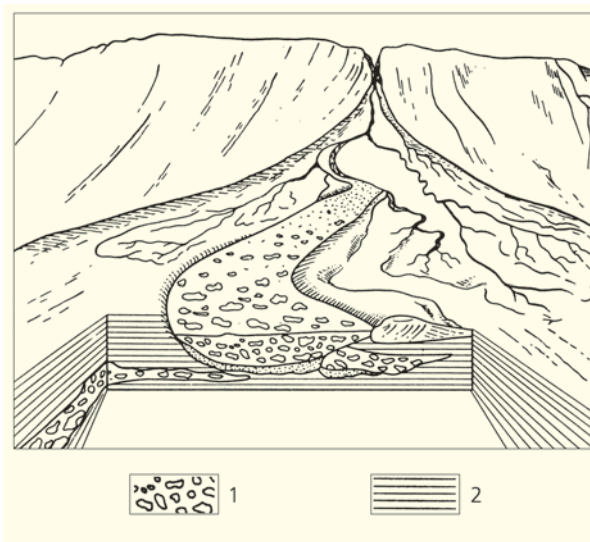


Рис.1. Схема образования подводного конуса выноса с сериями русел и циклически построенных междурусловых отложений. 1 — грубообломочные несортированные отложения подводных русел, 2 — циклически построенные турбидиты с градационной слоистостью.

название иероглифов (по аналогии с «непонятными» китайскими иероглифами).

На размытой поверхности подстилающих толщ вначале отлагаются более крупные обломки, затем средние и, наконец, наиболее тонкие. Образуется так называемая градационная слоистость, которая характеризуется последовательным уменьшением размеров обломков, слагающих породы. Принесенный потоком материал достаточно быстро заканчивается, и осадконакопление происходит уже по другим законам и за счет иного материала. Этот вид осаждения называется нефелоидной седиментацией — медленным накоплением особо тонкозернистого материала (частица за частицей) из толщ воды. Им могут быть илстые частицы, мельчайшие раковинки планктонных организмов, обитающих в приповерхностных водах, и др. В результате получается закономерный набор пород: залегающие с размывом на подстилающих отложениях грубозернистые разности сменяются значительно более тонкозернистыми, нередко тонко- и правильнослоистыми. Первые — отложения мутьевых потоков, вторые — океанских вод. При следующем катастрофическом событии вновь происходит взмучивание, образуется суспензия, стекающая по склону, и т.д. В итоге за многие тысячелетия накапливаются многокилометровые циклически построенные толщи. Такой комплекс отложений уже называется флишевой формацией, или флишем. Этот термин пришел из местного альпийского названия подобных толщ.

Состав флиша очень разнообразен: обломочный (песчано-алеврито-глинистый), кремнистый, карбонатный и др. В частности, в Германии описа-

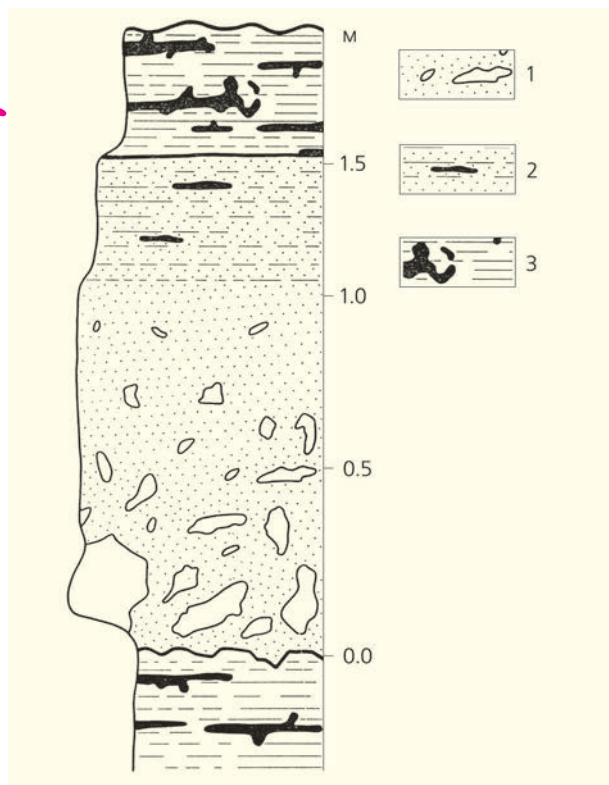


Рис.2. Схема строения циклита. 1 — несортированные неслоистые известняки с экстракластами, 2 — неяснослоистые микрозернистые известняки, 3 — темноцветные тонкослоистые известняки с обильными прослоями и конкрециями кремней.

но подобное строение даже сульфатных пород — ангидритов. Главное условие образования таких толщ — наличие контрастного рельефа, достаточно крутого перегиба дна водоема.

Мощности циклитов различны и зависят от энергии стекающего потока, приносимого им ко-

личества обломочного материала, длительности «покоя» между толчками, вызывающими выброс материала, и др.

В качестве иллюстрации подобных обстановок и образующихся в них отложений можно привести верхнеюрские (оксфорд-киммериджские) отложения Северного Кавказа, которые обнажаются на левом склоне долины р.Терек, на 41 км Военно-Грузинской дороги (рис.2, 3). Этот в целом слоистый разрез имеет циклическое строение. В основании циклов лежат серые и темно-серые детритовые известняки с отдельными более светлыми экстракластами*. Последние залегают на подстилающих отложениях с размывом. В ряде случаев глубина промоин составляет более 10 см. Средний элемент циклита — темно-серые и почти черные известняки с обильным детритом разнообразных организмов. Завершают разрез темные, почти черные битуминозные микро- и тонкослоистые правильнослоистые известняки с обильными остатками радиолярий и частым послойным окремнением (рис.4, 5).

На фоне общей слоистой толщи отчетливо выделяется «аномальное» по отношению к общему строению линзовидное образование с плоской кровлей и выгнутым вниз основанием (рис.6). Сложено оно также карбонатными породами, но их текстуры и структуры существенно отличаются от вмещающих отложений (рис.7). Во-первых, линза представляет собой в целом массивное (без всякой слоистости) тело. Во-вторых, в нем содержится большое количество крупных экстраклатов, размер которых иногда превышает 0.5 м. В-третьих,

* Обломки пород, более крупные, чем вмещающая масса, разделяются на интраклаты — фрагменты практически тех же пород (т.е. перемытые в непосредственной близости от современного нахождения) и экстраклаты — обломки пород, образовавшихся в других условиях, принесенные в места их нынешнего нахождения.

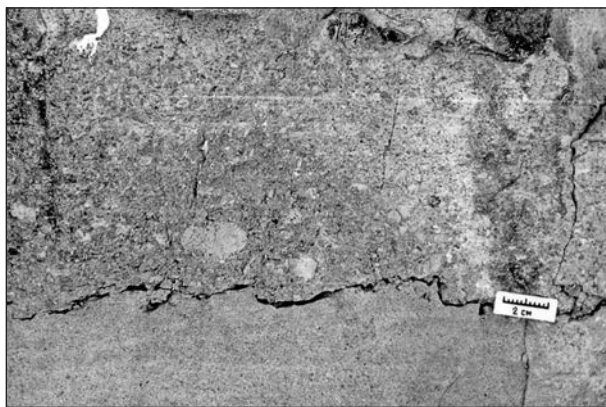


Рис.3. Нижние элементы циклитов верхнеюрских отложений. Слева — грубодетритовые известняки с отдельными экстракластами, залегающие на микрозернистых тонкослоистых подстилающих породах с отчетливым размывом, справа — прослои черных кремней в кровле подстилающих известняков. Левый берег р.Терек, 41 км Военно-Грузинской дороги.

Здесь и далее фото автора



Рис.4. Тонкозернистые известняки с обильными прослойками черных кремней в кровельной части циклитов.

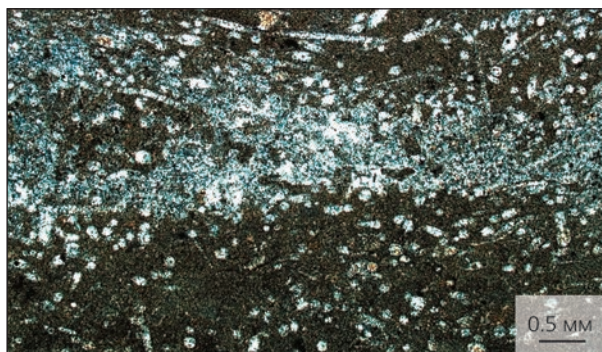


Рис.5. Микрофотография микрозернистых битуминозных известняков с обильными остатками радиолярий и редкими спонгулами губок из верхней части циклитов.



Рис.6. Линзовидное тело с плоской кровлей и выгнутым вниз основанием в разрезе слоистых карбонатных пород.

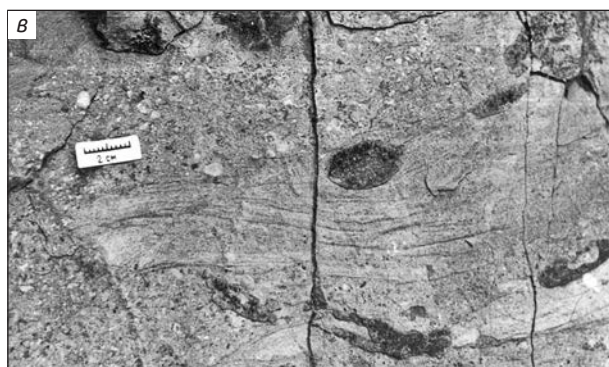
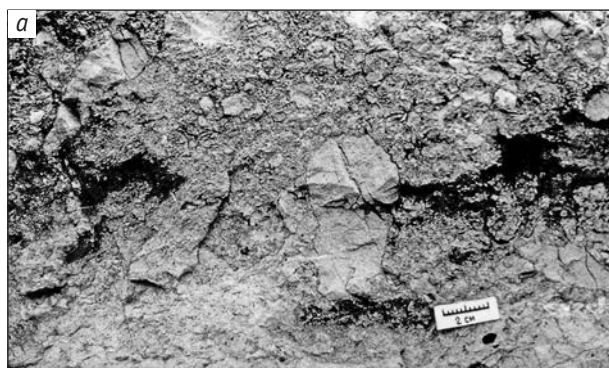


Рис.7. Характер отложений линзовидного тела: а — несортированные грубообломочные известняки с крупными экстракластами, б — крупный экстраклат светлого известняка с начальным размером не менее 0.5 м, в — крупный неокатанный экстраклат тонкослоистого известняка с кремневыми (черными) линзами. Длина ручки молотка 0.4 м.

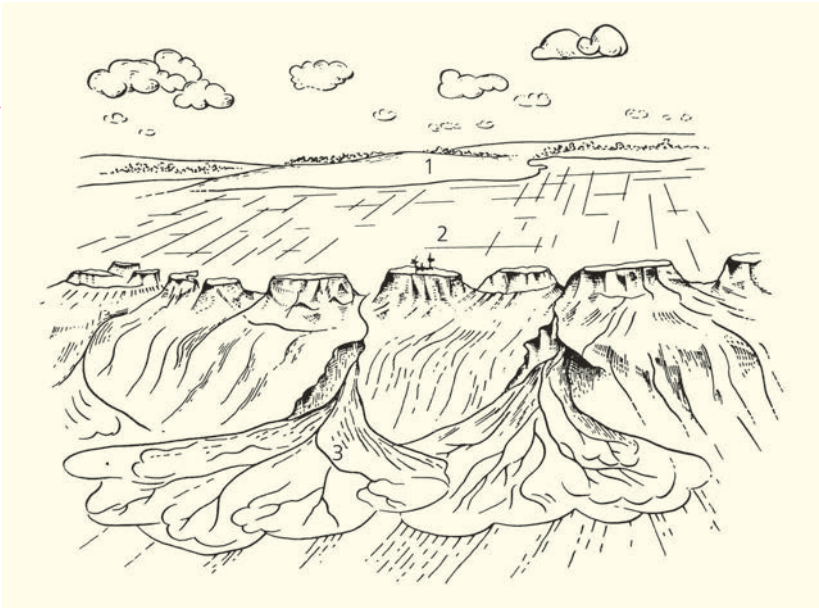


Рис.8. Палеогеографическая схема позднего оксфорда. 1 — суша, 2 — мелководный шельф с карбонатонакоплением, 3 — подводные конусы выноса и положение описываемого разреза.

расположение экстракlastов в породе беспорядочное, ориентировка длинных осей незакономерна — присутствуют как горизонтально, так и вертикально ориентированные обломки. Наконец, в четвертых, наряду с экстракlastами, сложными светлыми известняками, встречаются темноцветные, которые представляют собой обломки тонкослоистых известняков с линзами кремней — завершающих элементов данных циклитов.

Отчетливо слоистые отложения циклического строения — это типичные турбидиты. Материалом их нижних элементов в значительной мере

служили обломки твердых пород с окремнением ранее отложившихся осадков), формировал врезанное русло, которое заполнялось грубообломочным и несортированным материалом (рис.8).

Приведенный пример показывает, как изучение и интерпретация в общем небольшого конкретного объекта позволяет делать достаточно общие выводы, отделять мелководные шельфовые области от глубоководных. А в данном случае это и граница двух тектонически разных областей — эпигерцинской платформы на севере и океана Тетис на юге. ■

служили мелководные известняки располагавшегося севернее шельфа. Верхние элементы — отложения, возникшие в спокойных условиях, с обильными остатками планктонных организмов, преимущественно радиоларий. Их раковинки стали основой для последующего образования кремней.

Такое относительно равномерное осадконакопление (периодический взброс и осаждение карбонатного материала, затем его нефелодная седиментация) иногда сменялось катастрофическим событием уже иного масштаба. Причиной его могло стать сильное землетрясение или общее обмеление, вплоть до осушения шельфа. Энергия низвергающегося вниз потока была уже существенно больше. Новый поток размывал отложившийся набор турбидитов (об этом, в частности, свидетельствует нали-

Catastrophes on submarine slopes

V.G.Kuznetsov

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia)

Essay for non-specialists describes the examples of how to reconstruct the mechanisms and ways of sedimentary formation and to understand the changes of settings in the geological history of the Earth by studying the samples of sedimentary rock, specific sedimentary deposits, forms of sedimentary deposits and the sections of sedimentary masses.

Key words: lithology, sedimentary rock, chert nodules, stilolites, microbialites, turbidites, reefs.

Радиоуглеродное свидетельство антропогенной причины потепления

доктор физико-математических наук А.В.Бялко^{1,2}

¹Институт теоретической физики имени Л.Д.Ландау РАН (Москва, Россия)

²Журнал «Природа» РАН (Москва, Россия)

При ядерных взрывах в атмосфере нейтроны реагировали с азотом воздуха, образуя радиоуглерод ^{14}C . В результате к октябрю 1965 г., когда вступил в силу Международный договор о запрещении ядерных испытаний в атмосфере, содержание радиоуглерода в атмосфере более чем вдвое превысило уровень 1950 г. Однако затем измерения его концентрации показали экспоненциально быстрое ее снижение. В атмосфере радиоуглерод присутствует в форме $^{14}\text{CO}_2$. Для радиоуглерода и стабильных изотопов углерода идентичны как поглощение водой, так и химические реакции с их участием. Совместное изучение регулярных трендов концентраций ^{14}C и CO_2 , а также их сезонных колебаний позволяет получить уникальную информацию о газообмене между атмосферой и океаном.

Ключевые слова: климат, радиоуглерод, диоксид углерода, газообмен

Есть три научных вопроса, касающихся потепления климата. Как будет показано далее, их физическая природа различна. Поэтому оптимально сформулировать их раздельно и отвечать на них последовательно. Итак:

Вопрос первый. Связано ли повышение средней глобальной температуры поверхности Земли с ростом атмосферной концентрации диоксида углерода CO_2 ?

Вопрос второй. Вызвано ли это возрастание концентрации CO_2 индустриальным развитием цивилизации за последнее столетие, а именно активным использованием ископаемых топлив (угля, нефти, газа)?

Вопрос третий. Что порождает растущую погодную неустойчивость — потепление климата или случайные факторы?

Эти вопросы тесно взаимосвязаны, а при обсуждении потепления климата в средствах массовой информации ответы на них произвольно или сознательно путают. Здесь мы постараемся научно обоснованно ответить на второй вопрос, но вначале выскажем мнение по первой и третьей проблеме.

Сложнее всего дать аргументированное заключение по первому пункту. То, что температура земной поверхности должна расти с увеличением содержания в атмосфере парниковых газов (паров воды и диоксида углерода CO_2), известно более 100 лет, со времени работы 1896 года Сванте Аррениуса [1]. Зависимость средней глобальной температуры от концентрации CO_2 называется климатической чувствительностью. Хотя физическая

природа самого парникового эффекта загадки не представляет, вычислить климатическую чувствительность теоретически не удастся из-за тесной взаимосвязанности вовлеченных процессов. Так, влажность атмосферы сама возрастает с температурой, а парниковый эффект зависит от состояния облачности. Водяные капли и кристаллы льда не вносят вклада в парниковый эффект, поэтому влияние водяных паров ограничено высотой облаков, тогда как действие диоксида углерода на тепловое излучение Земли простирается на всю атмосферу. К сожалению, теория облачности пока неполна. Например, нельзя с уверенностью сказать, была ли облачность в ледниковые периоды выше или ниже современной. В свою очередь, это означает, что оценки альbedo планеты в прошлом не очень достоверны.

Точнее всего вычислить климатическую чувствительность экспериментально удалось К.Снайдер по данным, полученным при бурении антарктических льдов [2] (ею обработана информация, относящаяся и к ледниковым, и к относительно теплым периодам, так называемым интергляциалам). Однако применимость в современных условиях найденной таким образом зависимости температуры от концентрации CO_2 пока строго не доказана, а работа Снайдер вызвала возражения [3], на которые она ответила [4], но убедила далеко не всех. Применности климатической чувствительности к современному климату дополнительно препятствует тот факт, что в течение года изменения температуры опережают по фазе колебания концентрации CO_2 [5], хотя, казалось бы, причинная связь должна была быть обратной. К этому парадоксу мы еще вернемся.

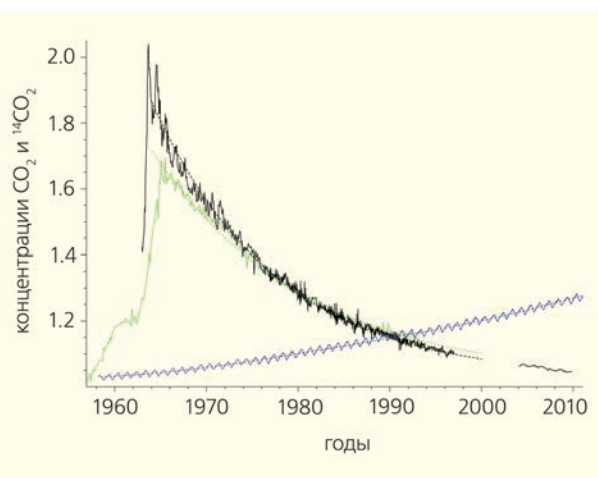


Рис.1. Изменение атмосферных концентраций радиоуглерода и CO_2 по отношению к их уровням 1950 г. Данные измерений радиоуглерода (чёрная кривая для Северного полушария, зелёная — для Южного) взяты из работ [8, 9, 10]. Хорошо известные данные измерений атмосферной концентрации CO_2 (синяя кривая) также нормированы на уровень 1950 г. Колебания всех экспериментальных зависимостей происходят с периодом 1 год, это сезонные вариации. Штриховая чёрная линия на кривой ^{14}C — экспонента с характерным временем 13.5 лет, штриховая зелёная линия — экспонента с характерным временем 16.7 лет. Штриховая синяя линия CO_2 — сглаженные ежегодные средние.

Ответ на третий вопрос, связаны ли современные погодные катаклизмы с потеплением климата, имеет наблюдательную доказательность [6] и физическое обоснование. Оно состоит в том, что повышение поверхностной температуры усиливает конвекцию атмосферы. В частности, возрастает испарение воды океанов, что приводит к более частым наводнениям.

Далее мы не будем здесь рассматривать, как проходит потепление климата, а уточним связь регистрируемого роста атмосферной концентрации диоксида углерода с процессами его выделения при сжигании ископаемых топлив, его поглощения водами океана (и растениями суши) и обратного выделения в атмосферу.

Существенную информацию в этот анализ добавляют наблюдательные ряды измерений атмосферной концентрации радиоуглерода ^{14}C . Радиоактивный изотоп углерода образуется естественным путем в результате взаимодействия космических лучей с азотом земной атмосферы и распадается с периодом полураспада, равным 5830 лет. Эти два процесса обеспечивали в прошлом примерно постоянную концентрацию ^{14}C в земной атмосфере. Однако с началом ядерных испытаний ситуация резко изменилась. При ядерных взрывах в атмосфере нейтроны реагировали с азотом воздуха, образуя радиоуглерод, и его содержание в атмосфере стало возрастать.

В 1958 г. академик А.Д.Сахаров указал на негативные биологические последствия роста концентрации радиоуглерода [7]. К тому времени наблюдаемый фон радиоуглерода намного превысил естественный. Вывод Сахарова о долговременном воздействии радиоуглерода на биоту оказался ошибочным — он не учитывал роль газообмена атмосферы с океаном, параметры которого в 50-х годах были неизвестны. Однако его статья сыграла важную роль при заключении Международного договора о запрещении ядерных испытаний в атмосфере (вступил в силу в октябре 1965 г.) Как видно из графика (рис.1), который построен по данным измерений радиоуглерода [8–10] и диоксида углерода*, после прекращения ядерных испытаний в атмосфере концентрация радиоуглерода начала спадать экспоненциально быстро.

Усредненное по сезонным колебаниям падение концентрации радиоуглерода отвечает зависимости $1.026 + 0.781 \exp[-(t - 1965)/\tau]$. Характерное время τ в экспоненте этого выражения равно 13.5 года. В Южном полушарии характерное время убывания радиоуглерода несколько больше, оно равно 16.7 года. Но существенно, что оба эти времени гораздо меньше периода полураспада ^{14}C .

Поэтому естественный распад не мог внести заметный вклад в снижение его атмосферной концентрации. Единственное логичное объяснение этого быстрого падения состоит в том, что атмосферный радиоуглерод в виде диоксида активно поглощался океанской водой (и в меньшей степени растениями суши). Одновременно он разбавлялся стабильными изотопами углерода вследствие сжигания ископаемых топлив.

Влияние этих процессов на тренды всех зависимостей (рис.2) было рассмотрено в работе автора [11], где получены уравнения, описывающие изменения концентраций для обоих изотопов углерода. Анализ наблюдательных данных позволил количественно вычислять потоки газов из атмосферы в океан и обратно за все время измерений. В частности, в этой работе показано, что до 1990 г. доминировало поглощение радиоуглерода океаном, а затем океан начал отдавать его в атмосферу.

Изменения концентраций радиоуглерода и его стабильных изотопов после прекращения атмосферных ядерных испытаний происходили в противоположных направлениях, хотя они одинаково поглощаются растениями суши и океанской водой. Почему? Причина очевидна: количество радиоуглерода в атмосфере более не возрастало, а содержание диоксида стабильных изотопов постоянно увеличивалось при сжигании угля, нефти и природного газа. Оба эти процесса несомненно имеют антропогенное происхождение.

* National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory Data (ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_mm_mlo.txt).

Обратим также внимание на сезонные колебания концентраций радиоуглерода и диоксида углерода, их амплитуды и фазы. Прежде всего отметим, что величины амплитуд сезонных колебаний ^{14}C и CO_2 относительно самих концентраций остаются почти постоянными во времени. С точностью до ошибок измерений, в обоих случаях относительная величина сезонных колебаний равна 0.10–0.12. Постоянство этого отношения (его небольшие нарушения связаны с влиянием феномена Эль-Ниньо) позволяет построить общую сезонную картину колебаний.

Освещенность планеты Солнцем, а следовательно, и все климатические зависимости имеют годовичные и полугодовые периоды. Основанием для вычисления амплитуд и фаз колебаний CO_2 на разных широтах послужили спутниковые данные [12]. Средние амплитуды и фазы для широт с шагом в 10° определялись с помощью этих данных по формуле, учитывающей годовичные и полугодовые периоды: $a_1 \cos(2\pi t + \varphi_1) + a_2 \cos(4\pi t + \varphi_2)$. Последующее сглаживание позволило получить картину ежегодных сезонных вариаций концентрации диоксида углерода в разных широтных поясах с четко выраженными максимумом и минимумом. Максимум достигается в феврале, когда отопительный сезон в Северном полушарии увеличивает выбросы CO_2 , а минимум — в августе в полярных широтах, когда диоксид активно поглощается Ледовитым океаном, освобождающимся ото льда. Вблизи Антарктиды газ поглощается почти равномерно в течение всего года.

Построенный таким образом двумерный график на плоскости переменных «месяц — географическая широта» наглядно свидетельствует о связи колебаний CO_2 с его выбросами в атмосферу при сжигании ископаемых топлив на тех широтах Северного полушария, где наиболее развита промышленность. Очевидно также интенсивное поглощение газа в полярных широтах и частичное обратное выделение его в атмосферу в экваториальных широтах. Сезонные вариации CO_2 дают возможность разъяснить отмеченный ранее парадокс.

Глядя на график рис.2, легко понять, почему колебания глобальной температуры планеты на несколько месяцев опережают колебания диоксида углерода. Очевидная причина этого явления состоит в том, что драйвером (инициатором) повышенных выбросов CO_2 служит зимнее охлаждение Северного полушария. Океан и раститель-

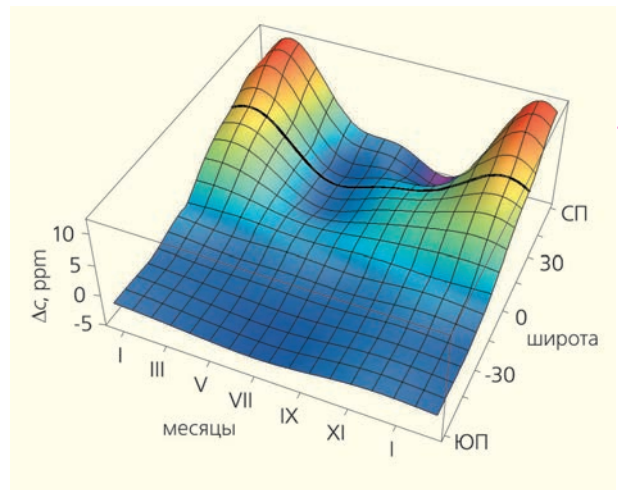


Рис.2. Ежегодные вариации концентрации CO_2 (в частях на миллион) в зависимости от широты по сглаженным данным спутниковых измерений [11]. Максимум достигается в феврале, когда отопительный сезон в Северном полушарии увеличивает выбросы CO_2 , а минимум — в августе в полярных широтах, когда диоксид активно поглощается Ледовитым океаном, освобождающимся ото льда. Вблизи Антарктиды газ поглощается почти равномерно в течение всего года. Выделенная кривая — сезонные вариации на 48°с.ш.

ность суши не успевают компенсировать эти выбросы поглощением, поэтому концентрация диоксида возрастает, достигает своего максимума через месяц-полтора после самых холодных недель и затем снижается. В своей статье [5] О.Хумлум и его соавторы из запаздывания колебаний

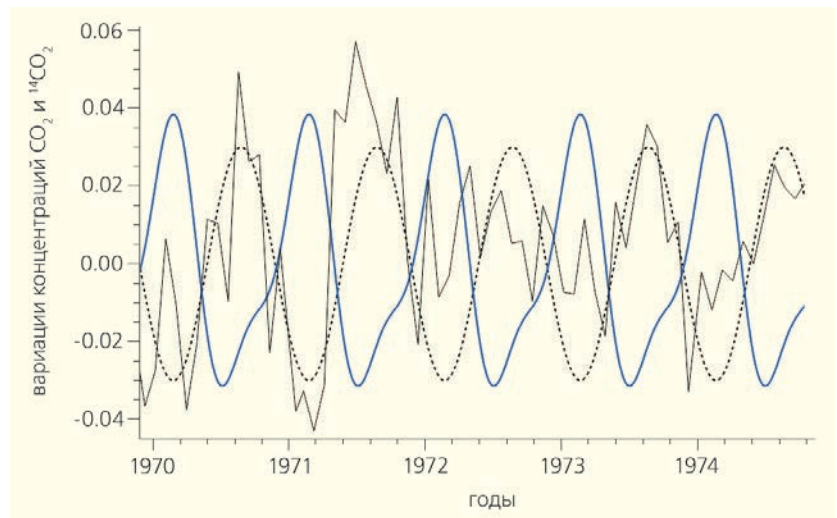


Рис.3. Сравнение сезонных колебаний концентраций радиоуглерода (черная ломаная и ее периодическая штриховая аппроксимация) и диоксида углерода на широте 48° Северного полушария (синяя кривая). Они происходят практически в противофазе — по причине того, что максимум сжигания ископаемых топлив приходится на зимние месяцы Северного полушария, а затем газ CO_2 (максимум его концентрации достигается в феврале) заметно разбавляет атмосферный радиоуглерод.

CO₂ делают вывод, что монотонная зависимость глобальной температуры от концентрации этого парникового газа (климатическая чувствительность) вообще несправедлива, поскольку де причина при этом опережает следствие. Это заключение ошибочно.

Обратимся теперь к сезонным колебаниям радиоуглерода. Для кривой ¹⁴C, приведенной на рис.1, относительная годовая амплитуда и фаза оказались следующими: $a_1^{14} = 0.013 \pm 0.004$; $\phi_1^{14} = 2.22 \pm 0.03$. Полугодичная амплитуда a_2^{14} оказалась пренебрежимо мала. Широта станции Schauinsland (Шауинсланд, Германия), где проводились измерения концентрации радиоуглерода, равна 47°55' с.ш. На этой широте годовая амплитуда и фаза сезонных вариаций диоксида углерода равны $a_1 = 0.014$;

$\phi_1 = 5.62 \approx 2.22 + \pi$. Отсюда следует, что колебания концентрации радиоуглерода находятся практически в противофазе с колебаниями CO₂. Это означает, что влияние разбавления атмосферного радиоуглерода индустриальной эмиссией от сжигания ископаемых топлив, не содержащих ¹⁴C, оказывается наиболее существенным фактором, определяющим сезонные колебания радиоуглерода. Амплитуда сезонных колебаний радиоуглерода в Южном полушарии близка к ошибкам измерений.

Из приведенного анализа следует однозначный вывод: антропогенное воздействие проявляется во временных зависимостях концентраций радиоуглерода и диоксида углерода, как в их трендах противоположных направлений, так и в противофазе сезонных колебаний. ■

Литература / Reference

1. Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 5. 1896; 41: 237–276.
2. Snyder C.W. Evolution of global temperature over the past two million years. Nature. 2016; 538: 226–228.
3. Schmidt G.A., Severinghaus J., Abe-Ouchi A. et al. Overestimate of committed warming. Nature. 2017; 547: E16.
4. Snyder C.W. Snyder replies. Nature. 2017; 547: E17.
5. Humlum O., Stordahl K., Solheim J. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature. Global and Planetary Change. 2013; 100: 51–69.
6. Киселев А.А., Кароль И.Л. Чреда погодных аномалий — случайность или закономерность? Природа. 2017; 7: 9–16. [Kiselev A.A., Karol I.L. The Sequence of Weather Anomalies – an Accident or a Pattern? Priroda. 2017; 7: 9–16. (In Russ.)]
7. Сахаров А.Д. Радиоактивный углерод ядерных взрывов и непороговые биологические эффекты. Атомная энергия. 1958; 4: 6–45. [Sakharov A.D. Radioactive Carbon from Nuclear Explosions and Nonthreshold Biological Effects. Atomic Energy. 1958; 4: 6–45. (In Russ.)]
8. Levin I., Kromer B. Twenty years of atmospheric ¹⁴CO₂ observations at Schauinsland station, Germany. Radiocarbon. 1997; 39: 205–218.
9. Miller J.B., Lehmman S.J., Montzka S.A. Linking emissions of fossil fuel CO₂ and other anthropogenic trace gases using atmospheric ¹⁴CO₂. Journal Geophysical Resurch. 2012; 117: D08302.
10. Manning M.R., Lowe D.C., Moss R.C. et al. The use of radiocarbon measurements in atmospheric sciences. Radiocarbon. 1990; 32: 37–58.
11. Byalko A.V. Variations of Radiocarbon Content and the Atmosphere-Ocean Gas Exchange. Doklady Physics. 2013; 58(7): 267.
12. Ruzmaikin A., Aumann H.H., Pagano T.S. Patterns of CO₂ variability from global satellite data. Journal of Climate. 2012; 25: 6383–6393.

Radiocarbon evidence for anthropogenic cause of climate warming

A.V.Byalko^{1,2}

¹Landau Institute for theoretical physics RAS (Moscow, Russia)

²Priroda journal, RAS (Moscow, Russia)

In nuclear explosions in the atmosphere neutrons react with air nitrogen forming radiocarbon. As a result, by October 1965 when the international treaty banning nuclear tests in the atmosphere came into force the content of radiocarbon in the atmosphere exceeded its level of 1950 more than twice. However, then measurements of its concentration showed an exponentially fast decrease. In the atmosphere radiocarbon is present in the form of ¹⁴CO₂. Its absorption by water, as well as all chemical reactions of radiocarbon and stable carbon isotopes are identical. A joint study of regular trends in concentrations of ¹⁴C and CO₂ as well as their seasonal variations provides unique information on gas exchange between the atmosphere and the ocean. These results could be treated as a proof for anthropogenic influence on recent history of atmospheric carbon dioxide.

Keywords: climate, radiocarbon, carbon dioxide, gas exchange.

Сом — «палеонтолог»

кандидат геолого-минералогических наук В.Н.Комаров¹, К.И.Юшин¹

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (Москва, Россия)

На заключительном этапе тафономического цикла происходит изменение местонахождения ископаемых в зоне поверхностного выветривания в результате механической деструкции, а также процессов растворения и замещения. Широкое распространение в это время получает накопление в танатоценозах перезахороненных окаменелостей — их переотложение. Уникальная находка позвонка верхнеплейстоценовой европейской косули (*Capreolus capreolus*) в современном пресноводном соме (*Silurus glanis*) позволяет говорить о новом типе переотложения окаменелостей — биогенном, который может реализовываться самыми различными организмами. Его необходимо учитывать для более полной расшифровки процессов, которые приводят к формированию местонахождений ископаемых.

Ключевые слова: сом, Волга, ископаемые кости, переотложение окаменелостей.

Летом 2016 г. К.И.Юшин нашел уникальный палеонтологический образец. В нижнем течении Волги, в районе с.Замьяны, он поймал сома размером около 2 м и в его желудке обнаружил кость ископаемого животного, которая была определена сотрудником лаборатории млекопитающих Палеонтологического института РАН, доктором биологических наук А.К.Агаджаняном.

Найденная кость удовлетворительной сохранности представляет собой фрагмент длиной 24 см из шейного отдела позвоночного столба не крупного оленя, возможно европейской косули *Capreolus capreolus*. Данный вид косули характерен для фауны позднего плейстоцена, но встречается крайне редко. Судя по сохранности костной ткани, геологический возраст позвонка, вероятно, соответствует интервалу 15–10 тыс. лет назад.

Плейстоцен — время повсеместного распространения в Евразии удивительной мамонтовой фауны, представленной в том числе различными крупными млекопитающими — мамонтами, шерстистыми носорогами, первобытными бизонами, лошадьми. Их ископаемые остатки в долине Волги разнообразны и многочисленны.

Систематическое изучение плейстоценовой териофауны Поволжья началось с 1930-х годов. Именно тогда был описан видовой состав из типовых местонахождений, связанных с плейстоценовыми аллювиальными (образованными речными



Сомы — санитары рек.

Фото С.В.Ускова

осадками) толщами, которые слагали берега среднего и нижнего течения Волги. Это позволило выделить так называемую волжскую фауну. В дальнейшем она получила статус самостоятельного комплекса, названного хазарским.

Средой обитания волжской фауны служила огромная степная и лесостепная область (местообитания косуль обычно связаны с лесными угодьями), которая возникла к концу раннеплейстоценовой ледниковой эпохи и сохраняла примерно одни и те же ландшафтно-климатические условия в течение длительного времени. Типовое местонахождение волжской фауны расположено в Волгоградской обл., на правом берегу Волги, у с.Черный Яр, и связано с горизонтом черноморских песков. Здесь в составе фауны установлены многочисленные костные остатки самых разных форм: черепа, рога, кости конечностей, зубы и др.



Фрагмент шейного позвонка европейской косули *Capreolus capreolus*, обнаруженный в пойманном соме. Длина масштабной линейки 5 см. Коллекция К.И.Юшина.

Здесь и далее фото В.Н.Комарова

Значительная часть обнаруженного в Поволжье палеонтологического материала собрана непосредственно на перекатах и пляжах рек.

В коллекции Юшина присутствуют еще два крупных шейных позвонка удовлетворительной сохранности — шерстистого (или волосатого) носорога *Coelodonta antiquitatis* и первобытного быка *Bison priscus* (определение Агаджаняна). Их в 2014 и 2015 гг. подняли сетью со дна реки в Ено-

таевском районе, в окрестностях поселка Волжский, примерно в 20 км выше по течению от места поймки сома.

Что касается ископаемой кости в соме, то можно отметить следующее. Сом обыкновенный (*Silurus glanis*) — одна из самых крупных пресноводных рыб. Он предпочитает омуты с затопленными деревьями, корягами, активность проявляет в ночное время. Главная еда сомов — рыба мелких и средних размеров, раки, моллюски, черви, птенцы водоплавающих птиц, лягушки, падаль, причем сом проглатывает еду вместе с водой, не пережевывая. Приводится немало случаев, когда он нападал на мелких млекопитающих, случайно попавших в воду, и даже на собак, переплывавших реку. Иногда эти прожорливые хищники заглатывают предметы, которые к пище отнести нельзя. Рыбаки неоднократно находили в их желудках пуговицы, монеты, кольца, обувь, камни, консервные банки, бутылки. Сомов называют санитаром рек. Находки окаменелостей в рыбах (как, впрочем, и в других живых организмах), насколько нам известно, никогда ранее не описывались. Главным источником фактического материала для палеонтологов всегда служили естественные и искусственные обнажения, керн скважин и колонковых труб. Много находок ископаемых млекопитающих и даже беспозвоночных сделано при раскопках культурных слоев стоянок и поселений древнего человека.

Описываемая находка, безусловно, принципиально интересна и еще с одной стороны. На заключительном этапе тафономического цикла (процесса образования окаменелостей и их дальнейшей судьбы, вплоть до попадания к палеонто-



Рис.3. Фрагменты шейных позвонков шерстистого носорога *Coelodonta antiquitatis* (слева) и первобытного быка *Bison priscus*. Длина масштабной линейки 5 см. Коллекция К.И.Юшина.

логам) происходит изменение местонахождения ископаемых в зоне поверхностного выветривания. Широкое распространение в это время получает асинхронное и часто многократное перезахоронение окаменелостей, которое называется переотложением.

Материал по переотложению остатков организмов, в основном в морских обстановках, обобщил Б.Т.Янин [1]. В его книге предложена классификация типов переотложения, основанная на учете динамического процесса, в результате которого происходит рассеивание исходного ориктоценоза (совокупности окаменелых остатков ископаемых организмов в данном местонахождении), перемещение окаменелостей и внедрение их в новую среду. Среди случаев переотложения окаменелостей из более древних пород в более молодые выделено девять генетических типов: денудационный, абразионный, оползневой, турбидный, ледниковый, вулканический, импактный, тектонический и миграционный. Следует отметить, что разнообразны не только типы переотложения, но и формы их проявления в той или иной обстановке.

Приведенные здесь данные, на наш взгляд, позволяют говорить о новом, достаточно экзотическом типе переотложения окаменелостей — биогенном, который в прошлом мог реализовываться самыми различными организмами. Не исключено,

что и другие примеры такого переотложения будут обнаружены при дальнейшем изучении гастролитов (желудочных камней). Их использовали в качестве специфического способа дробления пищи, а также для придания телу устойчивости при плавании многочисленных вымершие позвоночные (например, плезиозавры и ихтиозавры).

Изложенный материал лишний раз подчеркивает невероятную сложность тафономического цикла и подтверждает слова известного писателя-фантаста и не менее известного палеонтолога И.А.Ефремова о том, что в местонахождениях «мы встречаемся с составом фауны, отражающим не столько подлинную фауну данной области и данного времени, сколько процессы, создавшие местонахождение» [2, с. 103].

Как и в настоящее время, так и в прошлом биогенный тип переотложения вряд ли имел широкое распространение. Он не мог стать причиной крупных концентраций остатков организмов. Однако его необходимо учитывать для более полной расшифровки процессов, которые приводят к формированию местонахождений, что позволит правильно охарактеризовать таксономическую и палеоэкологическую структуру конкретных ориктоценозов, реконструировать дальность, длительность, направление и возможный способ транспортировки остатков организмов. ■

Литература / Reference

1. Янин Б.Т. Основы тафономии. М., 1983. [Yanin B.T. The Foundation of Taphonomy. Moscow, 1983. (In Russ.)]
2. Ефремов И.А. Тафономия и геологическая летопись. М., 1950. [Efremov I.A. The taphonomy and the Geological Record. Moscow, 1950. (In Russ.)]

Catfish — paleontologist

V.N.Komarov¹, K.I.Yushin¹

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University

At the final stage of the taphonomic cycle, after the deposit has gone to the surface in a result of different processes, the alteration of the deposit in the zone of surface weathering occurs, due to the mechanic destruction as well as the processes of solution and replacement. A phenomenon of the deposition in thanatocenosis the reburied fossils — redeposition — has a widespread occurrence in this time. On the basis of the unique finding of the cervical vertebra of the Upper Pleistocene European roe deer (*Capreolus capreolus*) in the modern freshwater catfish (*Silurus glanis*) a new type of the fossils redeposition — biogenic, which can be realized by a variety of the organisms, is established. Its account can be used for a more complete breakdown of the processes, which lead to the forming of the deposits.

Key words: catfish, Volga, fossil bones, redeposition of fossils.

Зоомикробные симбиозы и азотный метаболизм у фитофагов

Научные сообщения

А.А.Степаньков¹, кандидат биологических наук Т.А.Кузнецова¹, доктор биологических наук М.М.Умаров², кандидат биологических наук М.В.Вечерский¹

¹Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН (Москва, Россия)

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

Азотный баланс взрослого млекопитающего всегда близок к нулю. Однако значительное количество аминокислот ежедневно подвергается дезаминированию в печени и мышцах, что обуславливает необходимость компенсации этих потерь. Плотоядные животные, потребляющие высокобелковую пищу, легко возобновляют утраченные аминокислоты, а травоядные (фитофаги), питающиеся низкобелковыми кормами, могут испытывать дефицит азота. Парадоксально, но у фитофагов интенсивность дезаминирования аминокислот находится на столь же высоком уровне, что и у плотоядных. Справиться с дефицитом азота им позволяет только симбиоз с микроорганизмами, населяющими желудочно-кишечный тракт. Часть бактерий осуществляют азотфиксацию. Уреалитические бактерии осуществляют рециклизацию мочевины, т.е. перехватывают утилизируемый азот, превращают его в аминокислоты и возвращают организму-хозяину. Долгое время предполагалось, что млекопитающие способны регулировать этот процесс. Однако анализ литературных и полученных нами данных показал, что интенсивность рециклизации слабо регулируется хозяином и почти полностью зависит от уреазной активности симбиотических микроорганизмов. Таким образом, азотный баланс млекопитающих-фитофагов — следствие тесных зоомикробных взаимодействий, которые выработались в результате совместной эволюции.

Ключевые слова: рециклизация азота, азотный баланс, микробиом ЖКТ, симбиотические микроорганизмы, уреазная активность

Азот — важный элемент питания животных. Его метаболизм затрагивает несколько групп органических соединений: белки, небелковые пептиды, свободные аминокислоты, нуклеиновые кислоты, амины, амиды. Животные либо получают азотсодержащие компоненты из пищи, либо синтезируют их из безазотистых веществ путем прямого аминирования или трансаминирования. Однако некоторые вещества (например, незаменимые аминокислоты и некоторые витамины) не могут быть синтезированы в достаточном количестве и обязательно должны поступать с пищей.

Азотсодержащие вещества выполняют специфические функции, но могут использоваться в качестве неспецифического энергетического субстрата. Окисление этих соединений (как в энергетических целях, так и при утилизации отработавших молекул) сопровождается выделением аммиака. Это соединение токсично для головного мозга, поэтому должно быть быстро инактивировано в печени.

Все азотсодержащие вещества у птиц и пурины у млекопитающих окисляются до мочевой кислоты, остальные — до аммиака, который связывается

в мочевины в орнитиновом цикле. Мочевина и мочевая кислота выводятся почками в качестве конечного продукта обмена.

Разница между количеством усвоенного с пищей азота и выведенного с экскретами называется азотным балансом. Он рассчитывается в граммах/сутки, либо в процентах от поступившего азота. Максимален азотный баланс у растущих организмов, беременных и лактирующих самок, а также у особей в период наращивания мышечной или иной соединительной ткани. Важно, что даже в период роста азотный баланс очень редко превышает 30% (это означает, что из 100 г усвоенного азота минимум 70 г будет выведено с мочой). Когда животные перестают расти, он колеблется в районе нуля (весь поступивший азот выводится с мочой). У стареющих, находящихся в состоянии стресса или неадекватно питающихся особей азотный баланс становится отрицательным. Однако суточное выведение азота с мочой у млекопитающих никогда не опускается ниже 0.05% от массы тела. Даже при отсутствии прироста биомассы животные вынуждены потреблять азотную пищу, чтобы компенсировать потери с мочой. У травоядных (фитофагов) доступность азотного питания становится более строгим лимитирующим фактором, чем доступность энергетического питания. И не-

смотря на это, выведение азота у них остается на стабильно высоком уровне, приблизительно в два раза превышая азотный баланс [1–3]. Очень сложно сказать, с чем связана такая метаболическая консервативность млекопитающих-фитофагов, поскольку очевидно, что снижение темпов окислительного дезаминирования дало бы ярко выраженное конкурентное преимущество. Однако этого не происходит [3].

Альтернативным механизмом, позволяющим сохранять азот в условиях его дефицита, служит рециклизация мочевины микробами [1]. Этот процесс заключается в замедлении экскреции мочевины почками и ее транспорте в просвет желудочно-кишечного тракта (ЖКТ), где происходит разрушение мочевины уреалитическими микроорганизмами до аммиака. Наибольшей активности уреазы (фермент, катализирующий гидролиз мочевины до аммиака и углекислого газа) достигает в рубце и слепой кишке фитофагов.

Выделяющийся аммиак используется симбионтами для синтеза микробного белка. Поскольку уреазы активны во внеклеточном пространстве, образующийся аммиак становится доступным для всех микроорганизмов, а не только уреалитических. Известно, что многое в микробном пищеварении связано с деятельностью не только прокариот, но и простейших, например жгутиконосцев. Есть данные, что уреазная активность зависит не от свободноживущих микроорганизмов, а от прокариот, ассоциированных с инфузориями [4].

Нарастающая микробная биомасса, попадая в железистый желудок (например, в сычуг у жвачных животных), усваивается организмом хозяина и восполняет пул аминокислот крови. Так происходит повторное использование азота, который мог быть выведен в форме мочевины через почки. Интересно, что порядка половины азота мочевины, который прошел цикл и вернулся в кровь организма-хозяина, подвергается окислительному дезаминированию и переводится при первом же прохождении через печень обратно в форму мочевины.

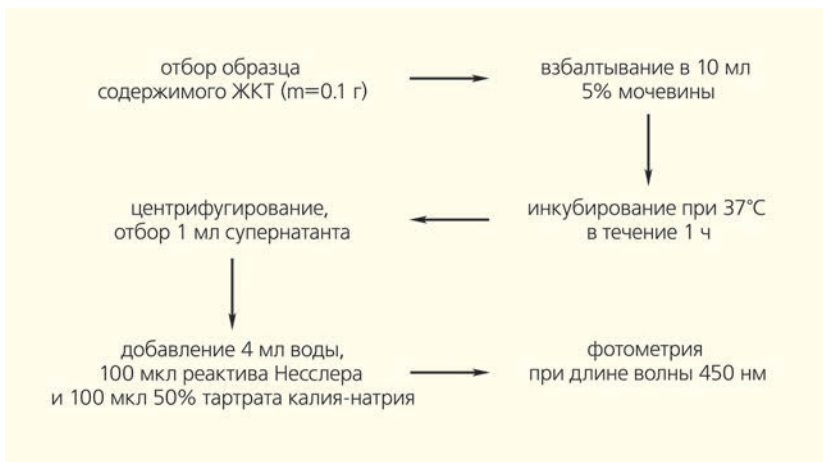
Поскольку отсутствуют достоверные и однозначные методики количественной оценки рециклизации мочевины, имеющиеся данные следует воспринимать с известной осторожностью. Тем не менее, с помощью изотопных методов с меченой мочевиной показано, что путем рециклизации удается увеличить азотный баланс примерно на 50%, что составляет всего 5–10% от поступившего азота [1]. Между тем, разница в соотношении усвоенного азота к выведенному у хищников и травоядных колеблется именно в пределах 50%. Азотный баланс у овцы с подавленной уреазной активностью приблизительно соответствует азотному балансу кота [3, 6]. Можно предположить, что эта разница как раз и обусловлена наличием рециклизации мочевины у фитофагов. Наблюдаемая величина в 50% имеет очень боль-

шое эволюционное значение, поскольку размер травоядных млекопитающих во многом определяется размером их пищеварительных органов (вес рубца коровы достигает 20% от общей массы животного) и дальнейшее увеличение объема перевариваемого корма будет входить в противоречие с габаритами пищеварительной системы.

Очевидно, рециклизация мочевины — важная физиолого-биохимическая адаптация к питанию низкобелковым кормом. Убедительно доказано, что у жвачных животных интенсивность рециклизации мочевины находится в обратной зависимости от количества азота в пище: избыток подавляет этот процесс, а недостаток, наоборот, повышает [2, 5]. Однако неясно, каким образом осуществляется регуляция процесса.

Наиболее популярной стала гипотеза о регуляции скорости переноса мочевины в ЖКТ. Это может достигаться как с помощью изменения интенсивности реабсорбции мочевины в почечных канальцах, так и путем изменения количества ее транспортеров в кишечнике. (Мочевина может пассивно отфильтровываться в кишечник, а может проникать по транспортерам UT_2 путем облегченной диффузии.) Действительно, при повышении количества азота в рационе степень реабсорбции мочевины снижается: у овец, например, при четырехкратном увеличении азота она падает с 70 до 25%, но при этом в моче итоговая концентрация мочевины остается существенно выше при богатом рационе, чем при бедном [2]. Что касается количества транспортеров, то при дефиците азота степень их экспрессии несколько выше и количество больше, чем при его избытке, однако выход мочевины в кишечник при богатом азотом рационе все равно увеличивается. Так, у овец при четырехкратном повышении количества диетарного азота происходит пятикратное ускорение переноса мочевины в кишечник [2], несмотря на снижение почечной реабсорбции и уменьшение количества транспортеров мочевины. Таким образом, оба механизма регуляции, доступные организму-хозяину, не могут обеспечить снижение транспорта мочевины в кишечник. Что же приводит к увеличению темпов рециклизации азота при снижении количества диетарного азота (в том числе при сезонных колебаниях)? Единственный показатель, который меняется аналогичным образом, это уреазная активность в ЖКТ. Выяснилось, что она падает в три раза в рубце при четырехкратном увеличении содержания азота в пище. Судя по всему, именно колебания уреазной активности в ЖКТ обуславливают интенсивность рециклизации азота в целом. Вероятно, микроорганизмы реагируют на доступность азота в среде и прекращают вырабатывать ненужные ферменты.

Для проверки этой гипотезы следовало бы сравнить уреазную активность в ЖКТ животных, потребляющих корма с различным содержанием



Универсальная схема опыта по измерению уреазной активности в ЖКТ млекопитающих и птиц.

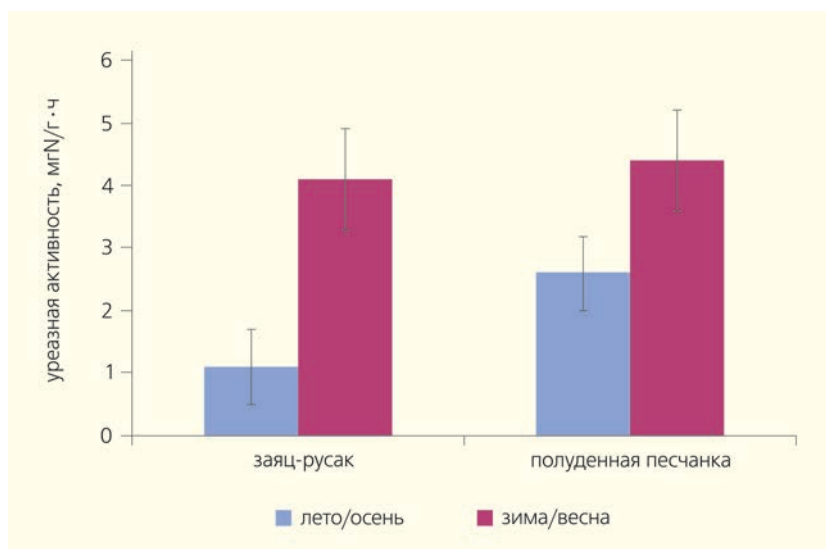
азота. Однако сопоставить немногочисленные литературные данные оказалось невозможно, поскольку все авторы представили свои результаты по уреазной активности в ЖКТ в разной форме. Величины нормируют на сухое вещество, на влажную навеску, на миллилитр, на грамм, на минуту, на час, на 20 мин и на полминуты. Инкубацию осуществляют преимущественно при 25°C, в то время как физиологическая температура находится в диапазоне 35–39°C. Поскольку прямо сравнивать эти данные невозможно, наш коллектив провел оценочную работу по измерению уреазной активности в ЖКТ некоторых животных, испытывающих разную потребность в азоте.

В эксперимент были включены как строгие фитофаги (зайцы [6], пищухи, сурки, мышевидные грызуны, курообразные [7]), так и все-

ядные и плотоядные (кабаны, крысы, вальдшнепы). Для фитофагов измерения проводились ранней весной, когда животные питались низкобелковыми кормами, и осенью, когда потреблялись более богатые корма. Наши результаты целиком подтвердили первоначальную теорию. Большая уреазная активность (представленная в виде массы азота аммиака, образующегося за 1 ч в 1 г влажного содержимого кишечника) свыше 0.2 и вплоть до 4 мгN/г·ч наблюдалась у строгих фитофагов. У всеядных животных она не превышала 0.09 мгN/г·ч, а у плотоядных практически полностью отсутствовала. Важно, что уреазная активность в разных отделах ЖКТ сильно отличалась. Максимальные величины наблюдались либо в преджелудке (для копытных), либо в толстом отделе кишечника (для грызунов и зайцеобразных). В железистом желудке и проксимальной части тонкого кишечника уреазная активность обычно пренебрежимо мала, а в дистальной части тонкого кишечника может приближаться к величинам, характерным для толстого кишечника. Также были отмечены почти четырехкратные сезонные колебания уреазной активности у тех животных, у которых зимние и летние корма резко отличались по содержанию белка. Особенно сильные колебания наблюдались у зайца-русака, тетерева-косача и полуденной песчанки. Наблюдаемые сезонные колебания

отмечены именно в активных ферментерах — преджелудке и слепой кишке. Активность в желудке и тонком кишечнике оставалась на стабильно низком уровне.

Таким образом, именно уреазная активность микроорганизмов ЖКТ оказалась наиболее лабильным фактором, чутко реагирующим на изменение азотных потребностей животного. Другие факторы — скорость дезаминирования аминокислот и интенсивность транспорта мочевины — оказались более консервативными. Все это позволяет рассматривать прокариотных кишечных симбионтов как отдельный орган, выполняющий важную роль не только в пищеварении, но и в регуляции азотного баланса животного. Инте-



Сезонные колебания уреазной активности в слепой кишке зайца-русака и полуденной песчанки.

ресно, что очень похожие симбиотические системы сложились у филогенетически очень далеких организмов, принадлежащих к разным классам, но объединенных общей экологотрофической

стратегией. Вероятно, формирование зоомикробных симбиозов у фитофагов может протекать очень быстро, что позволяет признать это одним из ведущих эволюционных трендов. ■

Литература / Reference

1. Houtp T.R. Utilization of blood urea in ruminants. *Am. J. Physiol.* 1959; 197: 115–120.
2. Marini J.C., Klein J.D., Sands J.M., van Amburgh M.E. Effect of nitrogen intake on nitrogen recycling and urea transporter abundance in lambs. *J. Anim. Sci.* 2004; 82(4): 1157–1164.
3. Ludden P.A., Harmon D.L., Huntington G.B., Larson B.T., Axe D.E. Influence of the novel urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ruminant nitrogen metabolism: II. Ruminant nitrogen metabolism, diet digestibility, and nitrogen balance in lambs. *J. Anim. Sci.* 2000; 78(1): 188–198.
4. Kiran D., Mutsvangwa T. Effects of partial ruminal defaunation on urea-nitrogen recycling, nitrogen metabolism, and microbial nitrogen supply in growing lambs fed low or high dietary crude protein concentrations. *J. Anim. Sci.* 2010; 88(3): 1034–1047. Doi:10.2527/jas.2009-2218.
5. Marini J.C., van Amburgh M.E. Nitrogen metabolism and recycling in Holstein heifers. *J. Anim. Sci.* 2003; 81(2): 545–552.
6. Green A.S., Ramsey J.J., Villaverde C., Asami D.K., Wei A., Fascetti A.J. Cats are able to adapt protein oxidation to protein intake provided their requirement for dietary protein is met. *J. Nutr.* 2008; 138: 1053–1060.
7. Stepan'kov A.A., Kuznetsova T.A., Vecherskii M.V. Urease activity in the gastrointestinal tract of the European hare (*Lepus europaeus*). *Biology Bulletin.* 2017; 44(2): 224–227.
8. Vecherskii M.V., Kuznetsova T.A., Stepan'kov A.A. Activity of urealytic microorganisms in the gastrointestinal tract of the black grouse *Lyrurus tetrix*. *Doklady Biological Sciences.* 2015; 462(1): 131–133. Doi:10.1134/S0012496615030060.

Zoo-microbial interactions and nitrogen metabolism of herbivorous mammals

A.A.Stepan'kov, T.A.Kuznetsova, M.M.Umarov, M.V.Vecherskii
A.N.Severtsov Institute of Ecology and Evolution (Moscow, Russia)

Nitrogen balance of adult mammals is always close to zero; the total nitrogen content of the body practically does not vary in the midterms. However, significant amount of amino acids are deaminated in the liver and muscles daily, and it is necessary to compensate these losses. Carnivores, consuming high-protein forage easily recover amino acids losses, but herbivores feeding on low-protein forage may lack dietary nitrogen. Paradoxically, the intensity of amino acids deamination in herbivores is on the same level in comparison with carnivores. To deal with the lack of nitrogen they can only by the symbioses with microorganisms inhabiting their gastrointestinal tract. Some bacteria are capable to fix nitrogen. Urealytic bacteria carry out the urea recycling process; that is, they reuse nitrogen, convert it into amino acids, and return to the host organism. For a long time it was assumed that mammals are able to regulate this process themselves. However, analyzing literature as well our own data, we found that the intensity of nitrogen recyclization is poorly regulated by the host organism and almost completely depends on urease activity of the symbiotic microorganisms. Thus, nitrogen balance of herbivorous mammals is a consequence of close zoo-microbial interactions that have developed as a result of co-evolution.

Keywords: nitrogen recycling, nitrogen balance, gut microbiom, symbiotic microorganisms.

Артур Комптон — мастер тонкого и точного эксперимента

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

Американский физик Артур Комптон (1892–1962) обнаружил эффект изменения длины волны рентгеновского излучения вследствие рассеяния его электронами вещества и дал ему теоретическое обоснование. Это стало доказательством существования фотонов. За это открытие ученый был удостоен в 1927 г. Нобелевской премии. Комптон проводил исследования космических лучей, а в годы Второй мировой войны работал над созданием атомной бомбы. После окончания войны организовал в Чикагском университете институты ядерной физики, радиобиологии и изучения металлов, а затем в течение девяти лет возглавлял Университет Вашингтона.

Ключевые слова: история науки, рентгеновские лучи, квантовая физика, фотон, Нобелевская премия, космические лучи, эффект Комптона.

*Для утверждения квантовых воззрений на излучение
Комптон сделал не меньше, чем сто лет назад Френель
для утверждения классической волновой теории света*
М.Джеммер [1, с.160]

В 1905 г. (через пять лет после того, как М.Планк открыл квант энергии) А.Эйнштейн предложил гипотезу о существовании в природе квантов света. В докладе Обществу немецких естествоиспытателей, прочитанном в 1909 г., ученый добавил, что *следующая фаза развития теоретической физики даст нам теорию света, которая будет в каком-то смысле слиянием волновой теории света с теорией истечения* [2, с.181].

В своих работах Эйнштейн допускал наличие одновременно и волновых, и корпускулярных свойств, предсказав корпускулярно-волновой дуализм излучения. Большинство ученых его выводы были восприняты весьма прохладно. Тот же Планк, рекомендуя в 1913 г. Эйнштейна в члены Берлинской академии наук, в своем послании его гипотезу о световых квантах причислит к исследованиям, *бьющим мимо цели*.

Но среди ученых были и те, кто поверил в реальность частиц излучения и активно работал в направлении поисков их опытных доказательств. Тому способствовал и молодой американский физик А.Х.Комптон. Сходная ситуация позднее возникнет применительно и к природе космических лучей. И в эту область науки Комптон — уже известный ученый — также внесет свой существенный вклад.

Начало пути в науке

Артур Холли Комптон родился 10 сентября 1892 г. в семье Элиаса Комптона — священника, профессора философии и декана Вустерского колледжа (штат Огайо). Уже в раннем детстве он проявил живой интерес к естественным наукам, собирая бабочек, изучая палеонтологию и читая популярные книги по астрономии, будившие его воображение.

Пока юный Комптон наслаждался радостями бытия и познания, физика в США трудами Б.Франклина, Дж.Генри и Дж.У.Гиббса набирала свою силу. Когда же ему исполнилось 15 лет, американская наука в лице А.А.Майкельсона удостоилась своей первой Нобелевской премии. Вряд ли Комптон, даже если бы очень хотел, мог осознать тогда значение этого триумфа для будущего развития науки и техники США и для себя лично.

В 1913 г. Артур, окончив Вустерский колледж со степенью бакалавра наук, по совету старшего брата поступил в Принстонский университет, где в 1914 г. получил степень магистра искусств и стал аспирантом-физиком. В 1916 г. Комптон защитил диссертацию на актуальную для того времени тему: «Интенсивность отражения рентгеновских лучей и распределение электронов в атомах». С этого момента он посвятил себя исследованиям жесткого излучения, на что ушло 15 лет его жизни.

При этом Артур был в курсе научных событий и знал, что лучи Рентгена — электромагнитные

волны, занимающие определенное место на шкале волн. Это стало очевидно из теории интерференции рентгеновских лучей на кристаллах, разработанной М.фон Лауэ в 1912 г. и в том же году экспериментально подтвержденной В.Фридрихом и П.Книппингом. В 1915 г. Лауэ был удостоен Нобелевской премии, что не могло ускользнуть от внимания молодого и амбициозного американца.

Продолжая свои исследования, Комптон одновременно год проработал преподавателем физики в Миннесотском университете, а затем два года инженером-исследователем в фирме «Вестингаус». Занимаясь прикладными проблемами, он получил патент на изобретение лампы на парах натрия, участвовал в налаживании производства люминесцентных ламп и помог создавать необходимые авиационные приборы, приобретая при этом репутацию успешного консультанта в инженерной области.

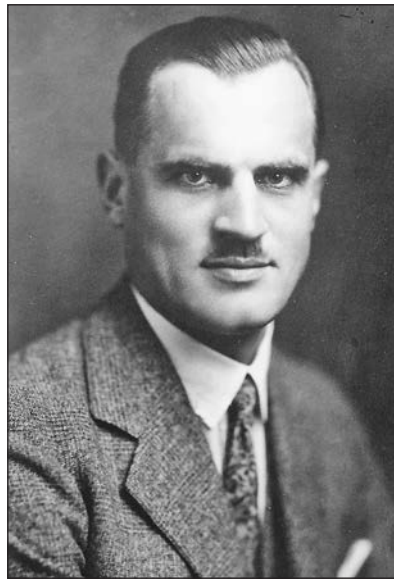
В июне 1916 г. в личной жизни Артура произошло важное событие — он женился на Б.Ч.МакКлоски, однокурснице по Вустеру и Принстону. Она стала его верной помощницей в научной деятельности, а в годы Второй мировой войны наравне с ним получила допуск к секретной работе. Их старший сын служил в Американской ассоциации дипломатической службы (American Foreign Service), а младший стал профессором философии Университета штата Теннесси.

В 1919–1920 гг. Комптон прошел полезную для себя стажировку в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, возглавляемой нобелевским лауреатом Э.Резерфордом. В Кембридже Комптон познакомился с Дж.Дж.Томсоном, повлиявшим в итоге на окончательный выбор им рентгеновских лучей как предмета исследования, и имел с ним позже долгую переписку.

Рентгеновские лучи как раздел оптики

Но в лаборатории нужной для Комптона высоковольтной рентгеновской установки не оказалось, и он временно занялся изучением рассеяния и поглощения гамма-излучения ядер и измерением длины волны гамма-лучей. Обнаружив, что рассеянное излучение поглощается веществом легче, чем первичное, он допустил, что это проявление нового вида флюоресценции.

Позднее Комптон начал исследования по рассеянию уже лучей Рентгена. Вспоминая об этом



Артур Холли Комптон в 1927 г. — в год получения Нобелевской премии.
Фото из архива Mondadori Publishers

времени, он подчеркивал: *...начиная с 1917 г. я провел пять лет в безуспешных попытках согласовать результаты некоторых экспериментов, касавшихся интенсивности и распределения рассеянных рентгеновских лучей, с электронной теорией явления, развитой сэром Дж.Дж.Томсоном [3, с.398].*

За эти годы он опубликовал почти 20 статей о свойствах рентгеновских и гамма-лучей. Была среди них и общая с Резерфордом и неожиданная для первоначальных интересов Комптона статья «Радиоактивность и гравитация» в журнале «Nature» (1919). В ней (опираясь на общую теорию относительности) они попытались измерить сокращение периода полураспада радиоактивного вещества, излучающего в сильном гравитационном поле.

По возвращении в США Комптон возглавил физический факультет Вашингтонского университета в Сент-Луисе (штат Миссури). Изучая интенсивность рентгеновских лучей, отраженных кристаллами, он обнаружил, что изменение распределения электронов на поверхности под действием магнитных полей не влияет на их интенсивность, и предположил, что электрон, *вращающийся подобно миниатюрному гироскопу, является первичной магнитной частицей* [1, с.151].

Между тем за пять лет до занятий Комптона 47-летний профессор Р.Э.Милликен, доказав реальность «атомов» электричества, продолжал отрицать существование световых квантов. Он пытался выяснить: действительно ли энергия кванта света равна $h\nu$, является ли постоянная Планка h неизменной для всего диапазона электромагнитных волн, соответствует ли уравнение Эйнштейна самой реальности. И тем не менее, несмотря на все метания Милликена, проведенные им в 1915 г. измерения фотоэффекта вновь подтвердили гипотезу о свободных квантах излучения.

Таким образом, несмотря на сомнения Милликена в этой гипотезе (по его словам, дерзкой, если не безрассудной, и несовместимой с понятием электромагнитного возмущения), он, тем не менее, взялся за работу по ее проверке, проявив не меньшее упорство, чем то, что отличало его прежнюю работу по изучению дискретности заряда электрона. Но и после постановки своих экспериментов по проверке гипотезы о квантах света он все еще продолжал сохранять свое недоверие к ней.

Точно так же и Комптон, занимаясь рентгеновскими лучами, вначале исходил из представлений

о волновых свойствах света и рентгеновских лучей. Опирался он и на работы Милликена, в которых отразились метания автора в ответе на вопрос, что такое свет — это волны или частицы. Разноречивые факты привели Комптона к тому состоянию разлада, от которого ему еще предстояло избавиться в момент обретения истины посредством своих собственных экспериментов.

От многолетних исследований к главному открытию

В конечном счете этот момент наступил. В исследовании Комптона применялась рентгеновская трубка, пучок излучения которой выделялся двумя диафрагмами и рассеивался на теле из легких атомов (в качестве мишени использовался графит, парафин и т.д.). После прохождения диафрагм рассеянное излучение попадало на кристалл рентгеновского спектрографа, а затем в ионизационную камеру или на фотопластинку. Это позволяло изучать спектральный состав такого излучения.

В 1922 г. Комптон обнаружил, что электрон частично поглощает порцию рентгеновского излучения, остальную же излучает в виде нового кванта с меньшей частотой, а значит — с увеличенной длиной волны излучения. Таков был эффект Комптона. Независимо от гипотезы П.Дебая*, Комптон не ограничился анализом своих опытов, но тут же приступил к разработке теории наблюдавшегося им эффекта.

Опираясь на законы сохранения энергии и импульса в системе электрон—фотон (термин *фотон* был введен в 1926 г. Г.Н.Льюисом), Комптон создал теорию явления, доказав его существование. Он обнаружил, что при столкновении фотона с электроном длина волны рассеянного излучения отличается от длины волны падающего на возросшую величину $\Delta\lambda = 2\lambda_k \sin^2\beta/2$. Постоянная λ_k стала называться комптоновской длиной. Причем, его же опыты подтвердили полученную формулу.

В полученных выводах, опубликованных в 1923 г., Комптон выдвинул предположение, что в результате рассеяния рентгеновских лучей электроны, на которых происходило это рассеяние, вылетают из атома с большой скоростью. Эти *электроны отдачи*, как их называл Комптон, были обнаружены и экспериментально проверены позднее в том же году Ч.Т.Р.Вильсоном, чье изобретение конденсационной камеры еще в 1912 г. позволило наблюдать треки заряженных частиц.

Результаты Комптона вызвали оживление среди его коллег, однако предложенная им квантовая

интерпретация была принята не сразу, ибо она противоречила ранним выводам Томсона. Против теории Комптона возражал и его соотечественник У.Дуэн, который полагал, что полученные данные могли быть обусловлены иными эффектами. И лишь после новых экспериментов Комптона и самого Дуэна последний отказался от своих возражений, убедившись, что его измерения согласуются с теорией Комптона.

Вспоминая эти события, Комптон заметит: *Ясно, что рассеиваемые таким образом рентгеновские лучи распространяются непосредственно в виде квантов энергии излучения; другими словами, они ведут себя как фотонные частицы. Проверка связи между углами вылета электрона отдачи и вторичного кванта излучения — это решающая проверка выполнения законов сохранения энергии и импульса применительно к процессу рассеяния фотонов на электронах* [3, с.404].

В 1922 г. Комптон показал, что рентгеновские лучи могут полностью отражаться от гладких поверхностей (от стекла или металла), что означало: рентгеновские лучи ведут себя так же, как свет. В 1925 г., применив дифракционную решетку, позволившую делить рассеянные рентгеновские лучи по компонентам, он получил тот же результат. Таким образом, его исследования заложили основы изучения рентгеновских лучей как раздела оптики, и уже за это Комптон приобрел репутацию выдающегося исследователя.

Квантовая гипотеза побудила ученых проверить ее возможности при объяснении явлений, имевших ранее волновое толкование. Оказалось, что с квантовых позиций можно объяснить законы Стефана—Больцмана, смещения Вина и излучения Планка, а также эффект Доплера. Более того, и уравнения Максвелла допускают решения, вполне согласующиеся с корпускулярной точкой зрения, с ее позиций удалось интерпретировать даже дифракцию на бесконечной отражающей линейной решетке.

Эйнштейн, выдвинувший гипотезу о существовании квантов света, был крайне заинтересован в ее подтверждении. В опубликованной в апреле 1924 г. статье «Эксперимент Комптона» им был сделан следующий важный как для науки, так и для него лично вывод: *...Положительный результат опыта Комптона показывает, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из дискретных корпускул, не только в смысле передачи энергии, но и в смысле передачи количества движения* [2, с.467].

Однако Н.Бор, посетивший в 1923 г. лабораторию Комптона в США и поверивший в его эксперимент, теорию самого эффекта не принял из-за несогласия с представлениями о квантах света. Отдававший предпочтение волновым свойствам и верящий в строгое применение законов сохранения лишь в макромире, он продолжал считать саму идею фотонов противоречащей реальности, о чем

* Петер Дебай — нидерландский физик и химик, занимался квантовой теорией твердого тела. Раньше Комптона объяснил обнаруженный им эффект. Лауреат Нобелевской премии по химии за 1936 г.

уведомил в статье «Квантовая теория излучения» (1924), написанной им совместно с Х.А.Краммерсом и Дж.К.Слэтером.

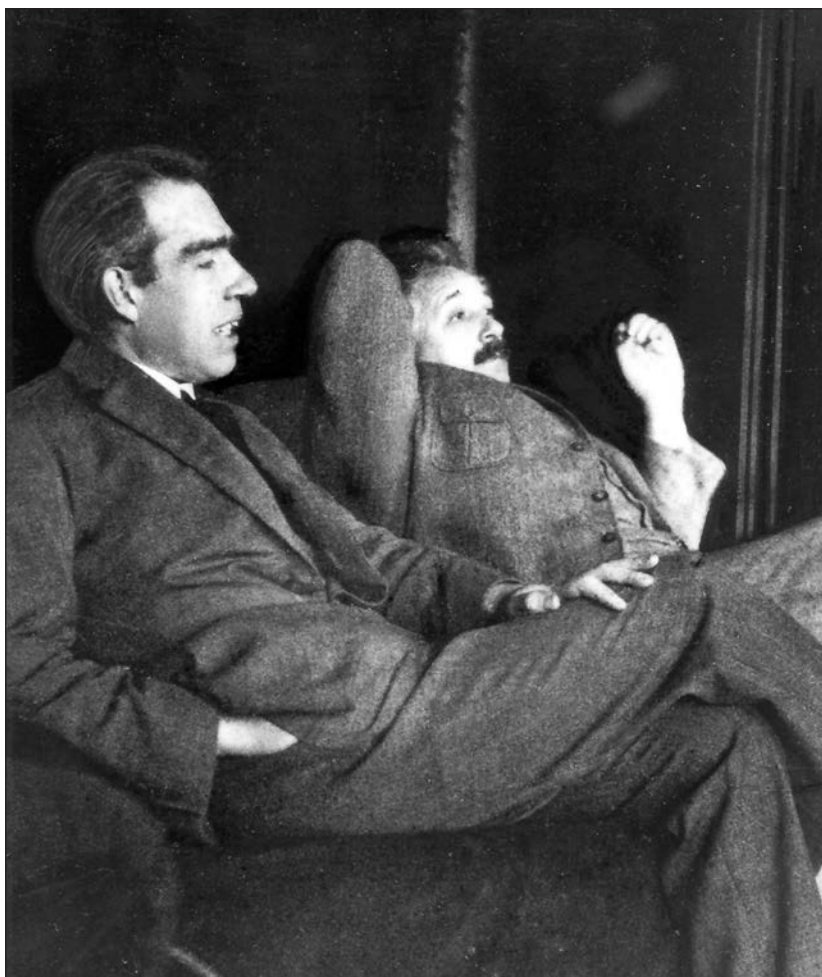
Но последующие эксперименты А.Комптона и А.Саймона с применением камеры Вильсона, а затем В.Боте и Х.Гейгера в 1925 г. вновь подтвердили действие законов сохранения энергии и импульса в элементарном атомном акте, что, по Бору, *соответствует квантовой теории эффекта Комптона* [4, с.559]. В итоге он согласился с ним, а значит и с признанием реальности и волн, и частиц. Свидетельством тому стал принцип дополнительности Бора, провозглашенный им в 1927 г.

Учеными проводились опыты по проверке эффекта: изучение энергии освобожденного электрона; анализ углов, под которыми расходятся пути рассеяния электрона и фотона; одновременность появления электрона отдачи и рассеянного фотона и т.д. Сам Комpton в 1924 г. продолжил наблюдение эффекта для новых веществ, используя камеру Вильсона в магнитном поле. Д.В.Скобельцын проверил формулу для электронов отдачи, а М.де Бройль подтвердил наличие эффекта для меди и алюминия.

Свои результаты Комpton опубликовал в 1923 г. и в том же году стал профессором Чикагского университета. Как преемник Милликена, он преподавал и вел поиски доказательств реальности фотонов. Изучал учений и явление полного внутреннего отражения рентгеновского излучения, наблюдая рентгеновские спектры с помощью искусственной дифракционной решетки, и в итоге представил для всех весьма ясную квантовую теорию дифракции рентгеновских лучей.

По замечанию С.Р.Филоновича, *открытие Комптона — не результат мгновенного озарения, а почти неизбежное следствие выполнения многолетней исследовательской программы. Ученый переходит от убежденности в справедливости классической теории и попыток объяснения данных опыта с помощью особого распределения электронов в атомах через гипотезу о новом виде люминесценции к выдвиганию и последующей защите квантовой теории рассеяния* [5, с.419].

Комpton уточнил также значения числа Авогадро и заряда электрона, ранее определенного Мил-



Н.Бор (до 1924 г. отвергавший представление о свете как потоке частиц) и А.Эйнштейн (предложивший в 1905 г. гипотезу квантов света — фотонов) в доме П.Эренфеста в Лейдене. 11 декабря 1925 г.

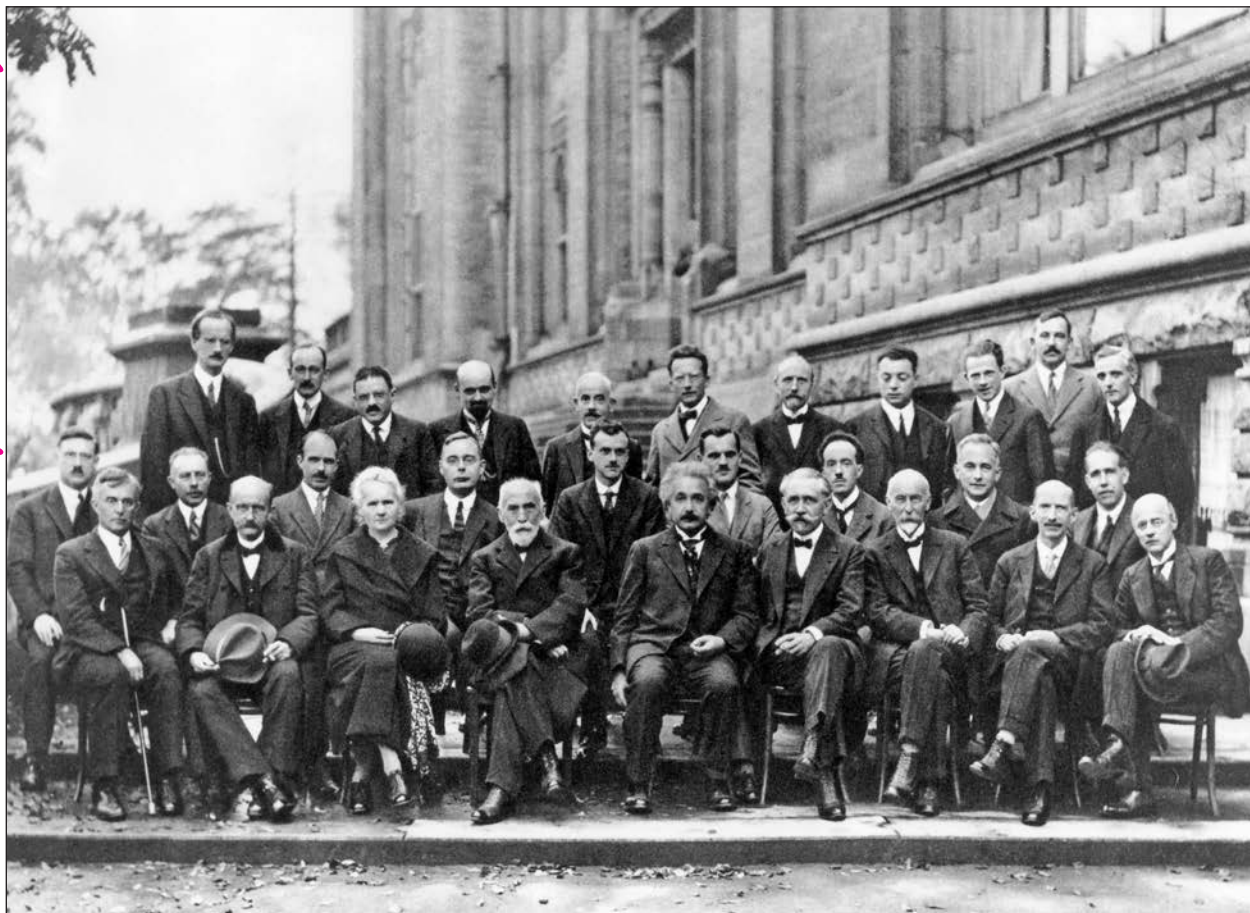
Фото П.Эренфеста

ликеном. Таким образом, после опубликования в 1916 г. результатов Милликена и выполненного в 1922 г. эксперимента Комптона для мирового сообщества физиков стала в целом очевидной необходимость признания квантовой теории света.

Признание заслуг Комптона

В 1927 г. Комpton еще не догадывался о возможном присуждении ему Нобелевской премии. 24–29 октября состоялся Пятый Сольвеевский конгресс по теме «Электроны и фотоны», которая была для физиков того времени одной из актуальных и к тому же нелегких научных проблем.

Начался конгресс с докладов У.Л.Брэгга об отражении рентгеновских лучей и А.Комптона о расхождении эксперимента с теорией электромагнитного излучения (с дополнениями выступила М.Склодовская-Кюри). За ними последовал доклад Л.де Бройля «Новая динамика квантов», а так-



А.Комптон (во втором ряду шестой слева) на 5-м Сольвеевском конгрессе в 1927 г.

Фото Б.Коупри

же сообщения М.Борна, В.Гейзенберга и Э.Шрёдингера об успехах и сохранившихся трудностях в формулировке квантовой теории.

Все эти годы Комптон не только проводил свои экспериментальные исследования, успешно законченные им с выдающимся результатом, но и активно знакомил с ними как американских коллег, так и зарубежных, отстаивая добытую им научную истину в присущей ему энергичной и острой манере. Университеты США, Канады (Торонто), Италии (Комо), Бельгии (Брюссель) — таковы места, где он просвещал публику, убеждая ее в том, что фотоны так же реальны, как волны света.

В изучении квантовых свойств рентгеновских лучей Комптон ни разу не упомянул работы Эйнштейна, в то время как тот, признав его опыты, уже в 1923 г. среди 10 номинантов на Нобелевскую премию назвал и Комптона. Свои рекомендации по его кандидатуре Эйнштейн предложил затем в 1925 г. и наконец 27 сентября 1927 г. в краткой записке с формулировкой: *...за открытие эффекта Комптона, названного в его честь, который является важной вехой на пути к познанию природы излучения* [6, с.485].

В 1927 г. Комптон был удостоен Нобелевской премии «За открытие эффекта, названного его именем». Он разделил ее с английским физиком Вильсоном, который получил ее «За метод визуального обнаружения траекторий электрически заряженных частиц с помощью конденсации пара». Тем самым Вильсон вновь экспериментально подтвердил как результаты исследований П.М.Блэккетта, И.Жолио-Кюри, Л.Майтнер, Д.В.Скобельцына и др., так и, в очередной раз, работ Комптона с его сотрудниками. В своей нобелевской лекции «Рентгеновские лучи как раздел оптики» Комптон в итоге подчеркнет: *Таким образом, изучая рентгеновские лучи как оптическое явление, мы нашли, что им свойственны все отличительные характеристики света. В то же время мы обнаружили, что их также необходимо считать направленным потоком квантов. Эти изменения законов оптики в случае их применения к рентгеновским лучам в большой степени привели к недавнему пересмотру теории строения атома и радиации* [7, с.443-444].

Признание мировым сообществом физиков эффекта Комптона стало важным стимулом для дальнейшего развития квантовой механики и ус-

пешного математического толкования квантовой теории в целом. По его патристическому высказыванию, проделанные им и его коллегами опыты *были первыми экспериментами, которые дали, по крайней мере, физикам в Соединенных Штатах, уверенность в фундаментальной справедливости квантовой теории* [3, с.404]. В 1927 г. ученого избрали в члены Национальной академии наук США

Став третьим в США нобелевским лауреатом по физике, Комптон оставался осторожным в толковании добытого им результата. Тем не менее, ведущие физики В.Паули, П.Эренфест, Х.А.Лоренц и др. положительно воспринимали значение эффекта Комптона для науки и активно применяли его в решении своих научных задач. Согласимся с М.Джеммером в том, что *для утверждения квантовых воззрений на излучение Комптон сделал не меньше, чем сто лет назад Френель для утверждения классической волновой теории света* [1, с.160].

Как видим, и фотоэффект, и эффект Комптона — это типично квантовые явления, не допускающие классической трактовки и потому очень скоро нашедшие самое широкое применение в квантовой физике. Сегодня понятие *комптоновская длина* применяется к протону, нейтрону и другим элементарным частицам. В таких случаях в выражение для длины волны Комптона ($\lambda_k = h/m_e c = 3.86 \times 10^{-11}$ см), называемой сегодня *приведенной комптоновской длиной для электрона*, взамен его массы нам следует поставить массу соответствующей элементарной частицы.

Открыть эффект квантового рассеяния Комптону позволили следующие причины. Он искусно владел методикой эксперимента с рентгеновскими лучами. Разбирался в теории и удачно ее создал. Был знаком с квантовой теорией излучения и теплоемкости. И, что не менее важно в науке, обладал редкой независимостью мышления и той гибкостью ума, которая позволила ему отказываться от собственных ошибочных гипотез и предубеждений с большей легкостью, чем это делали не менее известные физики [5].

Открытие эффекта Комптона повлияло на его дальнейшее опытное и теоретическое обоснование, на изучение уже иных явлений. Последнее связано с именем индийского физика Ч.В.Рамана.

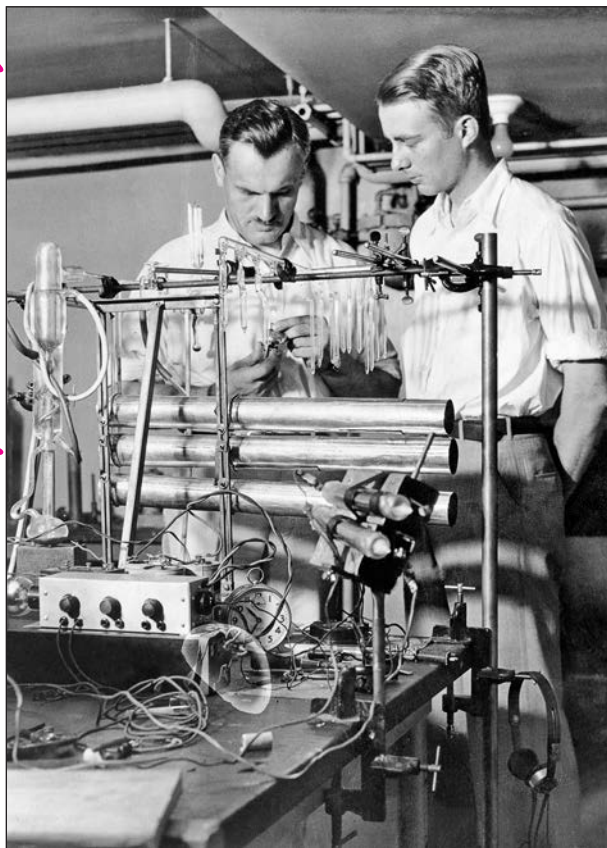


А.Комптон, В.Гейзенберг, П.А.М.Дирак, Р.Милликен, Ф.Хунд и др. Чикаго, 1929 г.
Фото Г.Ф.Хунд

Он вначале сомневался в истинности комптон-эффекта, но по мере проведения исследований по комбинационному рассеянию пришел к выводу, высказанному им при получении Нобелевской премии в 1930 г.: изучаемое им явление *фактически есть аналог эффекта Комптона* [7, с.494].

В осмыслении эффекта Комптона приняли участие и другие ученые. Его квантовую теорию предложил в 1926 г. П.А.М.Дирак (в СССР о ней узнали в 1927 г. из переведенной на русский язык его книги «Основания новой квантовой механики»). Свое толкование на основе волновой механики в 1927 г. дал Э.Шрёдингер [8], а в 1928 г. О.Клейн и У.Нишина вывели формулу комптоновского рассеяния фотонов свободными электронами. Эта формула вскоре была подтверждена на опытах. Строгий вывод был получен в 1930 г. и И.Е.Таммом [9].

По большому счету заслуга Комптона перед наукой видится в том, что его исследования по обнаружению квантов рентгеновских лучей привели в конечном счете к признанию мировым сообществом ученых корпускулярно-волнового дуализма излучения. Тогда же де Бройль предложил гипотезу о корпускулярно-волновом дуализме для веще-



А.Комптон в 1933 г. вместе с молодым Л.У.Альваресом, с которым он работал по программе космических лучей в Чикагском университете. В 1968 г. Альварес был удостоен Нобелевской премии за открытие резонансов — короткоживущих нестабильных частиц.

ства. В итоге оба открытия обеспечили прорыв в понимании квантового мира.

В дальнейшем поиски Комптона были направлены на исследования распределения электронов в атомах. Эта работа, вместе с исследованием К.Сигбана по измерению энергии рентгеновских лучей, легла в основу теорий строения атома. Комптон изучал явление полного внутреннего отражения рентгеновских лучей и усовершенствовал метод измерения их длины волны, внес вклад в понимание магнитных свойств ферромагнитных материалов, и прежде всего железа.

Спор о природе космических лучей

Взаимосвязь гамма-лучей и электронов в космических лучах — пример действия эффекта Комптона. Поэтому ученый, догадываясь об этом и опираясь на выводы Дж.Клея об изменении интенсивности космических лучей в зависимости от географической широты (полученные им в 1927 г.), заинтересовался ими. Кстати, в те же 1922–1928 гг. решением этой проблемы занялся Милликен. Его ошибоч-

ный вывод, что космическое излучение состоит из фотонов, породил дискуссию с Комптоном, заметившим, что, согласно экспериментам, часть излучения состоит из заряженных частиц, поэтому они будут отклоняться в магнитном поле Земли так, что интенсивность на полюсах окажется больше, чем на экваторе. Этот широтный эффект Комптон наблюдал в 1931–1932 гг. в ходе проведения масштабных экспедиций в десятках разных мест земного шара.

Итак, Комптон независимо от Клея обнаружил широтный эффект космических лучей и наличие в них заряженных частичек. Позднее он еще раз уточнил: *Мы нашли, что космические лучи идут к нам далеко из-за пределов земной атмосферы и на больших высотах они обладают у магнитных полюсов во много раз большей интенсивностью, чем около экватора. Это вселяет уверенность в том, что они состоят главным образом из электрически заряженных частиц* [10, с.567].

После этого Милликен с сотрудниками в 1933 г. провел измерения на самолетах и согласился с тем, что широтный эффект реально существует и, следовательно, определенная часть космического излучения имеет корпускулярную природу. Таким образом, длившаяся несколько лет дискуссия двух Нобелевских лауреатов закончилась победой 44-летнего Комптона и поражением 68-летнего Милликена, ставшего в этот раз пленником зависимости восприятия своего прежнего опыта.

По словам И.В.Дорман, когда в 1936 г. Комптон хотел продолжить дискуссию, Милликен предостерег его против этого, справедливо считая, что «публика... будет наблюдать за ней, как за собачьей схваткой между двумя нобелевскими лауреатами, а это никому не поможет». С этим соображением Комптон, конечно, не мог не согласиться. В присутствии свидетелей Милликен и Комптон пожали друг другу руки и возобновили прерванные на длительное время личные отношения [11, с.126].

Комптон высоко ценил Милликена, но в докладе, прочитанном им 1 января 1936 г. на объединенной сессии Американского физического общества и секции «В» Американской ассоциации для содействия успехам науки, он заметил, что *соблазнительное предположение Милликена о связи возникновения космических лучей с происхождением Вселенной оказалось эффективным по стимулированию громадного количества исследований и оставило широко распространенную надежду на то, что, если мы узнаем, как возникают космические лучи, мы сможем прочитывать в этом древнюю историю нашей вселенной* [10, с.567]. В том же докладе он подчеркнул: *Наш анализ состава космических лучей продвигается вперед. Их космическое место происхождения, хотя, возможно, и не установлено, тем не менее кажется теперь более определенным, чем раньше* [10, с.583].

Изучение эффекта Комптона в России

В России эффект Комптона стали изучать сразу же после его открытия. В 1923 г. этим занялся Скобельцын. Вот что он пишет в своих воспоминаниях: *Я начал изучение гамма-излучения (а затем и космического излучения) в конце 1923 г. ...под влиянием выдающегося открытия того времени — открытия эффекта Комптона и в результате удачной моей идеи — исследовать электроны отдачи гамма-излучения в камере Вильсона* [12, с.12].

Для выявления закономерностей при рассеянии жестких гамма-лучей и количественного изучения эффекта и космических лучей Скобельцын поместил камеру Вильсона в магнитное поле. Он изучал угловое распределение электронов отдачи, проведя проверку наличия импульса у фотона; восстановил корпускулярную картину взаимодействия кванта и электрона как упругое столкновение релятивистских частиц.

Десятилетием ранее, с 1907 по 1913 г., исследованиями фотоэффекта занимался А.Ф.Иоффе. Эти исследования, составившие содержание его магистерской диссертации, примечательны точными измерениями заряда электрона и экспериментальным доказательством квантовой природы фотоэффекта. Работы Иоффе и Скобельцына и его учеников совпали с работами американских физиков Милликена и Комптона.

В 1936 г., когда уже не оставалось сомнений в результатах Комптона, подтвердивших выполнение законов сохранения энергии и импульса в микромире, его сотрудник Р.Шенкланд провел эксперименты, якобы опровергавшие эти выводы. В том же году А.И.Алиханов, А.И.Алиханьян и Л.А.Арцимович поставили эксперимент по доказательству справедливости этих законов при аннигиляции электрона и позитрона, в очередной раз подтвердив правоту Комптона.

В среде советских физиков обсуждение значения эффекта Комптона для дальнейшего развития квантовой оптики началось сразу же после его открытия и продолжалось до 1936 г., когда прошла сессия Академии наук СССР, посвященная отчету ведущих физических институтов страны. В разное время в дискуссиях участвовали Д.А.Рожанский, Я.И.Френкель, А.Ф.Иоффе, С.И.Вавилов, Д.В.Скобельцын и др., итог им подвел Э.В.Шпольский в своей статье «Экспериментальная проверка фотонной теории рассеяния» [13].

Посетив в 1926–1927 гг. США, Иоффе познакомился с физика-

ми. Среди них, по его словам, *...интереснее других был, пожалуй, Артур Комптон, нобелевский лауреат. Но наши беседы почему-то носили характер загадок на научные темы. Помнится, сильно сказывались у него религиозные мотивы* [14, с.92]. Состоявшийся диспут между ними был длительным и со стороны Комптона весьма и весьма активным.

Комптон придерживался протестантской веры, влиявшей на характер его поведения. Целых 15 лет он возглавлял миссионерское движение, участвовал в работе Национальной конференции христиан и иудеев. Это не мешало ему беспристрастно заниматься научной деятельностью.

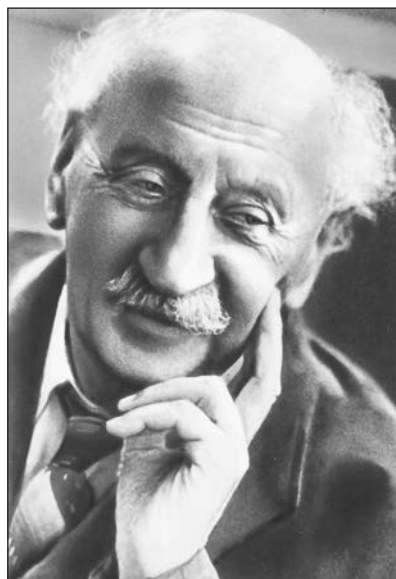
Военные годы нобелевского лауреата

С 1941 г. Комптон стал деканом отделения физических наук Чикагского университета. Тогда же, вопреки прежней научной тематике Комптона, ему, как известному ученому, и его группе поручили подготовить для президента Рузвельта объективный и доступный для понимания обзор по атомной проблеме, убеждающий в ее актуальности.

Затем Комптона избрали главой комитета Национальной академии наук для изучения условий применения атомной энергии. В 1942 г. он возглавил Металлургическую лабораторию, в нее он ввел известных ученых: Э.Лоуренса, Э.Ферми, Р.Оппенгеймера, Дж.Уилера и проявившую себя молодежь. С ними он занялся созданием первого в мире ядерного реактора, запущенного Ферми 2 декабря 1942 г.

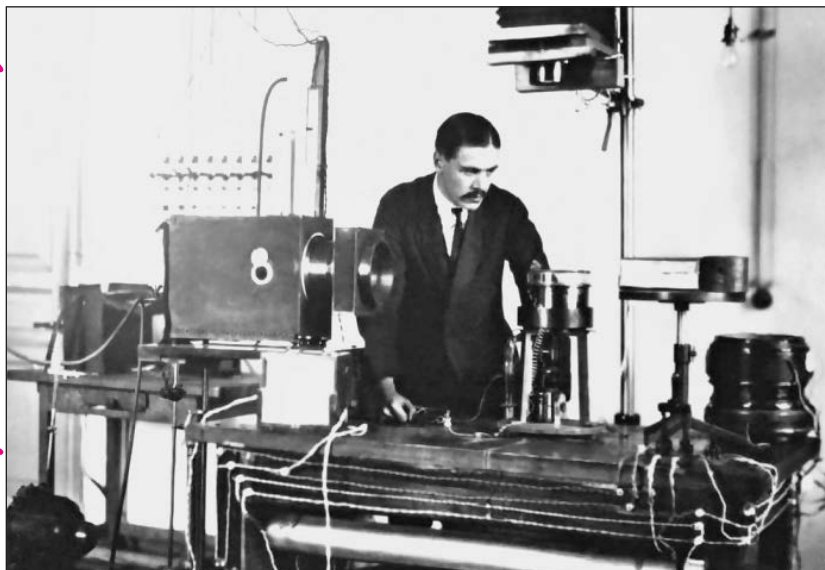
Здесь проявил себя талант Комптона проверять компетентность в решении атомной проблемы у сотрудников, убеждать их, столь разных по взглядам на ее исследование, в необходимости решать поставленную им задачу так, как он считал целесообразным. Так, пригласив к себе в группу Ферми и выслушав его соображения о критической массе для цепной реакции, Комптон не поленился на своих расчетах проверить выводы итальянского ученого и убедиться в их истинности [15, с.92].

Но и после 1945 г. он не смог расстаться с атомной тематикой. При военном министерстве США был организован Временный комитет для рекомендаций правительству по атомной проблеме. При нем создана комиссия экспертов из ученых, в которую вошли те же Комптон, Лоуренс, Оппенгеймер и Ферми. Но не они решали вопрос о применении атомного оружия и о последую-

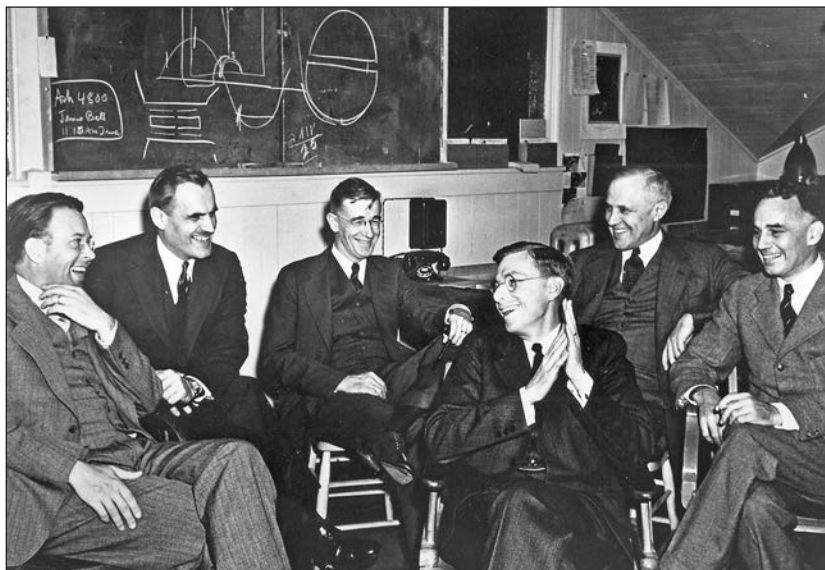


А.Ф.Иоффе, который в 1913 г. провел работы по измерению заряда электрона.

Фото из архива «Природы»



Д.В.Скобельцын возле установки для исследования комптон-эффекта в 1924 г.
Фото из архива Физического института имени П.Н.Лебедева РАН.



Лидеры проекта S-1, обсуждающие возможность сооружения циклотрона в Беркли. 29 марта 1940 г. Слева направо: Э.О.Лоуренс, А.Комптон, В.Буш — советник по науке при президенте Ф.Д.Рузвельте, Дж.Б.Констант, К.Комптон и А.Лумис.
Фото из архива Министерства энергетики США

щей трагедии судьбы Хиросимы и Нагасаки. На тот момент такова была воля Пентагона. Со времени организации Манхэттенского проекта Комптон руководил строительством Национальной лаборатории Ок-Ридж. Подобно большинству ученых, решавших для себя моральную проблему — использовать или нет (против были Дж.Франк, Г.Сиборг, Л.Сциллард и др.) атомную бомбу в военных целях, Комптон, как и Оппенгеймер, Лоуренс и Ферми, рекомендовал применить ее против Японии.

А.Комптон, Р.Милликен и Б.Росси), а в 1934 г. — на Международной конференции в Лондоне (в ядерной секции) и т.д.

При жизни Комптона вышли его книги: «Рентгеновские лучи и электроны» (1926); «Рентгенов-

Наступившие мирные времена изменяют психологию и поведение многих ученых относительно атомного оружия при решении проблем устройства мира. В 1955 г. под Майнауским заявлением* лауреатов Нобелевской премии среди 52 подписавших его будет стоять и подпись Комптона.

Будни мирного времени

С окончанием войны Комптон организовал в Чикагском университете институты ядерной физики, радиобиологии и изучения металлов. 53-летнему ученому было предложено возглавить Университет Вашингтона в Сент-Луисе (штат Миссури). Это означало прекращение собственных исследований, с чем Комптон смирился. Его решение было обусловлено и многолетними нагрузками в науке.

Проявив себя ранее прекрасным организатором, он согласился занять эту должность. Лишь в 1954 г. Комптон уйдет с поста канцлера университета, но останется в нем до 1961 г. почетным профессором физики, преподавание которого всегда ценилось высоко. Одновременно он работал в Вустерском колледже и Калифорнийском университете.

Комптон активно участвовал в научной жизни как в США, так и за рубежом: на Сольевском конгрессе в 1927 г., на конференции в Комо (где Бор провозгласил принцип дополнительности), на Международном конгрессе по ядерной физике в Риме в 1931 г. (там обсуждалась и физика космических лучей, поэтому на нем присутствовали

* Майнау — «Остров цветов» — третий по величине остров в акватории Боденского озера в Германии. В 1955 г. по инициативе О.Хана стал местом подписания декларации, предупреждающей об опасности применения и распространения ядерного оружия.

ские лучи, теория и эксперимент» (1935) в соавторстве с С.К.Аллисоном; «Значение науки для человека» (1940); «Рождение атомной энергии и ее гуманитарное значение» (1949); «Поиски атомной энергии» (1956). В 1973 г., уже после смерти Комптона, были изданы его «Научные статьи. X-лучи и другие исследования».

По общему признанию научная и инженерная деятельность в США во многом обязана компетентным и весьма полезным консультациям Комптона как организатора целого ряда научных и инженерных исследовательских лабораторий и самой деятельности нескольких комитетов науки.

Итоги минувших дней

Научные достижения Комптона были отмечены не только Нобелевской премией. В знак признания его заслуг в оптике и квантовой механике ему были присуждены: премия Румфорда Американской академии искусств и наук (1927), медаль Радиологического общества Северной Америки (1928), медаль Маттеуччи итальянской Национальной академии наук (1930), медаль и премия Гутри британского Института физики (1935), медаль Хьюза Лондонского королевского общества (1940), медаль Франклина американского Института Франклина (1940), премия памяти Рихтмайера Американской ассоциации учителей физики (1941), Вашингтонская премия (1945) и другие награды академий наук мира. В 1946–1948 гг. Комптон был членом Комиссии по высшему образованию при президенте США.

В наше время под понятием «эффект Комптона» понимают упругое рассеяние электромагнитного излучения на свободных (или слабосвязанных) электронах, сопровождающееся увеличением длины волны; наблюдается при рассеянии излучения малых длин волн — рентгеновского и γ -излучений. В комптон-эффекте впервые во всей полноте проявились корпускулярно-волновые свойства электромагнитного излучения [16, с.306].

После войны Комптон прожил 17 мирных лет. В течение девяти из них он управлял Университетом Вашингтона, затем продолжил преподавать в качестве почетного профессора, написал последнюю книгу о пережитых им событиях в атомной науке и даже успел издать ее. Обласканный мировой наукой и американским обществом, ученый умиротворенно наслаждался семейной жизнью, благополучием детей и родственников.

Впрочем, и старшие члены семьи Артура, за исключением сестры Мэри, в своей жизни добились немало. Его старший брат Карл Тейлор (1887–1954) стал крупным физиком, специалистом по кристаллам, рентгеноструктурному анализу и фотоэффекту. Средний, Уилсон Мартиндейл (1890–1967), был известен в экономике. Все три брата с успехом возглавляли американские вузы.

Всю свою жизнь Комптон имел крепкое здоровье и силу разума — черты, особо ценимые в экспериментальной деятельности. Он обладал уникальной способностью увлекать наукой коллег и учеников. Ученый скончался 15 марта 1962 г. (на 70-м году жизни) от кровоизлияния в мозг в г.Беркли (штат Калифорния). ■

Литература / Reference

1. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М., 1985. [*Jammer M. The conceptual development of quantum mechanics. Moscow, 1985. (In Russ.)*.]
2. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т.III. М., 1966. [*Einstein A. Collection of scientific works. V.III. Moscow, 1966. (In Russ.)*.]
3. Комптон А. Рассеяние рентгеновских лучей как частиц. Эйнштейновский сборник. 1986–1990. М., 1990; 398–404. [*Compton A. Dispersion of X-rays as particles. Einstein Book. 1986–1990. Moscow, 1990; 398–404. (In Russ.)*.]
4. Бор Н. Избранные научные труды. Т.I. М., 1970. [*Bohr N. The selected scientific works. V.I. Moscow, 1970. (In Russ.)*.]
5. Филонович С.П. Артур Комптон и его открытие (Развернутый комментарий к воспоминаниям А.Комптона). Эйнштейновский сборник. 1986–1990. М., 1990; 405–422. [*Filonovich S.P. Arthur Compton and his opening (The detailed comment to A.Compton's memoirs). Einstein Book. 1986–1990. Moscow, 1990; 405–422. (In Russ.)*.]
6. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М., 1989. [*Pais A. The Science and the Life of Albert Einstein. Moscow, 1989. (In Russ.)*.]
7. Комптон А.Х. Рентгеновские лучи как раздел оптики. Лауреаты Нобелевской премии по физике: Биографии, лекции, выступления. Т.1: 1901–1950. СПб., 2005; 430–444. [*Compton A.H. X-rays as section of Optics. Nobel Prize laureates on Physics: Biographies, lectures, performances. V.1: 1901–1950. St. Petersburg, 2005; 430–444. (In Russ.)*.]
8. Шрёдингер Э. О комптон-эффекте. Избранные труды по квантовой механике. М., 1976; 139–144. [*Schrödinger A. On Compton effect. The selected works on Quantum Mechanics. Moscow, 1976; 139–144. (In Russ.)*.]
9. Тамм И.Е. Собрание научных трудов в двух томах. Т.II. М., 1976; 24–45. [*Tamm I.E. Collection of scientific works in two volumes. V.II. Moscow, 1976; 24–45. (In Russ.)*.]

- Времена и люди*
10. Комpton А.Х. Новейшие исследования космических лучей. Успехи физических наук. 1936; 16(5): 566–585. [Compton A. The newest researches of Space beams. Physics — Uspekhi. 1936; 16(5): 566–585. (In Russ.)]
 11. Дорман И.В. К истории дискуссии о природе космических лучей. Роль дискуссий в развитии естествознания. М., 1986; 120–128. [Dorman I.V. To history of a discussion about the nature of Space beams. Role of discussions in development of natural sciences. Moscow, 1986; 120–128. (In Russ.)]
 12. Скобельцын Д.В. Ранняя стадия изучения частиц космического излучения. 50 лет современной ядерной физики: Сборник статей. М., 1982; 12–18. [Skobeltsyn D.V. Early stage of studying of particles of Space radiation. 50 years of modern Nuclear Physics: Collection of articles. Moscow, 1982; 12–18. (In Russ.)]
 13. Штольский Э.В. Экспериментальная проверка фотонной теории рассеяния. Успехи физических наук. 1936; 16(4): 458–466. [Shpolsky E.V. Experimental verification of the photon theory of dispersion. Physics — Uspekhi. 1936; 16(4): 458–466. (In Russ.)]
 14. Иоффе А.Ф. Встречи с физиками. Мои воспоминания о зарубежных физиках. Л., 1983. [Ioffe A.F. Meetings with physics. My memories of foreign physics. Leningrad, 1983. (In Russ.)]
 15. Ферми Э. Научные труды. Т. II. М., 1972. [Fermi E. Scientific works. V. II. Moscow, 1972. (In Russ.)]
 16. Павлов В.П. Комптона эффект. Физический энциклопедический словарь. М., 1983; 306–307. [Pavlov V.P. Compton effect. Physical encyclopedic dictionary. Moscow, 1983; 306–307. (In Russ.)]

Arthur Compton — the master of a thin and exact experiment

R.N.Shcherbakhov
Tallinn, Estonia

The American physicist Artur Compton (1892-1962) found and gave theoretical reasons to effect of change of wavelength of X-ray radiation owing to dispersion by its electrons of substance that became the proof of existence of photons. For this opening the scientist has been awarded Nobel Prize (1927). He conducted researches of cosmic rays. During the World War II he worked on creation of an A-bomb. After the end of war he has organized Institutes of Nuclear Physics, Radiobiology and Studying of metals at the Chicago University, and then within 9 years headed University of Washington.

Key words: History of Science, X-rays, Quantum Physics, photon, Nobel Prize, cosmic rays, Compton effect.

ПРИРОДА

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Научные редакторы
М.Б.БУРЗИН

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Т.С.КЛЮВИТКИНА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

Перевод содержания
А.О.ЯКИМЕНКО

М.Е.ХАЛИЗЕВА

О.И.ШУТОВА

А.О.ЯКИМЕНКО

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук

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

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

Подписано в печать 30.08.2017

Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная. Цифровая печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 278 экз. Заказ 1433
Цена свободная

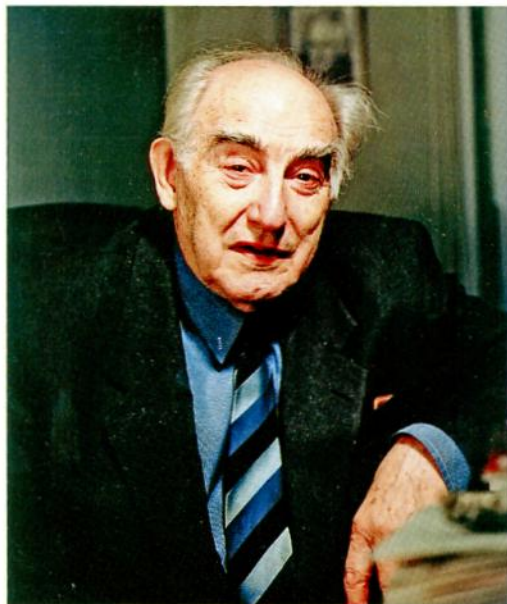
Отпечатано ФГУП «Издательство «Наука»,
(типография «Наука»)
121099, Москва, Шубинский пер., 6

© Российская академия наук, журнал «Природа», 2017

© ФГУП «Издательство «Наука», 2017

© Составление. Редколлегия журнала «Природа», 2017

в следующем номере



Сто лет со дня рождения академика В.Л.Гинзбурга исполнилось год назад. Но Виталий Лазаревич, будучи человеком с ярким чувством юмора, юбилей своего знаменитого семинара отмечал приблизительно. Вот и мы отметим «околостолетие» нашего выдающегося современника — ученого-энциклопедиста, внесшего весомый вклад во многие разделы физической теории, заметного общественного деятеля, пламенного борца с лженаукой. Тем более что В.Л., как его называли сотрудники родного Теоротдела ФИАН, дал нам особый повод вспоминать себя не только в связи с юбилейными датами. Еще в 1971 г. Гинзбург опубликовал в журнале «Успехи физических наук» свой первый список наиболее актуальных для физики и астрофизики проблем. По его замыслу это была не только путеводная нить для исследователей, ведущая к тому, чем важнее всего заниматься, но и своего рода «физминимум», представление о котором должны иметь все физики. Список не был чем-то канонически незыблемым, он затем не раз пересматривался, дополнялся с учетом новых научных достижений и открывающихся вопросов (вырос с 17 пунктов до 30), — последняя его публичная версия зафиксирована в нобелевской лекции В.Л. 2003 года. Интересно взглянуть на отдельные пункты Списка с точки зрения сегодняшнего дня.

ФИЗИКА НА ЛЮБОЙ РАЗМЕР

Посвящается 101-й годовщине со дня рождения В.Л.Гинзбурга

