

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

11 16



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.Куниин** (**E. Koonin**, США), академик, доктор геологоминералогических наук **Н.П.Лаверов**, доктор геолого-минералогических наук **А.Ю.Ленин**, член-корреспондент, доктор биологических наук **В.В.Малахов**, профессор **Ш.Миталипов** (**Sh. Mitalipov**, США), доктор сельскохозяйственных наук **Ю.В.Плугатарь**, доктор физико-математических наук **М.В.Родкин**, академик, доктор биологических наук **Л.В.Розенштраух**, 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 физико-математических наук **Л.Д.Фаддеев**, академик, доктор биологических наук **М.А.Федонкин**, академик, доктор физико-математических наук **А.Р.Хохлов**, академик, доктор физико-математических наук **А.М.Черепашук**, академик, доктор физико-математических наук **Ф.Л.Черноусько**, член-корреспондент, доктор химических наук **В.П.Шибяев**, **О.И.Шутова**, кандидат биологических наук **А.О.Якименко**, доктор геолого-минералогических наук **А.А.Ярошевский**

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Кумулятивная струя, выбрасываемая с поверхности жидкости вторичную каплю после падения первичной.
См. в номере: **Чашечкин Ю.Д.** *Капли: короны, всплески, звуки...*

Фото автора

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Сцифоидная медуза зурелия.
См. в номере: **Малахов В.В.**, **Богомолова Е.В.** *Новый взгляд на строение и происхождение полости тела многоклеточных.*

Фото А.А.Семенова



«Наука»

В НОМЕРЕ:**3 Капаччиоли М., Сажина О.С., Сажин М.В.****De rerum natura сегодня:
об открытии темной материи**

В современные представления об устройстве Вселенной прочно вошла темная материя, однако природа этой новой сущности до сих пор не разгадана. Как зародилось понятие «темная материя» и какой путь оно прошло в науке?

13 Чашечкин Ю.Д.**Капли: короны, всплески, звуки...**

Процесс падения капель в воду, последующие течения, волны и звуки, которые люди наблюдали веками, а изучали большие столетия, теперь исследуется на качественно новом уровне. В выигрыше — теоретическая и прикладная гидродинамика, акустика и практическая метеорология.

24 Генералова А.Н., Зубов В.П., Хайдуков Е.В.**Нанокристаллы с антистоксовой флуоресценцией на пути в медицину**

Нанокристаллы с антистоксовой фотолюминесценцией очень перспективны для использования в биоанализе, при оптической визуализации патологических тканей живого организма и терапии. Они возбуждаются светом в «окне прозрачности» биотканей, нетоксичны, обладают превосходной фото- и химической стабильностью.

33 Малахов В.В., Богомолова Е.В.**Новый взгляд на строение и происхождение полости тела многоклеточных**

Статья представляет собой первую часть публикации, посвященной природе и происхождению полости тела многоклеточных животных. В этой части обсуждается строение и функции полостей тела губок и кишечнополостных.

38 Гельфанд М.С.**Новости о древних людях**

Секвенирование и анализ новых геномов — как древних, так и современных — усложнили наши представления о предыстории человека.

44 Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М.**Тукуланы: песчаные пустыни Якутии**

Среди лесов Центральной Якутии, в долинах крупных сибирских рек лежат обширные поля белоснежных развееваемых песков, хорошо заметные даже из космоса. Это тукуланы — малоизученный природный феномен, реликты древней криопустыни. Как и в каких условиях образовались эти удивительные песчаные дюны?

Вести из экспедиций**56 Немировская И.А., Новигатский А.Н., Реджепова З.Ю.****Атлантика: обмен вещества на границе вода—воздух****Научные сообщения****64 Беляев Л.А., Глазунова О.Н., Капитонова М.А.****Новый Иерусалим в контексте культуры и истории Московской Руси****Времена и люди****68 Ермацанс И.А., Болотский И.Ю.****А.Н.Рябинин — первый в России исследователь динозавров****77 Конашев М.Б.****«Дорогой Михаил Михайлович!»
Письма советских генетиков И.М.Лернеру****88 Новости науки**

Сверхпроводящий вигглер с новой системой охлаждения (88). Обнаружена одна из самых далеких нейтронных звезд в нашей Галактике. Лутовников А.А. (88). Диффузионный спектрометр аэрозоля: особенности и применение. Валиулин С.В., Дубцов С.Н. (90). «Боспорские ворота» на Узунларском валу. Супренков А.А. (91).

93 Новые книги

CONTENTS:

3 Capaccioli M., Sazhina O.S., Sazhin M.V. **De rerum natura Today: about the Discovery of Dark Matter**

Dark matter is deeply embedded in modern cosmology, but its nature is still unsolved. How was the concept of dark matter originated and what path has it travelled in science?

13 Chashechkin Yu.D. **Drops: Crowns, Splashes, Sounds...**

The process of drop falling into the water and subsequent flows, waves and sounds, which people have observed for centuries and studied for over a hundred years, are now investigated at a qualitatively new level. Theoretical and applied hydrodynamics, acoustics and practical meteorology are the winners.

24 Generalova A.N., Zubov V.P., Khaydukov E.V. **Nanocrystals with Anti-Stokes Fluorescence on the Way to Medicine**

Nanocrystals with anti-Stokes photoluminescence are very promising for use in bioassay, optical imaging of pathological tissues of living organisms and in therapy. They are non-toxic, excited by the light from the «transparency window» of biological tissues, and have excellent photo- and chemical stability.

33 Malakhov V.V., Bogomolova E.V. **New Insight into the Structure and Origin of Metazoan Body Cavity**

It is the first part of the paper devoted to nature and origin of metazoan body cavity. The structure and functions of body cavities in sponges and coelenterates are discussed.

38 Gelfand M.S. **News about Ancient Humans**

Sequencing and analysis of new genomes – both ancient and modern ones – further complicated our understanding of human prehistory.

44 Galanin A.A., Pavlova M.R., Shaposhnikov G.I., Lytkin V.M. **Tukulans: Sandy Deserts of Yakutia**

Vast fields of snow-white drift sands that are easy to see even from space lay among the forests of Central Yakutia, in the valleys of large Siberian rivers. Tukulans are underexplored natural phenomenon, relics of ancient cryodesert. How and in what conditions did these wonderful sandy dunes form?

Notes from Expeditions

56 Nemirovskaya I.A., Novigatsky A.N., Redzhepova Z.Yu. **Atlantic: Substance Exchange at the Water–Air Interface**

Scientific Communications

64 Belyaev I.A., Glazunova O.N., Kapitonova M.A. **New Jerusalem in the Context of Moscovia Culture and History**

Times and People

68 Ermatsans I.A., Bolotsky I.Yu. **A.N.Riabinin – the First Russian Investigator of Dinosaurs**

77 Konashev M.B. **«Dear Mikhail Mikhailovich!» Letters of Soviet Geneticists to I.M.Lerner**

88 Science News Super Conducting Wiggler with New Cooling System (88). One of the Most Distant Neutron Stars of Our Galaxy Was Detected. **Lutovinov A.A.** (88). Diffusion Aerosol Spectrometer: Characteristics and Applications. **Valiulin S.V., Dubtsov S.N.** (90). «Bosporus Gate» at the Uzunlar Rampart. **Suprenkov A.A.** (91).

93 New Books

De rerum natura сегодня: об открытии темной материи

Даже если это и неправда, все равно отлично придумано.

Джордано Бруно. О героическом энтузиазме (1585)

М.Капаччиоли, О.С.Сажина, М.В.Сажин

Что такое темная материя в современной науке? Космолог ответит без колебаний: «Гипотетическая составляющая вещества, которая может быть выявлена только по своим гравитационным эффектам, потому что она не поглощает, не отражает и не излучает свет, и которая по своему количеству значительно превышает обычное вещество». На невероятную популярность темы указывает тот факт, что за последние 35 лет по всему миру головокружительно возросло число научных работ, в которых термин *dark matter* (DM) фигурирует даже в заголовке. Однако истинная природа этого нового «ингредиента» космического вещества и его свойства по-прежнему остаются загадочными, несмотря на все усилия исследователей. Под сомнением даже сам термин — хорошо ли он характеризует суть явления: скрывается ли за словами «темная материя» новая физика или это просто невидимая, «черная», частица?

Для разгадки тайны темной материи необходимо «встать на плечи гигантов», вспомнить труды великих ученых прошлого. В данном случае особенно важно понять мотивы, руководствуясь которыми, ученые, ступающие по лезвию бритвы Оккама, все-таки посчитали нужным ввести новую сущность. Другими словами, для движения вперед хорошо бы иметь перед глазами уже пройденный путь.

© Капаччиоли М., Сажина О.С., Сажин М.В., 2016



Массимо Капаччиоли, почетный профессор Университета Федерико II (Неаполь, Италия) и Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Был директором Астрономической обсерватории Каподимонте (Неаполь) и телескопа ESO VST, возглавлял Итальянское астрономическое сообщество. Специалист в области динамики и эволюции звездных систем, а также наблюдательной космологии, популяризатор науки.



Ольга Сергеевна Сажина, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Лауреат премии имени И.И.Шувалова II степени МГУ (2013). Область научных интересов — космология, теория струн.



Михаил Васильевич Сажин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник того же института. Иностраный член итальянской Академии науки, литературы и искусств; лауреат премии имени М.В.Ломоносова МГУ (2012). Занимается космологией, теорией относительности, астрометрией.

Ключевые слова: темная материя, космология, галактики, гравитационное линзирование.

Key words: dark matter, cosmology, galaxies, gravitational lensing.

Постановка задачи

Пожалуй, первым намеком на существование темной материи можно считать интуитивные представления Джордано Бруно о наличии «бесчисленных и бесконечных» космических тел — объектов, ускользнувших из универсальной системы Коперника. Обычные звезды, которых не видно, просто удалены от нас, а планеты невидимы, потому что слишком слабо светятся в отраженных лучах своих светил. Однако ни большие и малые планеты, ни облака пыли, ни погасшие звезды не обнаруживают сколько-нибудь экстравагантного поведения.

В конце XVIII в. священник Джон Мичелл и независимо Пьер-Симон де Лаплас задумались о модели космического тела, состоящего из обычного вещества, но невидимого из-за своей огромной массы, способной пленить даже свет. Идея черной дыры родилась раньше положенного срока, до создания теории относительности, но уже показала странные возможности экстремальных сочетаний света и вещества.

Не менее важным событием для методологии будущих астрономических открытий и поиска невидимого вещества стало обнаружение планеты Нептун.

В марте 1781 г., делая обзор неба, Уильям Гершель случайно заметил небесное тело, которое было идентифицировано как новая неизвестная планета Солнечной системы Уран. Благодаря астрометрическим данным, собранным к тому времени астрономами, орбиту Урана можно было вычислить и теоретически (по формулам ньютоновской небесной механики, учитывая гравитационные силы всех тел, влияющих на траекторию искомой планеты). Слава Исаака Ньютона и успех его работы «Математические начала натуральной философии» вознесли закон инерции и понятие гравитационных сил на нерушимый пьедестал. Расчет положения планеты в любой момент времени по известным начальным параметрам стал считаться однозначной задачей. Однако реальный Уран вел себя немного иначе, и его «капризы» означали единственно возможное объяснение: какая-то гравитационная составляющая не учтена. Решение получил в 1845 г. французский астроном Урбен Леверье, который смог вычислить точное положение обладателя этой неучтенной гравитационной силы, «неизвестного нарушителя мира во Вселенной». Так была открыта планета Нептун. Вера во всемогущество законов Ньютона и в правильность примененной методологии упорчилась, однако они все-таки подвели, когда речь зашла о Меркурии.

Гравитационные возмущения, создаваемые большими телами Солнечной системы, приводят к тому, что орбита ближайшей от светила планеты, Меркурия, смещается на 5600" в 100 лет, ее главная ось вращается замедленно. В середине

XIX в. астрономы, в том числе Леверье, вычислили, что применение законов небесной механики и учет всех известных на тот момент тел Солнечной системы позволяет объяснить эффект на 99.2% и необъясненными остаются только 43". Величина небольшая, но недостаточная для того, чтобы по аналогии с Нептуном предположить существование какого-то неизвестного возмущающего тела, находящегося между Солнцем и Меркурием. Это тело французский астроном даже поспешил назвать Вулканом. Однако здесь причина гравитационной аномалии заключалась не в наличии какого-то «темного» тела, а в том, что был достигнут предел классической физики. Блестящее объяснение именно этого наблюдательного факта с помощью новой теории гравитации послужило крепкой опорой теории Альберта Эйнштейна.

Поучительную историю мы напомнили, потому что она ярко демонстрирует достижения и неудачи двух принципиально различных подходов для объяснения аномальных движений небесных тел: поиск недостающего «темного» тела или изменение существующего физического закона. Борьба этих точек зрения сохранилась и до сих пор, в проблеме темной материи.

Предтечи

В начале XX в. еще не было ясно, являются ли «белесые туманности» внегалактическими системами или Вселенная исчерпывается Млечным Путем. Астрономы упорно продолжали регистрировать спектры от крупных спиралевидных космических структур, таких как М31 (туманность Андромеды) и М33 в Треугольнике в поисках знакового наблюдения, которое помогло бы прояснить масштабы исследуемых объектов. И не напрасно: иногда эмиссионные линии спектра оказывались наклонными, что, согласно закону Доплера, указывало на внутреннее вращение этих объектов. По характеристикам спектра можно было рассчитать примерную массу «туманности», находящейся в состоянии динамического равновесия, а также оценить расстояние до нее. Далее, сравнивая массу и наблюдаемое количество излучения (выражаемого обычно в солнечных единицах), можно было оценить абсолютную светимость такого объекта. Полученные количественные оценки лежали в очень широких диапазонах, что показывало их ненадежность (особенно это касалось определений расстояний). К примеру, «туманность» могла оказаться в пять раз менее яркой, чем гипотетический объект, равный ей по массе и состоящий исключительно из звезд типа Солнца. Ничего удивительного, если учесть, что самые распространенные звезды — небольшого размера, обладающие слабой светимостью, но большей продолжительностью жизни, чем более яркие.

Таким образом, к концу 20-х годов прошлого века, когда «белесые туманности» были переведены в разряд галактик, астрономы во главе с голландцем Якобом Каптейном были убеждены, что во Вселенной существование малосветящейся или просто невидимой материи есть исключение, а не правило. Этот вывод был сделан по аналогии с ситуацией в нашем ближайшем окружении: в Солнечной системе невидимое (т.е. ненаблюдаемое) вещество составляет примерно одну тысячную часть. Но в 1932 г. Ян Оорт, молодой ученик Каптейна, решил выбрать внутри вертикального цилиндра, содержащего Солнце, звезды одинаковых спектральных классов (и, следовательно, примерно одинаковой массы и возраста) и оценить (по средним скоростям и вертикальным расстояниям) гравитационную силу, необходимую для их связи в единую систему. Результат Оорта застал всех врасплох. Плотность вещества, требуемая для состояния устойчивого равновесия, более чем в полтора раза превышала плотность видимого вещества, количество которого было посчитано по наблюдаемым звездам (параметр, носящий название «предел Оорта»). Конечно, никто не требовал, чтобы невидимыми двойниками вещества были какие-то экзотические объекты. Ими могли быть, к примеру, тусклые звездочки, такие как белые карлики или даже еще более тусклые черные карлики. Другими словами, эти результаты хоть и оказались неожиданными, но не предполагали никакого крушения парадигмы известного на тот момент строения вещества. И, к счастью, эта модель была опровергнута несколько лет спустя в силу своей неточности — в ней было фактически проигнорировано наличие у Млечного Пути сферической составляющей в центре (так называемого бадджа), что привело к сильному завышению необходимой плотности диска.

В том же году (что подтверждает эпидемический характер новых идей) швейцарец Фриц Цвикки провел наблюдение, образно говоря, взорвавшее дамбу на пути потока темной материи. Глядя на величины красного смещения галактик, измеренных Эдвином Хабблом, Цвикки обратил внимание на то, что отклонения скоростей галактик от среднего (т.е. относительно систематической радиальной скорости) для восьми объектов, принадлежащих большому скоплению галактик в созвездии Волосы Вероники, сильно различаются — более чем на 2000 км/с. Вдохновленный работой Анри Пуанкаре, Цвикки решил использовать теорему вириала в ее приложении к термодинамике, чтобы оценить дисперсию скоростей «частиц» в этом скоплении, необходимую для гравитационной устойчивости системы как целого. Используя среднюю массу галактики порядка 10^9 солнечных масс, из чего исходил и Хаббл, Цвикки вычислил, что для разрушения гравитационной связности хватило бы и 80 км/с — на порядок меньше дисперсии скоростей вдоль луча зрения. Из этого

следовало, что, если данные по скоростям подтвердятся, необходимо признать наличие большого количества скрытой массы, дающей больший вклад, чем все светящееся вещество.

Статья Цвикки, содержащая это заключение [1], была написана по-немецки для швейцарского журнала, а потому оказалась практически проигнорирована — начиналась эпоха доминирования в научной литературе английского языка. Однако основной причиной невнимания к работе Цвикки был не языковой барьер (Хаббл, к примеру, хорошо говорил по-немецки), а скандальная репутация автора, с пренебрежением относившегося к своим коллегам. В следующей работе, также принятой прохладно, Цвикки более четко сформулировал свой результат и обсуждал его значимость для внегалактической астрономии, предлагая новые направления исследования. Основной целью ученого было сформировать методологию точных оценок «масс туманностей и скоплений туманностей». Самым значительным результатом этой работы было исследование густонаселенной популяции скопления галактик в созвездии Волосы Вероники (1000 галактик с тщательно измеренными скоростями). Прямое применение теоремы вириала дало для локальной области Вселенной слишком большое отношение массы к светимости — порядка 500 в солнечных единицах (в окрестностях Солнца оно равно примерно трем). Это верно, если расстояние до созвездия Волосы Вероники определено по закону Хаббла с параметром 560 км/с/Мпк. Современные данные показывают, что Цвикки переоценил отношение массы к светимости примерно в восемь раз (поскольку постоянная Хаббла равна 67 км/с/Мпк). Однако взаимное наложение разных ошибок привело к тому, что результат Цвикки оказался в целом правильным (рис. 1).

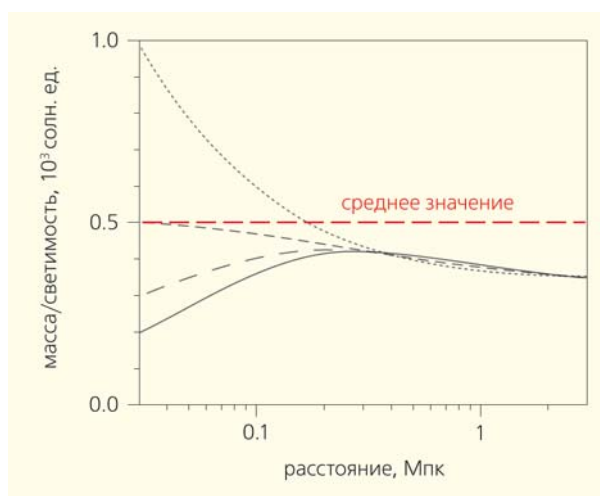


Рис. 1. Отношение массы к светимости для галактик скопления Волосы Вероники как функция расстояния до центра для разных моделей плотности темной материи. Показано среднее значение, найденное Цвикки в 1937 г.

Новаторские идеи Цвикки не были восприняты всерьез. Кроме того, недоставало кандидатов для источников обычного барионного вещества. Сегодня известно, что яркие звезды составляют малую долю массы скопления, а большая часть барионов обнаруживается в состоянии горячей плазмы, расположенной в пространстве между скоплениями и видимой в рентгеновских лучах. Количество таких барионов тем обильнее (превышая звездную плотность до величины, в 15 раз большей), чем населенное скопление. Во времена Цвикки еще не умели наблюдать рентгеновское излучение горячих газов и излучение в инфракрасном диапазоне от пыли, и тем более еще не пришло время даже представить, что материя может быть небарионной.

В работах Цвикки содержится много незаслуженно забытых идей. Так, например, он пишет, что теорема вириала, примененная к скоплениям галактик, обеспечивает хороший наблюдательный тест по проверке закона обратных квадратов для гравитационных сил. Поскольку скопления галактик — максимально крупные из известных нам сосредоточения вещества, изучение их динамики остается последней ступенью перед изучением динамики Вселенной в целом. Возникает вопрос, могут ли разногласия в измерениях динамических свойств скоплений быть вызваны каким-то пороком фундаментальной теории гравитации или все-таки необходимо задуматься прежде всего об особенностях состава этих скоплений. В современных теориях изменение гравитационной теории идет по двум основным направлениям — это теории MOND (Модифицированная ньютоновская динамика) и $f(R)$ -гравитации.

Теория MOND была предложена в 1983 г. сначала просто как феноменологическая, но затем перешла в разряд самосогласованных теорий, бу-

дучи классической, а не релятивистской (хотя и не без некоторых проблем). Основная ее идея — радикальное преобразование закона инерции в тех областях, где гравитационные ускорения малы, например на периферии галактик: в условиях слабого поля гравитационная сила считается пропорциональной квадрату ускорения. Такая модификация закона тяготения дает, так сказать, эффект большей гравитационной силы, или, другими словами, симулирует наличие некоей дополнительной фиктивной массы. Формально полученный результат эквивалентен наличию настоящей темной материи. Однако MOND хорошо описывает наблюдательные данные только на масштабах галактики (рис.2), а на более крупных масштабах, таких как скопления галактик, начинаются разногласия. Альтернативой MOND (по виду гравитационных взаимодействий, но не по сути) служит теория $f(R)$ -гравитации, относящаяся к теориям расширений гравитации — в обобщении классического лагранжиана действия Эйнштейна—Гильберта, что позволяет рассматривать дополнительные степени свободы кривизны пространства-времени. Другими словами, к веществу как источнику гравитационного поля можно добавлять другие поля кривизны. Такого рода теории стали активно изучаться, в том числе в связи с работами по объяснению космологической инфляции $f(R)$ -теорией Алексея Старобинского, но они по-прежнему сталкиваются с рядом серьезных проблем при сравнении с наблюдательными данными.

Цвикки рассматривал и вопросы, куда деваются остатки после катаклизмов взаимодействия галактик, какой вклад они могут давать в оценку вириального движения, и занялся наблюдениями лично на маленьком телескопе (диаметром 46 см и полем $1.225 \cdot 10^{-3}$ кв. рад) с оптической системой Шмидта. Сегодня мы знаем, что межгалактический свет, существование которого предполагал Цвикки, действительно наблюдается и концентрируется преимущественно вокруг галактик-гигантов (рис.3). Однако вклад в общую массу от него незначителен — другими словами, этого ингредиента явно недостаточно для объяснения полной массы Вселенной.

Последнее из блестящих интуитивных предсказаний, сделанных Цвикки в работе 1937 г., — об использовании эффекта гравитационного линзирования для измерения масс.

Идея того, что массивное тело может отклонять лучи света, была не нова. Еще Ньютон писал в своем труде «Оптика»:

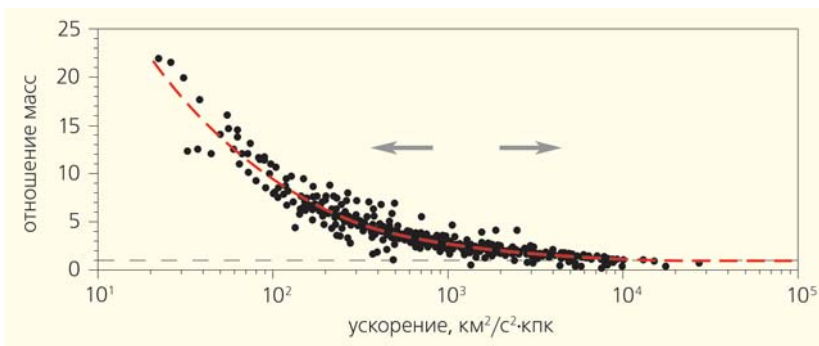


Рис.2. Несоответствие между массами спиральной галактики, вычисленными двумя способами: динамически и по совокупности светящегося вещества. Различие растет с уменьшением гравитационного поля, согласно с аргументами теории MOND. По оси ординат отложено отношение динамической массы к массе, вычисленной по совокупности светящегося вещества. По оси абсцисс отмечено ускорение, согласующееся с плотностью барионного вещества. Стрелкой влево отмечена область низкой плотности. Стрелкой вправо отмечена область высокой плотности (необходимости в гипотезе темной материи там нет).

«Возможно ли, что тела действуют на расстоянии на лучи света и действие этих тел искривляет траектории лучей (при прочих равных условиях) тем сильнее, чем ближе лучи проходят к этим телам?» В 1912 г. Эйнштейн попытался геометрически формализовать явление гравитационного линзирования в рамках зарождающейся общей теории относительности [2], но, допустив концептуальную ошибку, отказался от этой затеи. Он вернулся к этому вопросу в 1936 г. под давлением одного чехословацкого инженера, неопределенно отметив, что «конечно, есть надежда наблюдать это явление».

Пространство, в котором распространяются фотоны от далекого источника, не пусто: оно заполнено гравитационными полями небесных тел, таких как звезды, галактики и скопления галактик. Известно, что движущаяся в гравитационном поле пробная частица следует гиперболической траектории, если ее скорость превышает скорость убегания от источника этого поля. Для фотона, частицы, обладающей энергией, рассуждения аналогичны. Кванты света, которые распространяются по разные стороны от массивного тела, после отклонения могут снова сойтись в одной пространственной точке (рис.4). Геометрические расчеты показывают, что для наблюдателя появляются несколько мнимых изображений истинного источника, как если бы массивное тело «работало» линзой (мощной), хотя и подверженной сильнейшей абберрации). В сущности, измеряя параметры этих гравитационно-сфокусированных изображений, путем решения обратной задачи можно восстановить массу тела-линзы, даже если эта масса невидима. В зависимости от относительных положений источника, линзы и наблюдателя, а также от массы и формы линзы различают три режима гравитационного линзирования: *сильное*, *слабое* и *микрولينзирование*. Сильное происходит, когда линза очень массивна, а угловое расстояние между линзой и фоновым источником излучения мало, т.е. они оба лежат практически на одной оси с наблюдателем. Если линза лежит далеко вне оси, ни изображений, ни дуг источника не формируется и эффект слабого линзирования выражает себя только в том, что фоновый источник слегка искажается, становясь более узким и вытянутым. Этот эффект может стать мощным статистическим инструментом в поиске невидимых линз и их распределений при наличии большого количества хорошо определенных фоновых источников. При микрولينзировании источники настолько малы или слабы, что их изображения не видны, несмотря на почти идеальное расположение на оси с наблюдателем. В результате источник света кратковременно увеличивает свою яркость, что и наблюдается.

Шаг вперед в понимании очень большого отношения массы к светимости для скопления галактик в созвездии Волосы Вероники и почти того же самого для скопления Девы смог сделать молодой

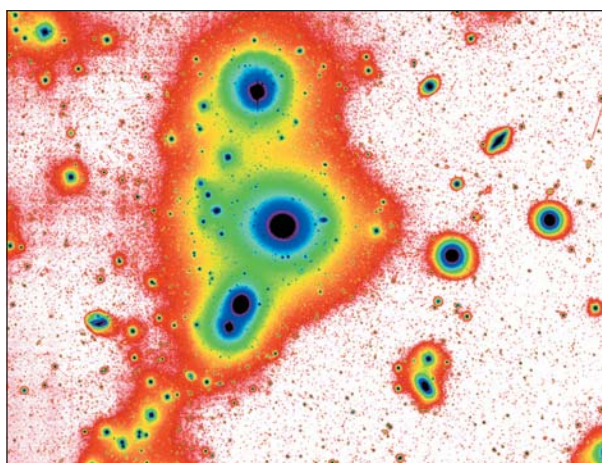


Рис.3. Глубокий снимок в оптическом диапазоне (в искусственных цветах) скопления галактик в созвездии Печь на северном небе, полученный телескопом VST и камерой широкого обзора OmegaCam. Здесь впервые видно огромную протяженность гало, принадлежащего доминирующей в этом скоплении галактике NGC 1399 (галактика представлена центральной круговой областью).

шведский ученый. В своей диссертации «Анналы Лундской обсерватории» (1937) Эрик Холмберг обработал большой объем данных на пластинах, собранных в Гейдельбергской обсерватории, и определил, что галактики часто встречаются парами или небольшими группами. Взяв за основу гипотезу равновесия и привлекая статистические оценки, он смог оценить отношение массы к светимости для пар галактик. Отношения получились меньше, чем для скопления Волосы Вероники, но все-таки выше, чем в окрестностях Солнца. Эти результаты стали первым указанием на то, что отношение массы к светимости зависит от масштаба ис-

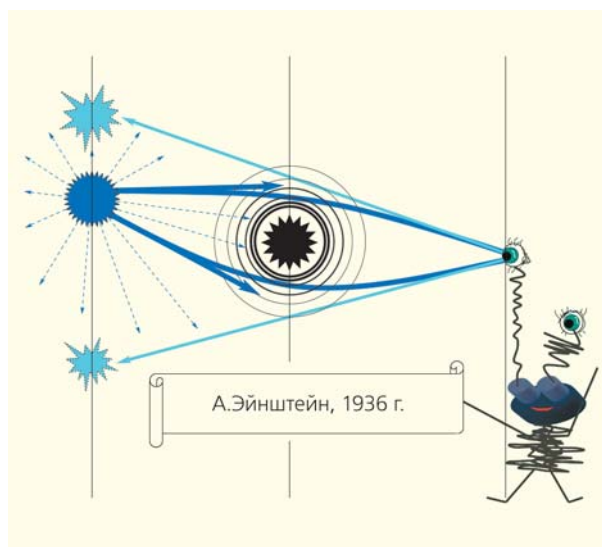


Рис.4. Схема гравитационной фокусировки.

следуемой статистической выборки галактик. Современные оценки для разных классов объектов и для разных масштабов (рис.5) показывают, что экспоненциальный рост останавливается на масштабах порядка 250 кпк (оценка при постоянной Хаббла 67 км/с/Мпк) и, начиная с этого расстояния, отношение массы к светимости примерно одинаково. Холмберг один из немногих прокомментировал результаты Цвикки, сказав, что «несоответствие выглядит реальным и важным». Чтобы попытаться сохранить отношение массы к светимости «приемлемым», шведский ученый предположил, что некоторые галактики только кажутся принадлежащими скоплениям, а на самом деле пролетают мимо на гиперболических скоростях. Мартин Шварцшильд, сын Карла Шварцшильда, пытался отыскать таких «путешественников» и исключить их при оценке средних скоростей галактик в скоплениях, но его поиски смогли объяснить только 20% от значения Цвикки, слишком мало для устранения проблемы, которую швейцарский астроном осторожно назвал пока еще не напрямую «темной материей», но просто «недостающей массой». Виктор Амбарцумян оказался более прямолинейным в своем отвращении к концепции темной материи. Ученый утверждал без обиняков, что скопления галактик представляют собой неустойчивые и быстро расширяющиеся системы, к кото-

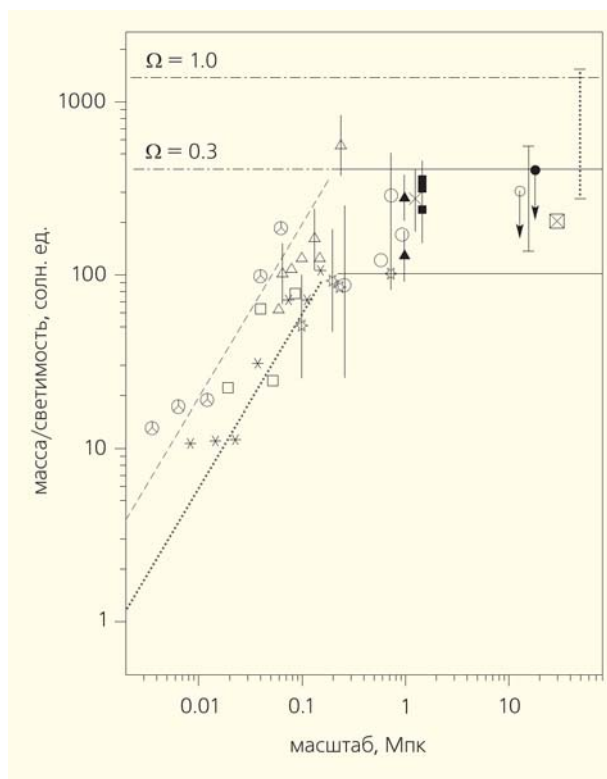


Рис.5. Отношение массы к светимости как функция масштаба. Различные обозначения на диаграмме соответствуют галактикам и их скоплениям разных типов.

рым вообще нельзя применять теорему о вириале. Однако его довольно быстро опровергли тем аргументом, что галактики давно разлетелись бы и Хаббл не смог бы их наблюдать. В 60-х годах интерес к теме темной материи повышался и благодаря надеждам на исследования неизвестного вещества с возможными технологическими перспективами. Открытие новых спектральных полос говорило о том, что от Вселенной следует ожидать много интересного и неожиданного в плане понимания структуры вещества. Но настоящая революция случилась в середине 70-х годов — из-за кризиса вращения в линии 21 см.

Разворот

Вторая мировая война дала импульс развитию радаров, и после ее окончания их переориентировали для мирного изучения неба, в чем одними из первых были голландцы. Еще в 1944 г. Оорт поручил студенту Гендрику ван де Хюлсту оценить целесообразность наблюдений в космосе переходов в сверхтонкой структуре основного уровня нейтрального водорода, что было к тому времени изучено теоретически Гендриком Казимиром. При переходах между подуровнями, связанными со спином электрона и протона, возникает запрещенная в электродипольном приближении радиолиния с длиной волны 21 см. Ван де Хюлст оценил все неопределенности, сопровождающие исследуемый эффект: во-первых, неизвестный состав межзвездного пространства, в котором линия могла быть обнаружена в спектре и излучения, и поглощения, а во-вторых, вероятность того, что весь водород присутствовал в форме нейтральных молекул*. Он сделал вывод, что запрещенная линия незначительно, но присутствует, и этого оказалось достаточно для объяснения парадокса Оорта. Хотя лавры открытия линии 21 см принадлежат Гарвардскому университету (с разницей всего несколько недель), голландцы начали строить антенны все более мощные, конкурирующие с разработками англосаксонского мира.

Вскоре стало ясно, что спиральные галактики окружены гало из нейтрального водорода, и, привлекая механизм Доплера к монохроматическому излучению линии 21 см, удалось построить кривые вращения вне пределов, доступных оптическим инструментам. Так был получен новый метод измерения общей массы галактики, вместо экстраполяции в предположении не изменяющегося с радиусом отношения массы к светимости.

Понять, что мы хотим обнаружить, поможет рис.6. Две кривые кругового вращения (необходимого для динамического равновесия галактики

* Отметим, что возможность наблюдения линии водорода 21 см (в другом научном контексте) впервые исследовал Иосиф Шкловский.

при отсутствии хаотичного движения) были рассчитаны для приближения сверхтонкого диска и для сферы в допущении, что поверхностная плотность вещества следует экспоненциальному поведению излучения. Другими словами, две простейшие модели воспроизводят две пограничные конфигурации, при которых отношение массы к светимости постоянно. В обоих случаях примерно на двух единицах экспоненциального масштаба вращения стабилизируется и круговая скорость начинает падать по закону Кеплера. Как и для планет Солнечной системы, причина заключается в том, что масса больше не растет с ростом радиуса.

Кривые вращения, полученные американской группой Мортон Робертса и голландцами, демонстрировали, однако, неожиданный выход скоростей на постоянную величину (рис.7), что означало быстрый рост отношения массы к светимости. Появление электронно-оптических детекторов, таких как усилители изображения и CCD-матрицы, позволило даже в оптической астрономии расширить области измерения кинематических характеристик в периферийных областях многочисленных спиральных галактик. В результате постоянство круговой скорости на больших расстояниях от центра было подтверждено. И, подобно тому как в свое время цефеиды заслужили звание «маяков Вселенной» (1925), плоскостность кривых вращения ввела в астрономическое сообщество понятия «темная материя», по крайней мере для темных ореолов вокруг галактик.

Рубикон был пройден, и новый ингредиент начали активно примерять на роль *deus ex machine* для многих необъяснимых явлений. Например, согласно численному моделированию Джереми Остикера и Джеймса Пиблса, наличие темного гало может объяснить, почему примерно половина известных спиральных галактик до сих пор не лишились перемычки, состоящей из ярких звезд (так называемого бара), несмотря на хрупкость дисков, представляющих собой вращающиеся динамически холодные спиральные рукава. Модель была спорной, но в свое время вызвала большой ажиотаж. Год спустя два космолога из Принстонского университета вместе с Амосом Яхилем собрали большой статистический материал для того, чтобы доказательно утверждать, что «масса спиральных галактик растет почти линейно с радиусом до масштабов порядка 1 Мпк». Ян Эйнасто с сотрудниками тем временем проанализировал галактические гало, состоящие из горячего газа, и на основании данных спутника UHURU сделал вывод о наличии «массивных галактических корон». Наконец, советский ученый Леонид Озерной предположил, что недостающая масса должна быть локализована преимущественно вне галактики, в межгалактическом пространстве.

В космологии темную материю впервые применил Яков Зельдович вместе со своими сотрудни-

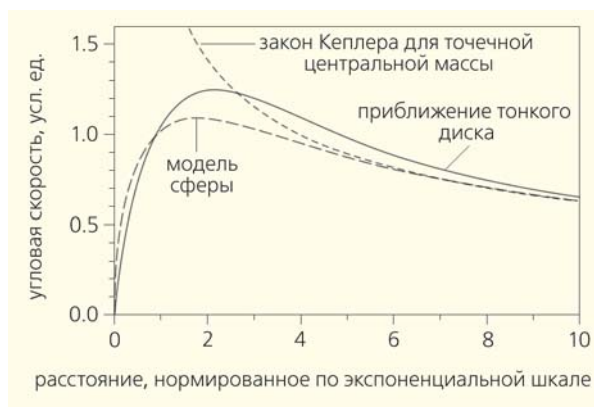


Рис.6. Круговая скорость в модели тонкого диска (сплошная линия) и в модели сферы с поверхностной плотностью, имитирующей экспоненциальное распределение яркости, которое характерно для спиральных галактик при постоянном отношении массы к светимости (штриховая линия), как функция расстояния от центра (в единицах экспоненциальной шкалы). Эта зависимость сравнивается с законом Кеплера, при котором центральная масса сосредоточена в точке (монотонная штриховая кривая).

ми Андреем Дорошкевичем, Рашидом Сюняевым, Максимом Хлоповым [3–5]. Наличие у нейтрино массы покоя (предсказанное Бруно Понтекорво в 1957 г.) послужило мотивацией использовать массивное нейтрино как кандидата на роль частицы темной материи. В 1980 г. в серии трех статей под общим названием «Астрономические следствия массы покоя нейтрино» Зельдович и его сотрудники дали полный анализ влияния темной ма-

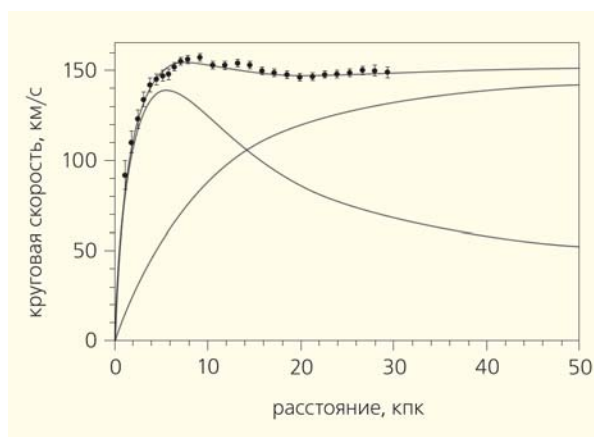


Рис.7. Кривая вращения, плоская в наблюдении линии 21 см вдоль большей оси спиральной галактики NGC 3198. Для соответствия наблюдательным данным диск, состоящий из одной барионной материи с постоянным отношением массы к светимости, должен сопровождаться гало темной материи. По оси ординат отложена круговая скорость, по оси абсцисс — расстояние от центра галактики. Кривая, спадающая для больших расстояний, — кривая вращения диска в предположении постоянного отношения массы к светимости.

терии, состоящей из массивных нейтрино, на развитие Вселенной как целого и на ключевые процессы в ранней Вселенной — в частности, на эволюцию возмущений плотности. Хороший пример прихотливого пути научной мысли: физические эксперименты показали, что масса покоя электронного нейтрино крайне мала (правда, во Вселенной их очень много), но темная материя уже проникла в космологию и утвердилась там.

Серия работ Зельдовича важна еще и тем, что в ней с помощью темной материи впервые было дано объяснение одного из важнейших парадоксов космологии, связанного с несоответствием космологической модели и наблюдательных данных. Рассмотрим его подробно.

Возмущения плотности вещества в ранней Вселенной порождают характерные неоднородности *реликтового излучения*, самого «древнего» света, родившегося в эпоху разделения вещества и излучения (приходящего к нам с расстояний, соответствующих красному смещению $z = 1000$). Такая анизотропия реликтового излучения была открыта в 1992 г. (советским спутником «Реликт» и американским спутником COBE), а в 1980 г. был известен только ее верхний предел, который позволял вычислить верхний предел и на возмущения плотности для $z = 1000$. Парадокс заключался в том, что эти начальные возмущения плотности, даже максимальные по величине, не успели бы сжаться под действием собственных гравитационных сил так, чтобы к сегодняшнему моменту времени сформировать наблюдаемые структуры: галактики, скопления галактик, звезды и планеты.

Темная материя (в данном случае массивные нейтрино) решила этот парадокс, потому что начала сжиматься раньше обычной (барионной) материи. Следовательно, рост возмущений плотности, не меняя величину анизотропии, тоже начался гораздо раньше, чем при $z = 1000$. Таким образом, на масштабах скоплений галактик сначала произошел рост возмущений плотности темной материи, а потом эти области стали гравитационно притягивать обычное вещество, послужив тем самым зародышами крупномасштабной структуры. К моменту, когда красное смещение стало равным $z = 10$, что соответствует возрасту Вселенной около 0.5 млрд лет, возмущения плотности обычного вещества стали достаточно большими для процесса образования скоплений галактик, галактик и других более мелких структур.

Таким стал выход на космологическую арену темной материи. Она была призвана объяснить много загадок, в том числе процессы формирования крупномасштабной структуры, которые невозможно объяснить наличием только обычного вещества, а также зарождение первичных возмущений плотности.

Со своей стороны, космология дала существенный вклад в понимание феномена темной материи, намекая, что не все то золото, что блестит.

Речь идет вот о чем. Стандартная космологическая модель содержит ряд глобальных параметров, значения которых получены с очень большой точностью благодаря космическим радиотелескопам WMAP и Planck. Одна из этих характеристик, полная плотность (сумма плотностей материи и энергии), равна критической плотности Вселенной, т.е. такой, что ее метрика евклидова (плоская). Часть вещества, состоящего из барионов и темной материи (которая, в свою очередь, может быть как барионной, так и небарионной), составляет, согласно данным WMAP и Planck, около 28% от общей плотности. Уже в 70-х годах прошлого века была создана модель синтеза легких элементов (D, ^3He , ^4He и Li) в рамках теории горячего Большого взрыва, и количество этих элементов оказалось порядка 3–4% от полной плотности Вселенной (по последним данным, на межгалактический газ приходится 3.6%, а на звезды — 0.4% барионного вещества). Отсюда следует, что остаток плотности вещества, около четверти, должен быть небарионным и темным. Из этих рассуждений вытекают две проблемы.

Во-первых, как характеризовать то барионное вещество, которое невидимо (около половины всех барионов) — невидимо не в силу экзотичности, а просто из-за тусклости. На жаргоне космологов такое вещество называют «мачос» (MACHOs — название космического проекта и аббревиатура от «массивные компактные объекты гало»; в проекте наблюдали многочисленные образцы гало нашей Галактики с помощью гравитационного микролинзирования). Считается, что мачос — это преимущественно черные дыры звездных масс, нейтронные звезды, звезды-карлики, угасающие и погасшие звезды, неизвестные планеты.

Во-вторых, и эта проблема еще сложнее, — какова природа частицы, которая могла бы быть ответственной за большую часть темной материи небарионного типа. Было предложено несколько кандидатов на роль частиц темной материи, обширная категория которых носит название «вимпы» (WIMPs — аббревиатура от англ. «слабо взаимодействующие массивные частицы»). Если такие частицы существуют и если они стабильны, то они естественно производятся в количестве, достаточном для объяснения темной материи. Они могут быть в форме нейтралитонов (массивных суперпартнеров нейтрино, существование которых находит поддержку в теории суперсимметрии элементарных частиц) или в форме частиц Калуцы—Клейна (которые обладают масштабами компактных дополнительных измерений суперструнных теорий и тоже имеют пока только теоретическое обоснование). Кроме вышеперечисленных кандидатов есть и много других, появляющихся в теории — в расширениях Стандартной модели элементарных частиц. Чтобы их найти, пытаются наблюдать столкновения частиц темной материи с частицами материи обычной.

Существуют три основных типа детекторов частиц темной материи: *газообразные и твердотельные низкотемпературные детекторы и нейтринные телескопы*. Общий физический принцип «ловли» частиц заключается в передаче необходимого импульса для получения некоей отдачи от соответствующего детектора.

Поиск частиц темной материи — одна из самых престижных целей после открытия бозона Хиггса (ведь сегодня существуют многочисленные свидетельства того, что значительная часть вещества Вселенной находится в форме за пределами Стандартной модели физики элементарных частиц). Единственный детектор, давший пока положительный сигнал, — DAMA/LIBRA лаборатории Гран-Сассо (Италия). Долгое время этот эксперимент показывал наличие сигнала, который мог быть интерпретирован как упругое рассеяние частиц темной материи, но сечения этого процесса исключались другими экспериментами. В поиске таинственных частиц участвует и ускоритель частиц в ЦЕРНе — Большой адронный коллайдер (БАК). Последние эксперименты на нем дают надежные верхние ограничения на прямое детектирование частиц темной материи.

Но вернемся к астрономии. Двадцать лет назад была обнаружена область рентгеновского излучения с рекордной температурой — гигантское облако газа, зажатое между двумя удаленными скоплениями галактик. Источник быстро стал популярным как первый яркий пример ударной волны в межгалактической плазме. Ударная волна образовалась из-за гравитационных взаимодействий скоплений галактик. Меньшее из двух скоплений, находящееся в состоянии рецессии после столкновения (которое прошло без катастрофических последствий, поскольку скопления галактик представляют собой системы бесстолкновительных частиц), получило имя Пули. Название было дано по внешней схожести с летящей пулей из старинного пистолета, с дымным шлейфом позади, вьющимся, как детективная история темной материи. Благодаря зоркому глазу космического телескопа «Хаббл» в скоплении Пули были обнаружены искаженные изображения отдельных галактик, ориентированных в соответствии с совместным гравитационным полем двух скоплений. С помощью этих изображений оказалось возможным воссоздать распределение массы в создающих их линзах. Оказалось, что в обоих скоплениях необходимая для объяснения искажений изобра-

жений галактик масса — темная, а ее распределение не совпадает с распределением обычной светящейся барионной материи (рис.8) [6]. Этот факт, по мнению наблюдателей, послужил аргументом в пользу существования темной материи и против модифицированных законов гравитации, потому что для последних центры распределений совпадали бы. Такой вывод все еще используется в спорах с апологетами MOND.

Кроме того, исследования этой пары скоплений галактик открыли новые возможности самодействия темной материи на сверхбольших масштабах. Дело вот в чем. Наиболее популярная версия — «холодной темной материи» (состоящей из тяжелых холодных частиц) — хорошо согласуется с наблюдательными данными на космологических масштабах. Эта модель способна объяснить образование и рост крупномасштабной структуры из первичных флуктуаций и тот факт, что с учетом изначальной неоднородности вещества во Вселенной получаются такие структуры, как галактики и скопления галактик. Однако на меньших масштабах модель холодной темной материи уже не так хороша, потому что существуют наблюдения, ее опровергающие. Например, модель утверждает, что плотность распределения вещества в центрах галактик должна иметь пик, чего не происходит, а число галактик-спутников нашего Млечного Пути должно быть гораздо больше, чем это наблюдается.

Существует лазейка несколько видоизменить модель холодной темной материи — принять модель «теплой темной материи». Однако этот путь оказывается не менее опасным: он позволяет частично устранить расхождения с наблюдениями на галактических масштабах, но требует возвраще-



Рис.8. Изображение скопления Пули (в искусственных цветах), которое показывает скопление газа высокой температуры в межгалактическом пространстве (красный цвет). Синим показано распределение темной материи, которое полностью накрывает область двух скоплений, разделенных после столкновения.

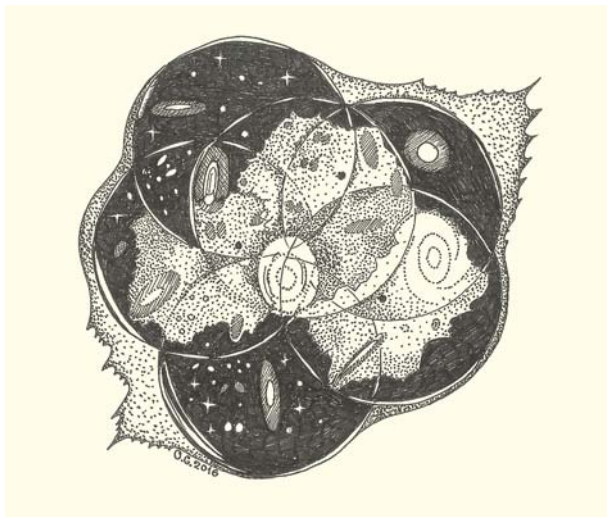


Рис.9. Темная материя в художественной интерпретации Сажинной. Звезды, галактики и дуги гравитационно-линзовых изображений связаны с загадочными невидимыми скоплениями темной материи, охватывающими всю Вселенную.

ния нейтрино в качестве кандидата на темную материю. Или же надо признать, что помимо гравитационных взаимодействий темная материя имеет возможность, хотя и слабую, взаимодействовать сама с собой. Но как определить, существует ли такое взаимодействие? Силы, действующие на частицы в усреднителе, вычисляются при столкновениях по результирующим траекториям и количеству вещества, получающегося после удара. Для темной материи можно аналогично использовать скопления галактик. Таким образом, предмет наблюдательных поисков должно стать неидеальное совпадение распределений обычной материи и темной материи после чудовищного удара двух скоплений галактик. Возможно, этим способом удастся получить верхний предел на сечение взаимодействия темной материи с собой. В этом направлении ведутся исследования, но ре-

зультаты по-прежнему противоречивы [7]. Большое внимание уделяется сопоставлению карт событий слабого линзирования с пространственной частотой распределения барионов на как можно больших участках неба (чтобы уменьшить статистические неопределенности и получить точные меры плотности материи во Вселенной).

Подводя итоги

Закончим этот небольшой обзор некоторыми вопросами и ответами. Существует ли темная материя? Скорее всего, да, существует, но не будем забывать о планете Вулкан! Насколько важен вклад темной материи в полную плотность Вселенной? Да, вклад важен, но не настолько, как это считалось два десятилетия назад, когда еще не знали о темной энергии. Из чего сделана темная материя? Пока это неизвестно. Как она распределена? Может располагаться в любом месте пространства, но предпочитает быть рядом с барионной материей (рис.9). Может ли темная материя взаимодействовать сама с собой или быть подверженной другим типам неизвестных взаимодействий? Вполне. И так, темная материя и не холодная, и не теплая? Кто знает! Что же надо делать? Продолжать охоту с более мощным оружием, таким как гигантские телескопы будущего: LSST (Large Synoptic Survey Telescope) и EELT ESO (European Extremely Large Telescope), а также новый оптический телескоп НАСА JWST (James Webb Space Telescope), новая космическая миссия Euclid ESP (Euclid Space Telescope), сеть наземных радиотелескопов SKA (Square Kilometer Array) с зоной сбора данных в 1 км², новое численное моделирование космологических процессов, более совершенное, чем современный ILUSTRIS, а также большие наземные ускорители, способные искать темные частицы (эксперименты LUX (Large Underground Xenon) и БАК). А еще нужны усилия лучших астрономов, космологов и физиков всего мира. Игра трудна, но она стоит свеч. ■

Литература

1. Zwicky F. On the masses of nebulae and of clusters of nebulae // *Astrophys. J.* 1936. V.86. P.217–246.
2. Einstein A. Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field // *Science.* 1936. V.84. P.506–507.
3. Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А. Астрономические следствия массы покоя нейтрино. I: Вселенная // Письма в *Астрономический журнал.* 1980. Т.6. №8. С.451–456.
4. Дорошкевич А.Г., Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А. и др. Астрономические следствия массы покоя нейтрино. II: Спектр возмущений плотности и флуктуации микроволнового фона // Письма в *Астрономический журнал.* 1980. Т.6. №8. С.457–464.
5. Дорошкевич А.Г., Зельдович Я.Б., Сюняев Р.А. и др. Астрономические следствия массы покоя нейтрино. III: Нелинейная стадия развития возмущений и скрытая масса // Письма в *Астрономический журнал.* 1980. Т.6. №8. С.465–469.
6. Clowe D., Bradac M., Gonzales A.H. et al. A direct empirical proof of the existence of dark matter // *Astrophys. J.* 2006. V.648. P.L109–113.
7. Harvey D., Massey R., Kitching T. et al. The nongravitational interactions of dark matter in colliding galaxy clusters // *Science.* 2015. V.347. P.1462–1465.

Капли: короны, всплески, звуки...

Ю.Д. Чашечкин

Трудно найти гидродинамическое явление, привлекающее больше внимание, чем всплеск, сопровождающий падение капли в воду. Практически каждый житель Земли рано или поздно попадает под дождь и, пережидая непогоду, наблюдает череду быстро сменяющихся картин: каверн от ударов капель, вырастающих из воды столбиков — коротких струек, с вершин которых вылетают капли, кольцевых волн и плавающих пузырей — признака окончания дождя. Течения, привлекающие поэтов и художников своей симметрией, красотой и быстротечностью, сопровождает специфический «шум дождя». Красоту и своеобразие всплесков, составивших основу дизайна ювелирных украшений и императорских корон, иллюстрируют многочисленные фотографии в Интернете, качество которых улучшается по мере совершенствования источников света, фото- и видеокамер.

Интерес, переживший века

Но не только красота привлекает внимание к процессам столкновений капель с поверхностью жидкости или твердого тела. Еще в Античности было замечено, что капли способны и разрушать (почву или камни), и создавать (натечные скульптуры — сталактиты и сталагмиты). «Капля то-



Юлий Дмитриевич Чашечкин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики жидкостей Института проблем механики имени А.Ю.Ишлинского РАН. Область научных интересов — гидродинамика, акустика, системы дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: капли, всплеск, звук, структура.
Key words: drop, splash, sound, structure.

чит камень не силой, но частотой падения», — считал римский писатель Публий Овидий Назон (43 г. до н.э. — 18 г. н.э.). В жестокое Средневековье каплям нашлось и бесчеловечное применение: подозреваемый, согласно закону, должен был пройти «тройное испытание» и выдержать три раза по три пытки: дыбу, кнут и «худой кувшин».

Научные исследования течений, образующихся под действием падающих в воду капель, начались в середине XIX в., когда В.Б.Роджерс, один из основателей Массачусетского технологического института (Massachusetts Institute of Technology, США), предложил несколько способов создания вихревых колец, например с помощью капель подкрашенной жидкости, которые падают в воду с умеренной высотой [1]. Несколько позднее О.Рейнольдс объяснил успокаивающее действие дождя на морское волнение уносом импульса организованного приповерхностного движения погружающимися вихрями, которые образуются в жидкости после удара капель [2].

Структурное сходство вихревых течений, в том числе значительно различающихся по масштабам, активно использовалось при решении сложных научных проблем. Основываясь на геометрическом подобии форм вихревых течений, созданных каплями в жидкости [3], и быстро развивающихся облаков атомных взрывов в атмосфере, академик С.А.Христианович разработал эффективную методику расчета размеров радиационного следа [4]. Полученные формулы были успешно подтверждены специальными лабораторными исследованиями и данными многочисленных атмосферных испытаний.

© Чашечкин Ю.Д., 2016

Возвращаясь к истории, следует отметить, что интерес к исследованиям всплесков капель, возродившийся (сначала в Великобритании) после длительной паузы в конце XIX в., смог опереться на новую техническую базу: для освещения быстропротекающих процессов стала использоваться искровая вспышка. Впечатляющие фотографии карверн, корон, выброшенных в воздух струек и брызг, приведенные в многочисленных статьях и книгах А.М.Вортингтона, произвели сильное впечатление на современников. Они сохраняют свою ценность до сегодняшнего дня и продолжают переиздаваться [5]. Поставленные в первых работах вопросы о механизмах формирования и величине скорости подводных течений, вызванных упавшими каплями в толще жидкости, все еще остаются без ответа.

С 40-х годов прошлого века при регистрации всплесков стали применяться лампы-вспышки — интенсивные источники света регулируемой продолжительности и яркости. В настоящее время профессиональная съемка ведется с помощью мощных светодиодных источников со световодами и цифровых фотокамер, обладающих высокой светосилой. Созданные на заре XX в. высокочувствительные приемники звука позволили изучать и акустические эффекты, сопровождающие падение капли. Первыми были зарегистрированы тональные звуковые сигналы, первоначально — в воздухе, а затем и в толще жидкости [6]. Развитию акустических исследований способствовал ряд причин, среди которых особое место занимали военные и экологические приложения.

Как известно, еще в начале 1940-х годов для обнаружения подводных лодок стали использоваться гидрофоны и активная гидролокация. Наблюдения показали, что один из важных источников подводного фонового акустического шума в океане — дождь. Звуки, вызванные падением как одиночных капель, так и их групп, теоретики и экспериментаторы стали активно изучать с целью оптимизации работы акустических станций [7]. В наши дни исследования подводного шума дождя призваны помочь совершенствовать технику, позволяющую дистанционно регистрировать интенсивность и определять места выпадения осадков в океане (падающие в воду снежинки также издают звук). Современные акустические комплексы дают возможность детально анализировать принятые акустические сигналы и выделять информацию о скорости ветра, характере волнения, интенсивности и местоположении областей осадков в удаленных от традиционных морских путей регионах.

Фундаментальность проблемы и разнообразие технических приложений поддерживают научный интерес к изучению и гидродинамики, и акустики всплеска. В экспериментах используется все более эффективная измерительная аппаратура, создаются феноменологические и численные модели, которые, однако, все еще не позволяют рассчитывать ключевые параметры наблюдаемых процессов.

Капель в лаборатории

Сложность описания течений, вызванных падением капли, обусловлена внутренней многомасштабностью каскада процессов, динамика и структура которых зависят от большого числа влияющих физических величин — плотностей капли ρ_d , принимающей среды ρ_l и воздуха ρ_a ; кинематической вязкости участвующих веществ ν_d , ν_l , ν_a и скоростей звука c_s^d , c_s^l , c_s^a ; коэффициентов поверхностного натяжения на границе капли σ_d^a и принимающей жидкости σ_l^a с воздушной средой; глубины принимающей жидкости h_w , высоты свободного падения H капли, ее скорости U , диаметра D и формы в момент контакта, а также от ускорения силы тяжести g . Оценки собственных пространственных и временных масштабов явления приведены в [8].

Отношения комбинаций параметров образуют характерные безразмерные комплексы — числа Рейнольдса $Re = UD/\nu_d$, Фруда $Fr = U^2/gD$, Вебера $We = \rho U^2 D / \sigma_a^d$, Бонда $Bo = \rho g D^2 / \sigma_a^d$, Лапласа (или Онезорге) $La = Oh^{-2} = D \sigma_a^d / \rho \nu_d^2$, Маха $Ma = U/c_s^a$, которые используются при систематизации экспериментальных данных. Большое число параметров, значения которых меняются в широком диапазоне, отражает сложность структуры взаимообусловленных процессов отрыва, движения, столкновения и слияния капли с принимающей жидкостью. Сложность структур и быстротечность отдельных составляющих изучаемых течений предъявляют высокие требования к чувствительности, быстродействию и разрешающей способности регистрирующей аппаратуры, которая обычно включает яркие источники света, высокоскоростные видеокамеры, микрофоны, гидрофоны, различные датчики, быстродействующие компьютеры.

Для проведения исследований в Институте проблем механики РАН был построен специальный стенд в составе комплекса уникальных исследовательских установок «ГФК ИПМех РАН» для моделирования структуры и динамики природных процессов [9]. Основу стенда составил гидрооптический бассейн размером 145×50×60 см с иллюминаторами из оптического стекла. Бассейн наполнялся дегазированной водопроводной водой, глубина слоя (40 см) существенно превышала характерные масштабы наблюдаемых течений (часть опытов по визуализации течений была выполнена в прозрачных бассейнах меньшего размера).

Одиночные капли (диаметром около 0.5 см) и их последовательности создавались с помощью регулируемого дозатора. Высота свободного падения капли после отрыва от сопла дозатора устанавливалась в диапазоне от 8 до 110 см. При выбранных условиях в экспериментах наблюдался выброс толстой кумулятивной струйки, либо одиночной, либо сопровождающейся вторичным стримером — тонкой струйкой, распадающейся на цепочку мелких капель [10]. В опытах менялись диаметр капли и высота ее свободного падения, а следова-

тельно, и скорость в момент контакта. Варьировались также и рабочие среды: изучалось взаимодействие капель чистой и соленой воды, чернил, спирта, молока, растворов солей, масла с водой и другими жидкостями.

В отличие от ранее проведенных опытов, в которых звук регистрировался отдельно или в воздухе, или в воде, акустические измерения проводились в обеих средах одновременно с видеосъемкой картины течения. В бассейне размещался высокочувствительный измерительный гидрофон отечественной разработки с цилиндрическим чувствительным элементом и преусилителем. Для регистрации звука в воздухе применялся самодельный измерительный комплекс с микрофонной головкой.

Область наблюдений освещалась софитами и волоконными осветителями, видеорегистрация велась высокоскоростной камерой фирмы Opttronis CR3000x2 с вспомогательными линзами (скорость съемки — от 2000 до 20 000 кадров/с, максимальный размер изображения 3 Мпкс).

Для управления экспериментом, синхронизации процесса сбора данных с различных датчиков, первичной обработки сигналов и подготовки данных к регистрации разработан оригинальный блок, который обеспечивал 12-разрядное аналого-цифровое преобразование, прием и передачу данных в компьютер по четырем независимым каналам с частотой до 10 МГц. Синхронизация видеоряда и фонограмм с гидрофона и микрофона производилась на стадии измерений с точностью до 1 мкс.

Совместный анализ фото, видео и фонограмм позволил выделить ряд новых деталей в картине развития течений и излучения звука при падении в воду капль воды, раствора чернил или солей металлов.

вых вылетевших капелек брызг (20–30 м/с) на порядок и более превосходит скорость капли в момент контакта (1–2.5 м/с). Радиальные стримеры, среди которых можно выделить 10–12 главных (с шагом 25–35°) и 50–70 более мелких (с шагом 5–7°), расположены не строго регулярно. На изображении можно заметить участки с разреженными струйками («на 13 часов») и более часто расположенными («на 7 часов», рис.1,а).

Отмеченные особенности картины течения сохраняются и при падении капли чернил в воду. Внешний край разлетающейся кольцевой пелены также рассечен системой радиальных стримеров, соединенных вогнутыми дужками (рис.1,б). Быстро вылетающие из области контакта капельки всегда включали обе слившиеся жидкости и оказывались окрашенными при падении и капли чернил в воду, и капли воды в чернила.

Мелкие брызги и пелена сначала вылетали непосредственно из области контакта капли с принимающей жидкостью; после того как ее нижняя половина полностью сливалась с поверхностью, а линия контакта погружалась ниже уровня жидкости, они продолжали извергаться с вершин зубцов окружающего каверну кольцевого ребра — выступающего над невозмущенной поверхностью венца (рис.2,а,б). Размер выбрасываемых капелек постепенно увеличивался по мере сглаживания

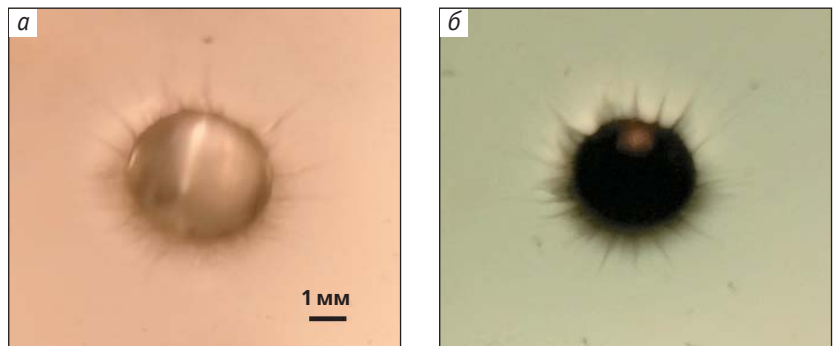


Рис.1. Пелена, стримеры и брызги при первичном контакте с поверхностью воды свободно падающей капли воды (а) и чернил (б).

Новые образы течений

Основной элемент картины течения в ходе первичного контакта капли с принимающей жидкостью — тонкая разлетающаяся пелена, к изрезанной наружной кромке которой примыкают остроконечные стримеры (рис.1). С вершин стримеров выбрасываются мелкие капельки, диаметры которых последовательно увеличиваются, а скорости, определяемые по длине штрихов, — падают (рис.1,а,б). В данных опытах скорость пер-

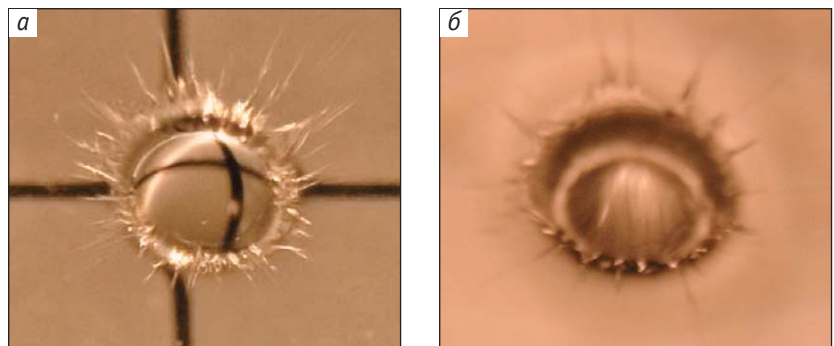


Рис.2. Погружение капли воды в воду (вид сверху): формирование венца (а) и продавливание каверны (б).

вершин зубцов на верхней кромке венца. Тильная сторона погружающейся капли оставалась гладкой: при увеличении на изображении отчетливо прорисовываются ровные линии масштабной сетки, расположенной на дне бассейна (рис.2,*а*).

Однако гладкость боковой поверхности капли для некоторых пар жидкостей нарушается — на ней наблюдаются группы коротких капиллярных волн, вызванных падением мелких капелек, которые вылетают с зубцов венца. Если в воду погружается капля воды, число таких событий невелико (рис.3,*а*), зато у капли раствора поваренной соли боковая поверхность оказывается полностью покрытой группами капиллярных волн (рис.3,*б*).

Факт попадания брызг на погружающуюся каплю указывает на заметное влияние относительной разности значений коэффициентов поверхностного натяжения $R_\sigma = (\sigma_i^\pm - \sigma_d^\pm) / (\sigma_i^\pm + \sigma_d^\pm)$, которая отражает различия плотности поверхностной энергии сливающихся жидкостей в области контакта [8]. При слиянии жидкостей, когда свободная поверхность исчезает, потенциальная поверхностная энергия, сосредоточенная в слое толщиной порядка размеров молекулярного кластера ($\sim 10^{-6}$ см), освобождается и переходит в другие формы — внутреннюю и кинетическую энергии течений жидкости. Большая плотность энергии в тонком слое в окрестности границы контак-

та двух сред влияет на формирование общей картины течения и характер переноса вещества капли в воздухе, в приповерхностном слое и в толще принимающей жидкости.

По традиции, заложенной еще первыми публикациями [5], большинство иллюстраций всплеска и в настоящее время [6] получены при горизонтальном положении линии визирования (рис.4). В такой проекции стенка каверны и внешняя поверхность венца в фазе роста выглядят окрашенными плотно и равномерно. Однако в центральной части изображения на внутренних стенках венца можно все же различить отдельные окрашенные волокна (рис.4,*а*). На более поздней стадии расплывания венца каверна деформируется сбегаящими капиллярными волнами и приобретает ступенчатую форму (рис.4,*б*). Ее поверхность остается окрашенной плотно и равномерно. Со стенок каверны в толщу жидкости вторгаются тонкие струйки, головки которых трансформируются в небольшие вихревые колечки.

Более детально представить, как вещество окрашенной капли распределяется по поверхности венца и каверны, позволяют фотографии рис.5, отражающие процесс в динамике. На фоне сплошной поверхности жидкости окрашенное вещество капли оказывается сосредоточенным в тонких полосках (волокнах) различной толщины, образу-

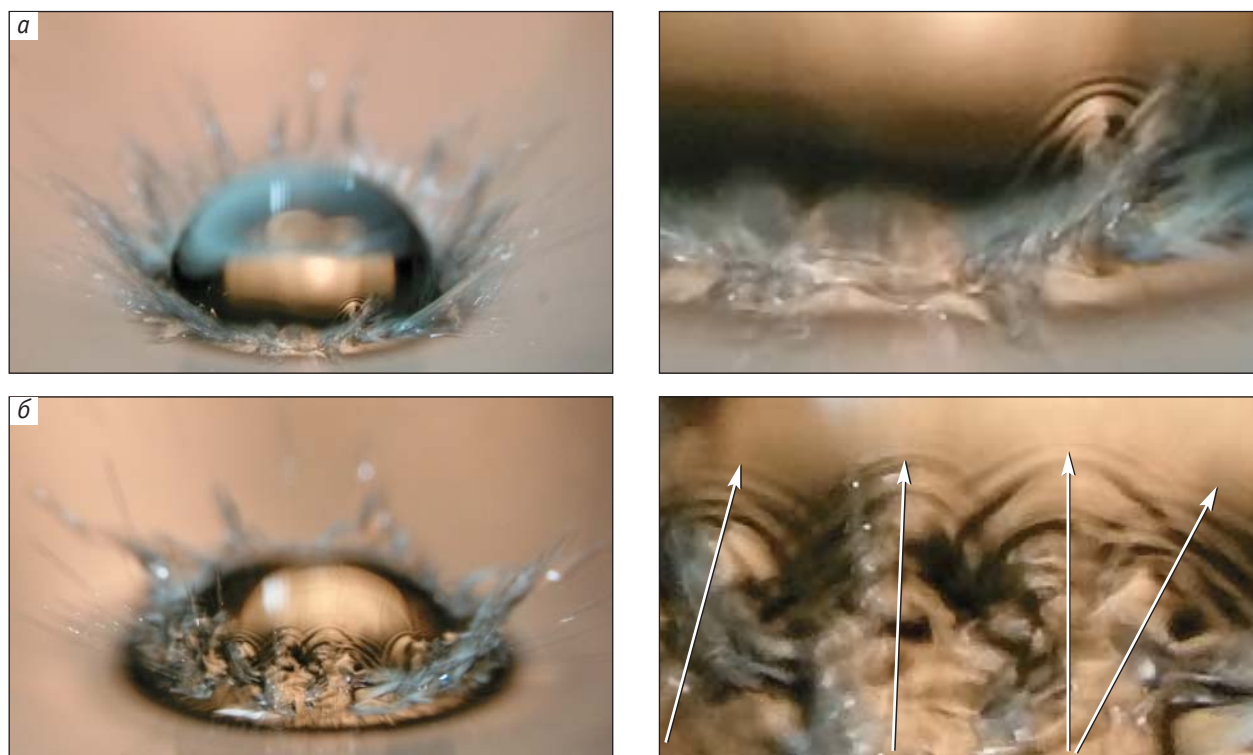


Рис.3. Следы ударов капелек брызг — короткие капиллярные волны на боковой поверхности погружающейся в воду капли ($H = 48$ см, $h_w = 4.5$ см): пресной воды (*а*; $D = 0.42$ см) и насыщенного водного раствора поваренной соли (*б*; $D = 0.46$ см, $R_\sigma = -0.14$). Справа — увеличенные в 4 раза фрагменты изображений (стрелками указаны направления распространения волн). Условия опытов соответствуют режиму формирования кумулятивной струи.

щих линейчатые структуры на поверхности каверны и выступающего венца. Но по мере того как венец растет, стабилизируется и расплывается, обнаруживаются и различия в картинах распределения окрашенного вещества капли по поверхности принимающей жидкости.

В фазе роста венца часть окрашенных волокон подходит к выступающим зубцам, часть — к впадинам на кромке (шевроне) венца, которая постепенно становится более плотно окрашенной, чем его стенки (рис.5,а). Группы вылетающих с вершин различных зубцов капелек располагаются внутри колец, разделенных пустыми промежутками. Боковая поверхность венца оказывается покрытой короткими капиллярными волнами, бегущими от шеврона к центру каверны. В начальной стадии контуры гребней и впадин волн отражают форму источника — шеврона. При этом фазовые поверхности коротких капиллярных внутренних волн пересекаются ниже зубцов под углом (рис.5,а). Появление вогнутых участков на внешней кромке венца отражает угловую неоднородность распределения скорости жидкости в венце, природа формирования которой нуждается в дальнейшем изучении.

В фазе стабилизации высоты венца линейчатый характер распределения окраски сохраняется, но наряду с узкими штрихами на увеличенном изображении можно видеть и диффузно окрашенные широкие полосы (рис.5,б). Фазовые поверхности капиллярных волн смыкаются в единую кольцевую систему.

В стадии расплывания на поверхности венца помимо первоначальных линейчатых структур проявляются сверхтонкие волокна и группы сверхкоротких капиллярных волн (рис.5,в). При этом картина основной группы кольцевых капиллярных волн выравнивается, но характер распределения вещества капли по поверхности венца остается дискретным.

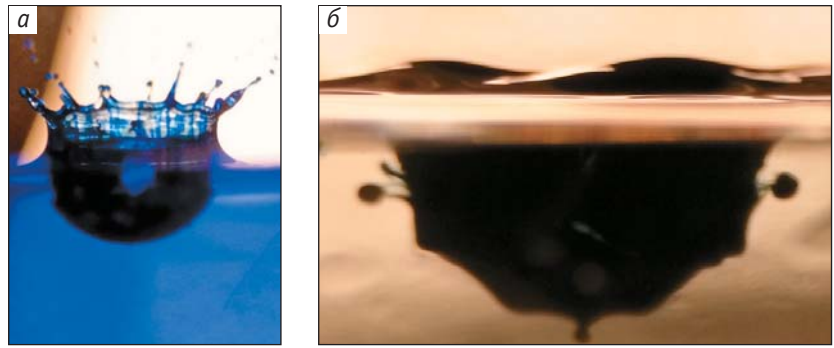


Рис.4. Каверна и венец при погружении капли чернил в воду ($h_w = 30$ см, $D = 0.5$ см, $H = 40$ см: стадия роста (а) и поздняя стадия развития каверны с капиллярными волнами и вылетающими в толщу жидкости струйками (б).

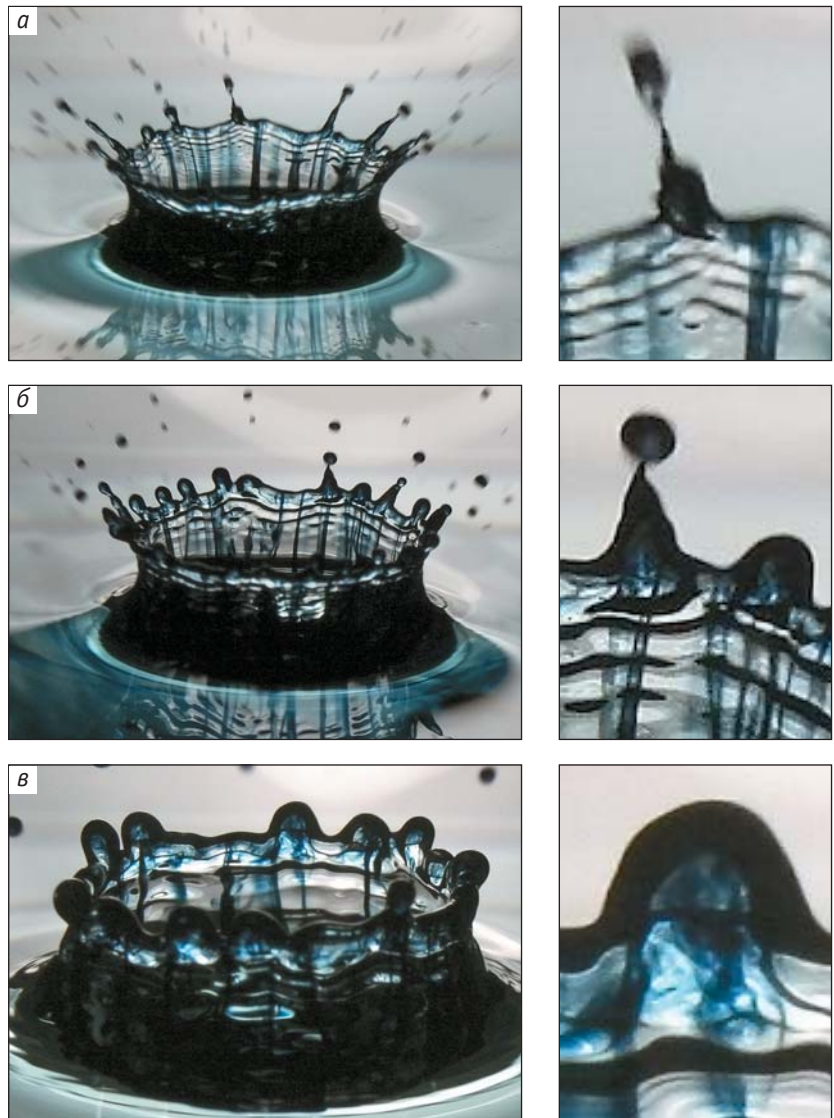


Рис.5. Линейчатое распределение вещества капли разбавленных чернил по стенке венца ($h_w = 4.5$ см, $D = 0.42$ см, $H = 48$ см): фазы роста (а), стабилизации высоты (б) и расплывания венца (в). Справа даны увеличенные в 4 раза центральные фрагменты изображения.

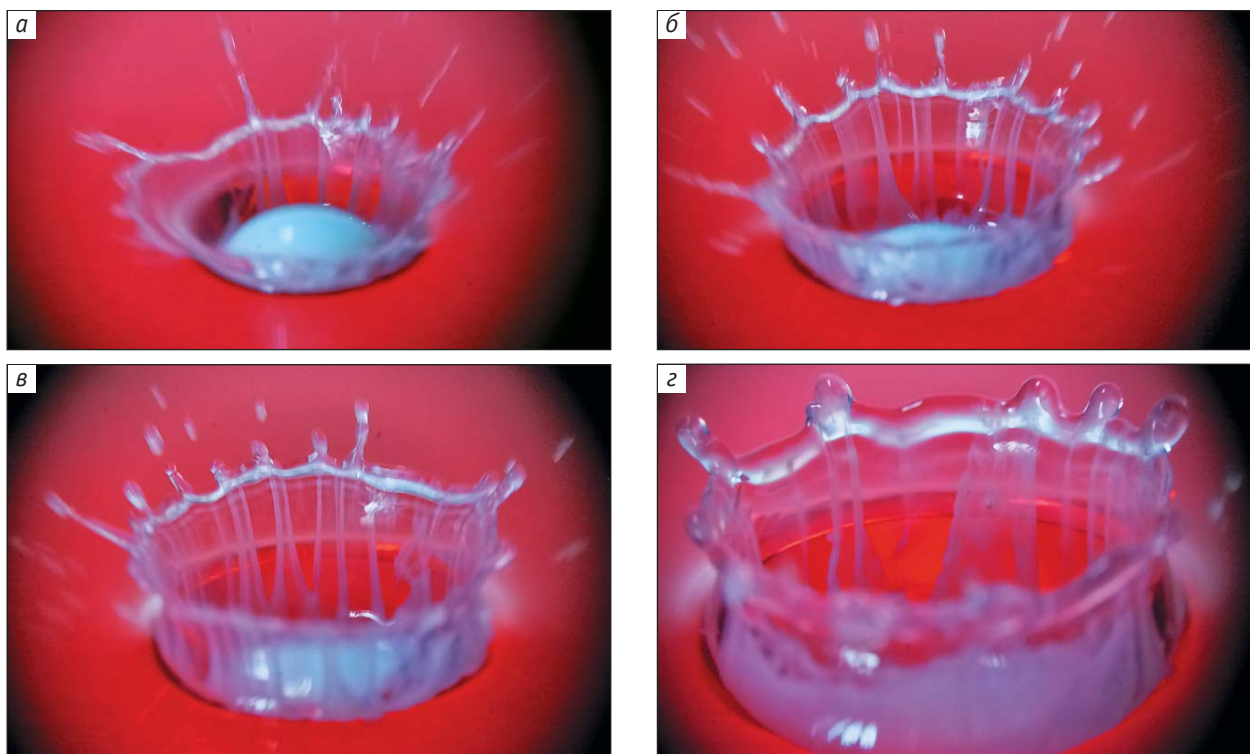


Рис.6. Динамика полосчатых структур на поверхности венца при падении капли молока (3% жирности) в подкрашенную воду ($h_w = 1.5$, $D = 0.37$ см, $H = 45$ см): $t = 0.3$ (а), 0.53 (б), 0.66 (в) и 3.1 (г) мс.

Качественные особенности картины течения — периодичность вылета брызг с вершин стримеров, линейчатый характер распределения вещества капли по поверхности венца — сохраняются и при погружении капли молока в воду, подкрашенную красными чернилами (рис.6). Здесь стенка раскрытого наружу венца более тонкая, чем у капли воды на рис.5, стримеры редкие и острые, вылетающие брызги быстрые, на что указывает длина штрихов на рис.6,а. Полосчатые структуры располагаются на стенках и венца, и каверны, где они контактируют с плотно окрашенным остатком погружающейся капли.

Длина волокон растет в фазе углубления каверны и роста венца, который постепенно, по мере выпрямления стенок, принимает цилиндрическую форму (рис.6,б). При этом увеличивается степень изрезанности его шеврона. Вследствие расщепления толстых прядей на тонкие волокна растет и число волокон, которые не прерываются на всей боковой поверхности венца. Окрашенные полоски на стенках каверны расширяются в области контакта с остатком погружающейся капли. В картине распределения брызг отчетливо выделяется кольцевая щель между последовательно вылетающими группами капелек.

В стадии максимальной высоты верхняя кромка венца начинает утолщаться и стягиваться внутрь под действием сил поверхностного натяжения (рис.6,в). На дне каверны просматриваются

остатки капли молока. Зубцы также утолщаются, с их вершин вылетают все более крупные и медленные капельки. Волоконные структуры прослеживаются по всей высоте поверхности венца.

В начале стадии спадания венца его наружная поверхность в нижней части оказывается покрытой сплошным слоем молока (рис.6,г). Однако на внутренней поверхности по-прежнему прослеживаются отдельные волокна — как изолированные, так и собранные в группы. Волокна доходят до остатков расплывающихся зубцов и свернутой наружной кромки.

Несколько иной вид имеют распределения растворимой краски и молока по дну каверны (рис.7). Окрашенные молоком волокна вокруг остатка погружающейся в воду капли молока образуют на дне каверны сетку с выраженной зональной структурой (рис.7,а), внешний ряд которой на стенках венца состоит из вытянутых волокон. Следующий кольцевой ряд, лежащий уже на дне каверны, составляют вытянутые четырехугольники, которые контактируют с менее регулярными элементами — четырех- и пятиугольниками. Последний ряд примыкает к кусочно-гладкой границе остатка капли.

После полного погружения остатка капли все дно каверны оказывается покрытым сеткой, в которой выделены несколько кольцевых ярусов многоугольников, включающих треугольные, четырехугольные и пятиугольные элементы. Длина

волокон — границ ячеек сетки — лежит в диапазоне от 0.3 до 1.3 мм и убывает к центру течения (рис.7,б). Толщина волокон составляет 0.24 мм на нижнем и 0.47 мм на верхнем ярусе, размеры ячеек — от 0.3 до 2 мм. По мере роста каверны и расплывания венца увеличиваются и размеры ячеек внешнего ряда (рис.7,в). Отдельные окрашенные прослойки видны и на внешней кромке венца.

Сетка, образованная окрашенными молоком волокнами, сохраняется и в фазе растекания венца (рис.7,з), причем даже здесь отдельные волокна прослеживаются вплоть до шеврона (в верхней части изображения). Неровная наружная поверхность венца окружена системой капиллярных волн, формы гребней которых повторяют контуры линии контакта венца с принимающей жидкостью.

Дальнейшее усложнение картины течения наблюдается в фазе расплывания венца и формирования центральной кумулятивной струи, с вершины которой выбрасывается одна или несколько вторичных капель. Детали тонкой структуры течения позволяют визуализировать наблюдения при различных положениях линии визирования. На фотографии в традиционной ориентации (сбоку и сверху) видно, что наклонная поверхность пьедестала вырастающей струйки, с вершины которой выбрасывается капля, выглядит шероховатой с полосчатой ребристой микротекстурой (рис.8,а). Угловатая форма светлой линии, окружающей конический пьедестал, указывает на отсутствие непрерывной аксиальной симметрии течения. На неровном дне остатка каверны округлые впадины разделяют заостренные гребни. Фазовые поверхности расходящихся капиллярных волн рассечены разрывами, располагающимися вдоль радиальных и наклонных линий.

Капля, вылетающая с вершины струйки, сравнима по объему с исходной, падающей в жид-

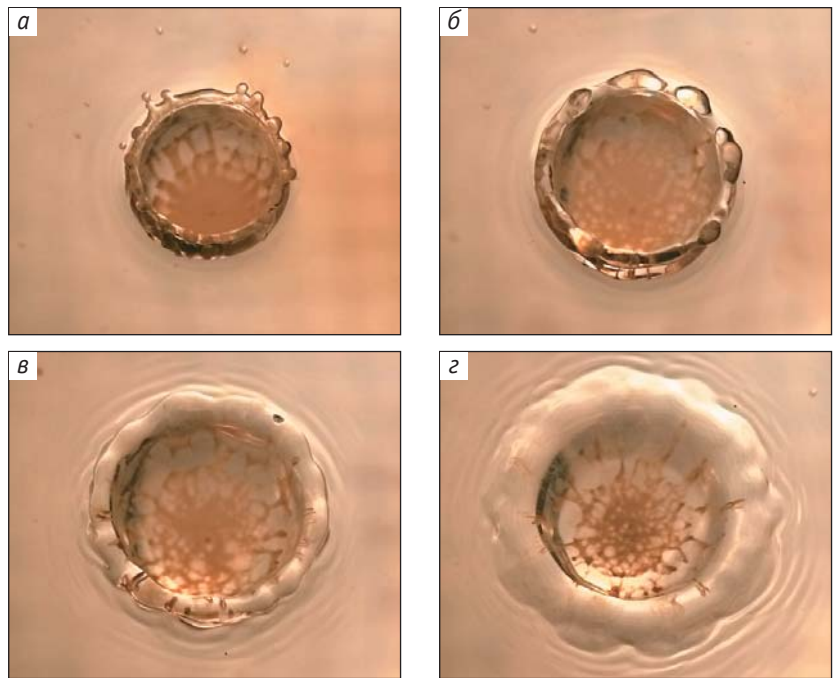


Рис.7. Динамика сетки из волокон в картине распределения молока по дну каверны в воде, вид сверху ($h_w = 15$ см, $H = 47$ см, $D = 0.41$ см): $t = 5$ (а), 10 (б), 18 (в) и 28 (з) мс.

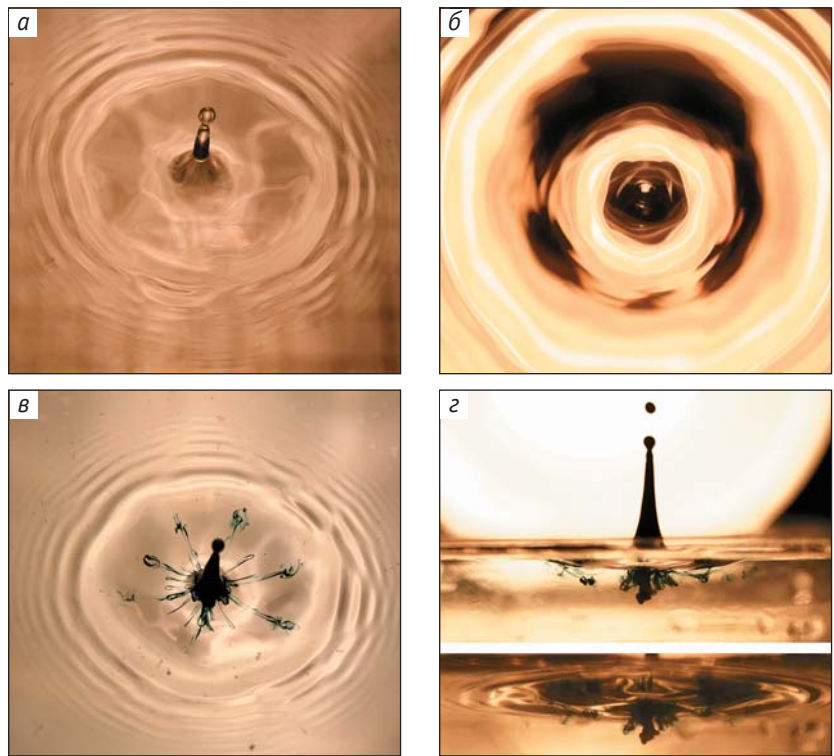


Рис.8. Картины всплеска: кумулятивная струя, выбрасывающая вторичную каплю (а); вид снизу на граненый пьедестал струи и систему кольцевых капиллярных волн (б); вид сверху на кумулятивную струю с прилегающими наклонными петлями и радиальными струйками (в); вид сбоку и снизу на окрашенную кумулятивную струю и остатки прилегающей каверны сложной формы с провалами и ребрами (з).

кость. Круговая линия контура центральной капли располагается в центре пятиугольника с выраженными ребрами, как показывает рис.8,б (вид снизу). Угловатость форм сохраняется и в контурах ближайших к струйке коротких капиллярных волн, и на более удаленных, располагающихся на остатке венца.

Растущую кумулятивную струю, плотно окрашенную чернилами капли, окружает достаточно регулярная система из семи двойных радиальных струек, завершающихся небольшими окрашенными колечками. Под пьедесталом струи располагается система наклонных вихревых петель, плотность которых увеличивается по мере приближения к ее границе (рис.8,в). Непосредственно под кумулятивной струйкой окрашенная жидкость образует сложную систему наклонных струек и петель (рис.8,г). Обращает внимание отличие четких форм элементов течения в воздушной среде и сложное распределение окрашенной жидкости капли в толще жидкости.

В последнем случае в поле зрения фотоаппарата одновременно со струйкой попадает и изображение свободной поверхности, которое приводится в нижней части рис.8,г. Здесь выделены светлая линия контакта струйки с ложбиной, протяженные вершины ребер и темные впадины, а также отдельные окрашенные струйки неправильной формы и сложная система капиллярных волн.

Сопутствующий саундтрек

Анализ синхронизированных аудио- и видеogramм показал тесную связь гидродинамических и акустических процессов, инициированных падением капли в жидкость. Излучение звуковых пакетов привязано к максимальным значениям ускорения движения границы каверны и отрыву газовых полостей (рис.9).

Сопоставим временные зависимости глубины z , скорости v_z и ускорения a движения кромки дна каверны (кривые 1–3 в верхней части рис.9) с фонограммой гидрофона (нижняя часть рисунка): оказывается, излучение звуковых пакетов синхронизовано с резким увеличением ускорения. В данном эксперименте наблюдается два экстремума скорости и ускорения при $t = 163$ и 198 мс, с которыми синхронизованы два звуковых пакета (II и III), следующие за ударным импульсом I.

Ударный импульс I на фонограмме рис.9, который излучается в момент первичного контакта капли с поверхностью (врезка *a*), имеет нерегулярный характер, его уровень и частота существенно меняются от опыта к опыту. На спадающем участке сигнал осциллирует с частотой, монотонно уменьшающейся в диапазоне от 110 до 80 кГц (вставка во врезке *a*). Далее в течение продолжительного интервала (до 150 мс) заметная акустическая активность отсутствует.

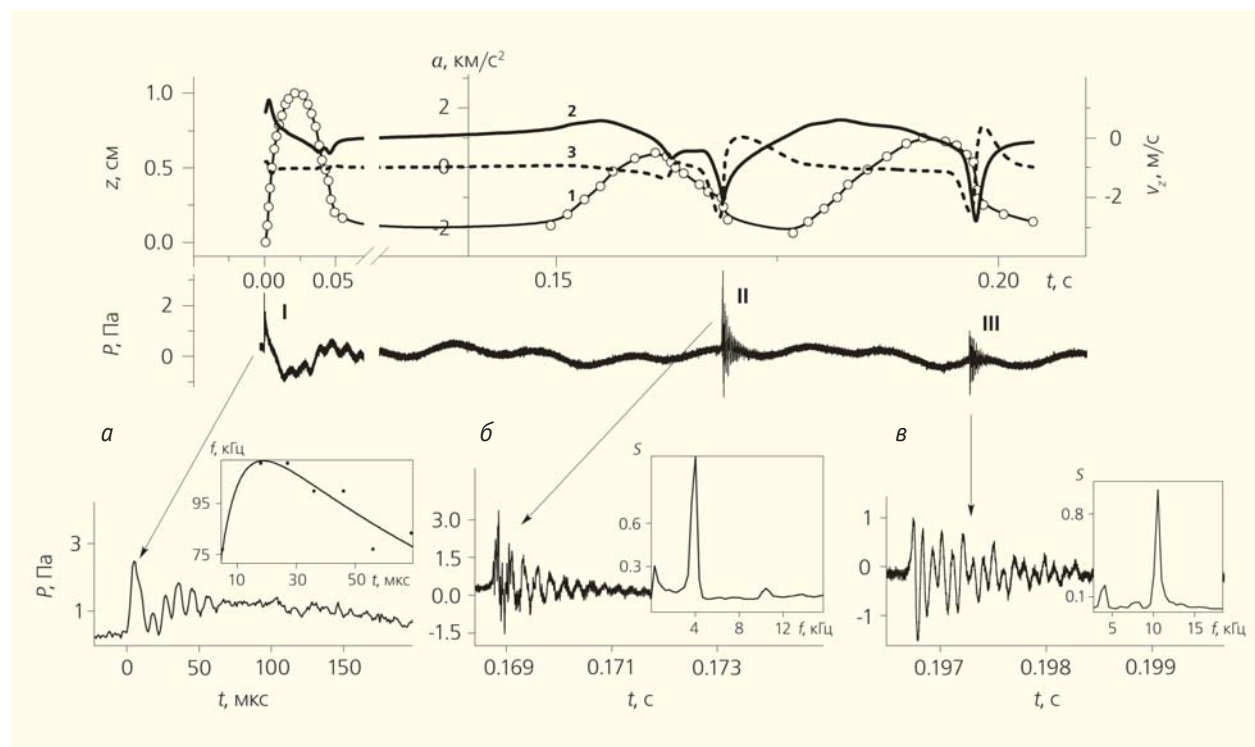


Рис.9. Глубина z (1), вертикальная скорость v_z (2), ускорение a (3) дна каверны и фонограмма подводного звукового давления P с развертками звуковых пакетов и их спектрами (вставки) на врезках (*a*, *б*, *в*). $H = 50$ см, $D = 0.5$ см, $U = 2.9$ м/с, $We = 570$, $Bo = 3.3$, $Fr = 170$, $Re = 14500$. Скорость съемки 10000 кадров/с.

Глубина каверны, отсчитываемая от уровня невозмущенной поверхности до нижней точки каверны, плавно растет в процессе слияния капли, а затем так же плавно уменьшается (кривая 1). Наблюдаемые осцилляции связаны с моментами, когда над гидрофоном проходят гребни/впадины капиллярных волн и остаток венца.

Вслед за стадией роста кумулятивной струи, отрыва капли с ее вершины и погружения в жидкость (где сохраняются ранее сформировавшиеся приповерхностные течения) следует формирование новой каверны, повторяющей в общих чертах эволюцию первичной. Ее глубина (кривая 1), скорость и ускорение также меняются плавно, и, как следует из видеогаммы, каверна сохраняет свою целостность.

Резкое уменьшением глубины каверны, когда скорость и ускорение достигают значений 1.5 м/с и 1 км/с² соответственно, происходит в конце данной фазы при $t = 168$ мс. На видеокдрах в этот момент наблюдается разрыв цилиндрической перемычки, связывающей газовый пузырь с каверной, в ходе которого формируются быстро исчезающие конические заострения. Одновременно на фонограмме гидрофона возникает звуковой пакет II, амплитуда которого монотонно спадает в течение 3 мс (врезка б). В спектре сигнала доминирует частота 4 кГц (вставка на врезке б). Излучение звука прекращается, когда полость приобретает сглаженную форму.

Погружающаяся вторичная капля порождает новую каверну, от дна которой в момент резкого увеличения скорости (до 3 м/с) и ускорения (до 2 км/с²) при $t = 197$ мс отделяется следующая газовая полость. В этот же момент на фонограмме появляется пакет III продолжительностью 3 мс (врезка в), с основной частотой 11 кГц и менее выраженным пиком на 4.5 кГц (вставка на врезке в).

Глазами теоретика

Особенности действия механизма выброса стримеров и быстрых брызг, формирования линейчатых картин распределения вещества капли по поверхности каверны и венца, возбуждения колебаний отрывающихся газовых полостей, поясняет анализ фундаментальной системы уравнений механики жидкостей [10]. Входящие в нее уравнения описывают перенос вещества (плотности ρ и массы M), вектора импульса \mathbf{p} , концентрации растворенных веществ N_i и полной энергии E_{tot} , которая включает кинетическую энергию движения E_{kin} , потенциальные энергии $E_{\text{пот}} = E_{\sigma} + E_g$ (гравитационную E_g и поверхностную $E_{\sigma} = \sigma^2 \Delta S$, вариация которой обусловлена изменением площади свободной поверхности ΔS), а также внутреннюю энергию ϵ [11]. Все базовые переменные независимы и характеризуются собственными пространственными картинками.

Анализ фундаментальной системы с учетом условия совместности, определяющего ее ранг, показывает, что течения характеризуются обширными наборами пространственных и временных масштабов, значения которых зависят от свойств среды (плотности, вязкости, диффузии компонент), вида, геометрии и энергетике течений [12]. Чтобы дать представление о сложности задачи, перечислим взаимосвязи между различными величинами.

В полном описании среда, наряду с динамическими уравнениями, характеризуется термодинамическим потенциалом, производные которого определяют физические величины (плотность, давление, температуру и др.). В данной задаче удобно использовать свободную энтальпию (потенциал Гиббса G). Дифференциал потенциала G в толще однородной жидкости I $dG_I = -sdT + VdP$ определяется

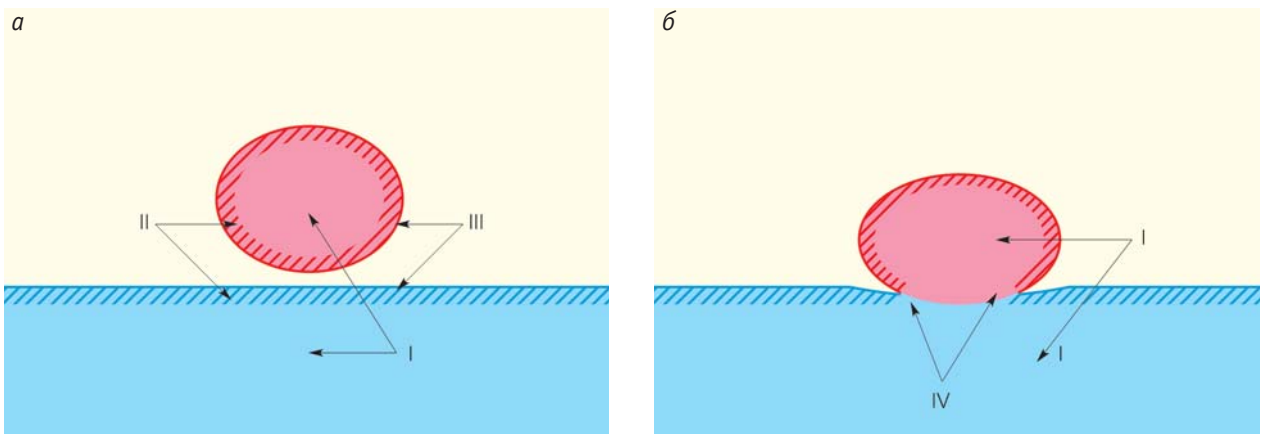


Рис.10. Компоненты системы, обладающие разными термодинамическими потенциалами: I — толща жидкости; II — приповерхностный слой толщиной в молекулярный кластер; III — граница раздела (поверхность молекулярного контакта жидкости с газовой фазой); IV — двухслойная среда, область соприкосновения приповерхностных слоев, в которой доступная поверхностная потенциальная энергия трансформировалась во внутреннюю энергию и энергию интенсивных тонких течений. Показаны полет капли (а) и начало процесса слияния (б).

локальными дифференциалами температуры T и давления P , здесь s — энтропия, $V = 1/\rho$ — удельный объем, ρ — плотность (рис.10,а). В многокомпонентной среде потенциал Гиббса дополнительно зависит от μ_i — химического потенциала и dN_i — концентрации i -го вещества: $dG = -sdT + VdP + \mu_i dN_i$.

При подходе к границе фаз в приповерхностном слое II толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_c \sim 10^{-6}$ см анизотропия сильных атомно-молекулярных взаимодействий порождает как силы поверхностного натяжения, минимизирующие площадь поверхности капельных жидкостей S_f , так и доступную потенциальную поверхностную энергию $E_\sigma = \sigma S_f$, которую учел Дж.Гиббс в выражении для свободной энтальпии $dG_{II} = -sdT + VdP + \sigma dS_f$ еще в конце XIX в. [13].

Непосредственно на границе жидкой и газовой фазы III толщиной в несколько молекулярных слоев $\delta_m \sim 10^{-8}$ см несбалансированность взаимодействий настолько велика, что может вызвать расщепление молекул воды на ионные составляющие. Такая среда дополнительно характеризуется собственными химическими потенциалами компонент μ_k с дифференциалами концентраций dN_k в выражении для потенциала Гиббса $dG_{III} = -sdT + VdP + \mu_k dN_k + \sigma dS_f$. Состав и распределение веществ и зарядов на поверхностях соприкасающихся сред, в частности воды и воздуха, пока изучены недостаточно полно.

Что же показывают расчеты?

Падающая капля (с параметрами ρ , M , \mathbf{p} , $E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + \epsilon + E_\sigma$), которая вносит в принимающую среду вещество, импульс и энергию (кинетическую E_{kin} , внутреннюю ϵ и доступную потенциальную поверхностную E_σ), формирует комплекс взаимообусловленных процессов. Кинетическая энергия $E_{\text{kin}} = MU^2/2$ и импульс $\mathbf{p}_a = M\mathbf{U}$, равномерно распределенные в объеме капли $V = \pi D^3/6$, вносятся в принимающую жидкость пропорционально погруженному объему. При этом вертикальная компонента импульса быстро убывает, поскольку энергия движения расходуется на формирование течений и увеличение гравитационной потенциальной энергии в возмущенной среде.

Сравнения величин кинетической и поверхностной потенциальной энергии капли воды диаметром $D = 0.42$ см, падающей в воду со скоростью $U = 2.5$ м/с, показывают, что основную долю (более 97%) составляет кинетическая энергия движения ($E_{\text{kin}} = 120$ мкДж, потенциальная поверхностная энергия $E_\sigma = 4$ мкДж, $E_{\text{kin}}/E_\sigma = 30$). Однако плотность доступной потенциальной поверхностной энергии $W_\sigma = 3 \cdot 10^6$ Дж/м³ существенно выше, чем кинетической $W_{\text{kin}} = 3 \cdot 10^3$ Дж/м³, $W_{\text{kin}}/W_\sigma = 10^{-3}$ в силу ее концентрации в тонком слое II.

При первичном контакте капли, которая падает со скоростью ~ 1 м/с, с принимающей жидкостью

молекулярный поверхностный слой уничтожается за время $\sim 10^{-10}$ с, а приповерхностный толщиной δ_c — область первичного слияния IV — за $\sim 10^{-8}$ с. Возникающий скачок давления складывается с давлением торможения и ускоряет тонкий слой слившихся жидкостей. Под действием избыточного давления, локализованного в тонкой области, формируется разлетающаяся пелена, и вещество капли разгоняется по дну каверны. Именно поэтому скорость капелек, вылетающих с вершин стримеров на кромке пелены, на порядок и более превосходит скорость падающей капли. Размеры области избыточного давления со временем увеличиваются, соответственно растут и толщина пелены, и диаметры капелек, все медленнее вылетающих с вершин стримеров.

При первичном контакте капли свободная поверхность III и слой II уничтожаются одновременно по всей площади пятна соприкосновения падающей капли и принимающей жидкости. На более поздних стадиях (продолжительностью более 10^{-4} с) доступная потенциальная поверхностная энергия из исчезающих приповерхностных слоев II преобразуется в возмущения давления, температуры и скорости в скользящем кольце контакта жидкостей (рис.10,б).

Вначале внешняя кромка области слияния сред IV (кольцевая граница клиновидного слоя вытесняемого воздуха) быстро движется наружу, затем останавливается и после погружения половинки капли начинает смещаться внутрь, к центру каверны. Здесь она контактирует с возмущенной средой (длительность процесса слияния капли составит несколько миллисекунд). При этом в принимающей жидкости возникают интенсивные мелкомасштабные течения, определяющие формирование, отрыв и перемещения газовых пузырьков.

Сходные процессы происходят и при отрыве газовых пузырьков, когда освобождение доступной потенциальной поверхностной энергии происходит в смыкающихся конических областях, которые образовались после разрыва газовой перемычки [14]. Основные различия параметров звуковых пакетов обусловлены вариациями размеров образующихся газовых полостей первоначально неправильной формы. При неизменных условиях оказываются разными одноименные свойства излучаемых акустических пакетов — амплитуда, частота заполнения, длительность, значения которых определяются геометрией контактирующих поверхностей и динамикой скрытых течений.

В целом попадающая в жидкость капля инициирует еще более сложный комплекс взаимосвязанных явлений — уничтожения, деформации, образования и уничтожения новых контактных поверхностей, формирования течений и вихрей, групп капиллярных и акустических волн. Одновременно в среде идут макро- и микроскопиче-

ские процессы перераспределения вещества, переноса импульса, взаимной трансформации потенциальной, кинетической и внутренней энергии, каждый из которых характеризуется собственным набором пространственных и временных масштабов. Продолжительность быстрых процессов, в частности исчезновения свободных поверхностей, не превышает долей микросекунды. Высокая плотность энергии в тонких прослойках способствует формированию тонкоструктурных высокоскоростных течений в приповерхностном слое, опережающих более медленные течения увлеченной принимающей жидкости. Чередование быстрых и медленных струек проявляется в причудливости картин распределения вещества с выраженной волокнистой структурой.

Затухая, сравнительно медленные волновые и вихревые процессы оставляют в толще жидкости долгоживущие циркуляционные течения, по-

степенно преобразующие планарные приповерхностные структуры в трехмерные струйки, петли и вихревые кольца. После затухания быстрых компонент тонко структурированные картины распределения примесей перестраиваются в волокнистые трехмерные вихревые кольца, которые продолжают изучаться с середины XIX в. [1].

* * *

В заключение хотелось бы выразить надежду, что автору удалось продемонстрировать тесные связи атомно-молекулярных и макроскопических процессов, завязанных в общий узел феноменом падающей капли. Гидродинамика и акустика последней представляются своего рода общедоступной лабораторией для детализации этих связей, дальнейшее изучение которых позволит решить важные теоретические и технологические проблемы. ■

Литература

1. Rogers W.B. On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // American Journal of Science and Arts. Second Series. 1858. V.26. №77. P.246–258.
2. Reynolds O. On the action of rain to calm the sea // Scientific Papers on Mechanical and Physical Subjects. 1900. V.1. P.86–88.
3. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М., 1973.
4. Христианович С.А., Родионов В.Н. О подъеме облака атомного взрыва. М., 1954 [отчет Акад. наук СССР, Ин-т хим. физики].
5. Worthington A.M. The splash of the drop. Series «The romance of science». N.Y.; L., 1895 [последнее издание: Worthington A.M. The Splash of the Drop. Гамбург, 2012].
6. Prosperetti A., Oguz H.N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain // Annu. Rev. Fluid Mech. 1993. V.25. P.577–602.
7. Franz G.J. Splashes as sources of sounds in liquids // J. Acoust. Soc. Amer. 1959. V.31. №8. P.1080–1096.
8. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика контакта падающей капли со свободной поверхностью жидкости // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. №2. С.3–12.
9. Чашечкин Ю.Д. Структура и динамика природных течений: теоретическое и лабораторное моделирование // Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. М., 2015. С.63–78.
10. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Структура первичного звукового сигнала при столкновении свободно падающей капли с поверхностью воды // ЖЭТФ. 2016. Т.149. №4. С.864–875.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.6: Гидродинамика. М., 2006.
12. Cbashechkin Yu. D. Differential fluid mechanics — harmonization of analytical, numerical and laboratory models of flows // Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. Springer Series «Computational Methods in Applied Sciences». 2016. V.40. P.61–91.
13. Гиббс Дж.В. О равновесии гетерогенных веществ. Термодинамические работы. М.; Л., 1950.
14. Прохоров В.Е., Чашечкин Ю.Д. Генерация звука при падении капли на поверхность воды // Акустический журнал. 2011. Т.57. №6. С.792–803.

Нанокристаллы с антистоксовой флуоресценцией на пути в медицину

А.Н.Генералова, В.П.Зубов, Е.В.Хайдуков

В медико-биологических исследованиях часто требуется визуализировать различные биоспецифические реакции, биоткани и их элементы на разном масштабном уровне, для чего приходится прибегать к специальным ухищрениям. Так, для гистологического анализа срезы образцов подкрашивают; в рентгенологии применяют контрастирующие вещества; нашли свое место в качестве меток-маркеров и радиоактивные изотопы. А начиная с середины XX в. стали широко использоваться методы, основанные на регистрации флуоресценции.

Сигнализирует свет

Флуоресценция — возникновение в веществе быстрозатухающего излучения в результате внешнего воздействия, одна из разновидностей люминесценции. Последним термином описывают все явления излучения, вызванного возбуждением газов, жидкостей и твердых тел различными факторами. Так, например, при некоторых химических реакциях возникает хемилюминесценция. Есть вещества, которые испускают свет под воздействием электрического тока (*электролюминесценция*), γ -излучения (*радиолюминесценция*) и т.д. Нас здесь будет интересовать *фотолюминесценция* —

© Генералова А.Н., Зубов В.П., Хайдуков Е.В., 2016



Алла Николаевна Генералова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Полимеры для биологии» Института биоорганической химии имени Ю.А.Овчинникова и М.М.Шемякина РАН. Область научных интересов — синтез дисперсий полимерных частиц, биоаналитические реагенты, поверхностная модификация нанокристаллов.



Виталий Павлович Зубов, доктор химических наук, заведующий той же лабораторией, профессор Московского технологического университета. Специалист в области синтеза и химических реакций полимеров, биополимеров, полимерсодержащих материалов для медицинской диагностики и биосепарации.



Евгений Валерьевич Хайдуков, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики поверхности и лазерно-плазменных процессов Института фотонных технологий Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН. Занимается оптикой, лазерной физикой, нанотехнологиями для биомедицинских применений.

Ключевые слова: нанокристаллы, антистоксовая фотолюминесценция, биоанализ, оптическая визуализация, фотодинамическая терапия.

Key words: nanocrystals, anti-Stokes photoluminescence, bioassay, optical visualization, photodynamic therapy.

свечение под действием света. Атомы, молекулы и молекулярные комплексы, способные флуоресцировать, называют флуорофорами.

Физическая природа флуоресценции связана с поглощением фотонов определенной энергии и переходом электронов в флуорофоре из основного состояния в возбужденное, с более высокой энергией. Возбужденное состояние нестабильно, и электроны быстро возвращаются на исходный энергетический уровень. Происходить это может несколькими путями: как за счет безызлучательных квантовых переходов, так и сопровождаясь излучением света — это и есть флуоресценция. Чтобы она наблюдалась, вещество должно обладать дискретным энергетическим спектром (с наличием запрещенных интервалов энергии), а вероятность излучательных переходов между уровнями должна быть больше, чем безызлучательных. Поскольку перед переходом электронов в основное состояние обычно протекают релаксационные процессы, высвечивается не вся поглощенная энергия (есть и «непроизводительные» потери). В итоге энергия излучения оказывается меньше поглощенной и спектр флуоресценции флуорофора всегда находится в более длинноволновой области по сравнению со спектром поглощения. Это явление получило название «стоксов сдвиг».

Современные методы регистрации позволяют засечь излучение даже единичного (!) атома в газе, и по своей чувствительности фотOLUMИНЕСЦЕНТНЫЕ методы оказываются абсолютными рекордсменами, превосходя методы детектирования, которые базируются на поглощении света или использовании радиоактивных меток [1].

Чтобы реализовать преимущество флуоресцентных методик в биологии, следует использовать флуоресцентные метки, которые характеризуются высокой чувствительностью, фотостабильностью, нетоксичностью, биосовместимостью и, наконец, минимальными размерами (чтобы давать информацию с максимальным пространственным разрешением). Метки должны иметь высокий квантовый выход (отношение числа испускаемых и поглощенных фотонов), а также сохранять химическую, физическую и коллоидную устойчивость в процессе биореакций. И, что немаловажно, надо позаботиться об адресной доставке этих меток к целевым объектам — обеспечить каким-то образом их специфическое маркирование, что совсем нетривиально, особенно для живых организмов.

Сегодня в качестве таких флуоресцентных меток нашли широкое применение органические красители и флуоресцентные белки. Эти метки имеют ряд преимуществ: малый размер, хорошую биосовместимость, простую процедуру доставки (комплексы с изучаемыми биомолекулами получить легко) плюс достаточно высокую интенсивность флуоресценции. Но их применение ограничено тушением флуоресценции (ее ослаблением из-за присутствия примесей) и химической неста-

бильностью. Кроме того, пик поглощения их весьма узок (т.е. нужно специально подбирать источники возбуждающего света) и расположен близко к широкому и несимметричному пику эмиссии (что осложняет интерпретацию результатов) [2].

Поэтому есть смысл в том, чтобы вернуться к неорганическим веществам. Здесь перспективными оказываются полупроводниковые нанокристаллы, известные как квантовые точки (КТ), что подчеркивает их минимальный размер. Примерами таких КТ служат CdSe, CdTe, CdS, ZnSe и другие нанокристаллы соединений II и VI групп. Ряд их характеристик заметно выигрывает по сравнению с органическими флуоресцентными метками: они обладают высоким квантовым выходом, превосходной фотостабильностью, узким пиком эмиссии флуоресценции и широким спектром возбуждения, позволяющим использовать единый источник излучения для всех КТ. Нанокристаллы получают в среде органических растворителей, поэтому для использования в биоанализе поверхность КТ модифицируют соединениями, чаще всего полимерами, которые делают КТ вододиспергируемыми, содержащими функциональные группы на поверхности. Наличие таких групп позволяет получать комплексы с биомолекулами. Уникальна возможность регулировать спектральную область флуоресценции, просто изменяя диаметр и химический состав КТ. Однако использование КТ в длительных исследованиях затруднено: к сожалению, им присущи цитотоксичность и химическая нестабильность [3].

Возбуждается флуоресценция органических и неорганических меток, традиционно используемых в биологии, с помощью источников видимого или УФ-света, что приводит к значительным ограничениям. Свет от таких источников имеет небольшую глубину проникновения в ткани, способен вызывать повреждение биомолекул при долговременном облучении и, самое главное, характеризуется значительным сигналом фона, который связан с флуоресценцией самих биологических тканей (автофлуоресценцией) в УФ-области. Поэтому задача поиска новых флуоресцентных меток, для которых отсутствует неспецифический сигнал фона, а также существует возможность получать неинвазивные изображения внутренней структуры биологических объектов, по-прежнему актуальна. Этим требованиям отвечают метки, которые излучают под действием света из длинноволновой области спектра (ИК-диапазона).

Нанокристаллы-апконверторы

Современный уровень развития науки позволил создать особый класс флуоресцентных наночастиц, перспективных для задач оптической визуализации биотканей в живом организме, — нанокристаллы с антистоксовой фотOLUMИНЕСЦЕНЦИЕЙ (НАФ). Название подразумевает, что для их возбуждения тре-

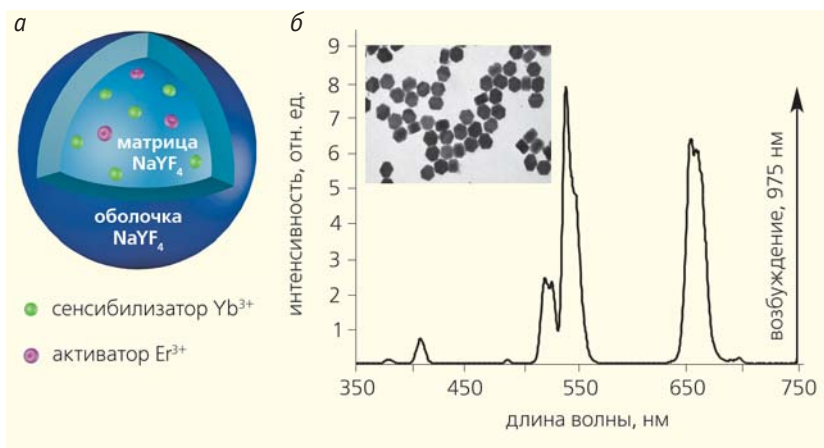


Рис.1. Схематическое изображение НАФ (а) и характерный спектр флуоресценции $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ при возбуждении излучением на длине волны 975 нм (б); на вставке приведено изображение этих наночастиц в просвечивающем электронном микроскопе.

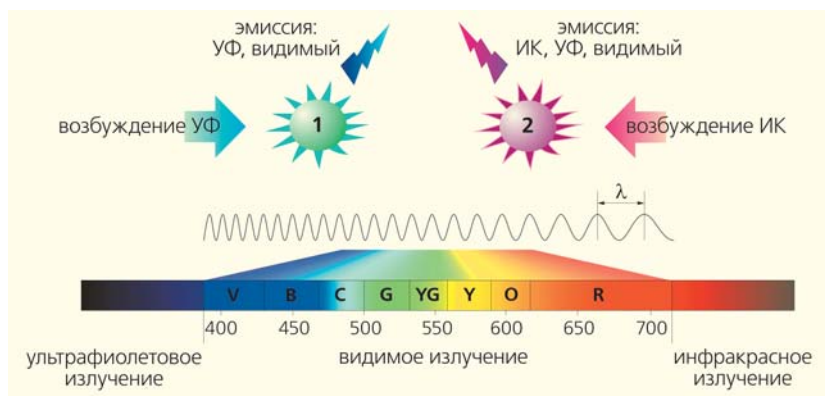


Рис.2. Схема возбуждения флуоресценции «стандартных» меток (1) и «ап-конвертирующих» нанокристаллов (2).

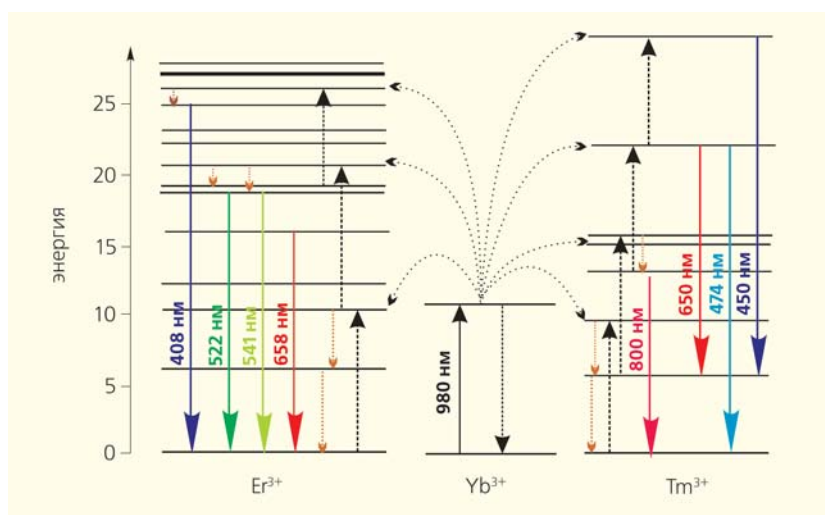


Рис.3. Диаграмма энергетических уровней, объясняющая механизм ап-конверсии в кристаллах $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{Tm}^{3+}$ и $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{Er}^{3+}$ при возбуждении источником с длиной волны 980 нм.

бует источник света с большей длиной волны, чем длина волны ответной эмиссии. Такая флуоресценция не подчиняется правилу Стокса, которое утверждает обратное. Разумеется, антистокосово поведение не означает нарушения закона сохранения энергии: происходят коллективные процессы ее перераспределения. В данных нанокристаллах реализуется эффект так называемой ап-конверсии (от англ. up-conversion) [2], заключающийся в преобразовании излучения из ближнего ИК-диапазона в УФ- и видимый свет за счет протекания многофотонных (в данном случае двухфотонных) процессов. НАФ представляют собой кристаллическую неорганическую матрицу, легированную ионами трехвалентных редкоземельных металлов [4]. Самое широкое применение нашли, пожалуй, НАФ на основе матрицы тетрафториттриата натрия, солегированной ионами иттербия, которые отвечают за поглощение света (сенситизаторами) и эрбия ($\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$) или тулия ($\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$), обеспечивающими излучение (активаторами), рис.1.

В отличие от органических меток и КТ, они возбуждаются спектрально выгодным источником света с длиной волны 975–980 нм (рис.2). Выгодным, потому что последняя попадает в «окно прозрачности» биологической ткани (600–1300 нм), где обеспечивается глубокое проникновение света (в этом диапазоне поглощение и рассеяние минимальны). НАФ обладают узким пиком флуоресценции, что позволяет регистрировать сигнал, четко отличая его от автофлуоресценции биоткани. Кроме того, они характеризуются устойчивостью к фотовыцветанию, фото- и химической деградации, а также низкой токсичностью [5].

В НАФ преобразование энергии происходит в результате многоступенчатых процессов (рис.3), суть которых сводится к тому, что два возбужденных

иона перераспределяют коллективную энергию: один из них переходит на более высокий энергетический уровень за счет перевода другого в основное энергетическое состояние. Более конкретно, происходит следующее. Ион Yb^{3+} поглощает оптическое излучение инфракрасного диапазона на длине волны 980 нм, переходит в возбужденное состояние и безызлучательно передает полученную энергию соседним ионам Tm^{3+} или Er^{3+} , переводя в возбужденное метастабильное (т.е. относительно долгоживущее) состояние один из них. У всех трех ионов, как можно видеть на рисунке, есть очень близкие уровни, так что передача энергии происходит эффективно. Этот процесс может происходить неоднократно, и ионы Tm^{3+} или Er^{3+} будут «взбираться вверх» по лесенке уровней, пока наконец не «высветят» накопленную энергию. Возбужденный ион Tm^{3+} или Er^{3+} способен излучать фотоны с большей энергией в сравнении с ИК-фотонами накачки, т.е. в синем, зеленом, красном и ИК- (но с большей энергией) диапазоне спектра.

Как их получают...

Чтобы обеспечить у частиц химические и оптические свойства, подходящие для применения в различных биомедицинских исследованиях, нужно вооружиться стратегией синтеза НАФ высокого качества с контролируемым составом, формой и размером, а также с требуемой кристаллической фазой. Пока основных способов получения НАФ три.

Метод термического разложения основан на использовании в качестве прекурсоров металлоорганических соединений, которые разлагаются в высококипящих растворителях с добавкой поверхностно-активных веществ. Наиболее распространен метод термического разложения трифторацетата лантана в среде октадецена в присутствии стабилизаторов, таких как олеиновая кислота, олеиламин или триоктилфосфин оксид (они, как правило, содержат функциональную группу для координации металла и длинную углеводородную цепь для предотвращения агрегации образующихся наночастиц). Благодаря высокой скорости разложения прекурсора зарождение нанокристаллов происходит мгновенно, что позволяет получать монодисперсные наночастицы. Тщательно подбирая условия процесса (природу растворителя, концентрацию прекурсора и стабилизатора, температуру реакции), можно синтезировать нанокристаллы с исключительными (по величине квантового выхода, фотостабильности и т.д.) оптическими характеристиками [6].

Несмотря на то что этот метод оказался эффективным способом получения высококачественных НАФ, трудностей добавляют жесткие условия синтеза (безводная и бескислородная среда, продолжительное время и высокая температура реакции). Кроме того, при термическом разложе-

нии металлосодержащих трифторацетатов образуются побочные токсичные фторсодержащие и оксифторсодержащие соединения.

При «*созревании*» НАФ по *Оствальду* формирование нанокристаллов осуществляется за счет коалесценции (слияния) мелких частиц и роста более крупных, поскольку в этом случае происходит уменьшение площади поверхности, что выгодно энергетически.

Стратегия синтеза состоит в формировании аморфных частиц NaYF_4 малого диаметра при комнатной температуре с последующим ростом при повышенной температуре (300°C) за счет «созревания» (после термической обработки частицы приобретают кристаллическую структуру). Этот подход по сравнению с предыдущим позволяет проводить синтез относительно быстро, без образования токсичных побочных продуктов, используя более простой протокол [7].

Для самого же зарождения частиц требуется больше времени, чем при термическом разложении, поэтому структура кристалла НАФ получается с меньшим количеством дефектов и, соответственно, с улучшенными оптическими свойствами.

Гидро(сольво)термический метод — типичный синтетический подход, когда реакции протекают в герметичных условиях при высоком давлении и температуре. Его преимущества по сравнению с другими состоят в получении необходимых кристаллических структур НАФ при более низких температурах и в возможности проводить различные реакции в процессе синтеза. К недостаткам метода относятся необходимость использовать специальные реакционные сосуды и невозможность наблюдать за ростом частиц [8].

Все три представленных метода позволяют формировать НАФ в диапазоне диаметров 20–200 нм. Однако сравнительных исследований, как флуоресцентные свойства наночастиц зависят от способа получения, пока не проведено.

...и модифицируют

НАФ, синтезированные в органических растворителях при участии гидрофобных стабилизаторов, тоже оказываются гидрофобными, поэтому для использования в медико-биологических целях их надо модифицировать, чтобы получать так называемые гидрофилизированные реагенты (т.е. реагенты, которые могут быть гомогенно диспергированы в водной среде). Кроме того, они должны быть биосовместимыми и не агрегировать в условиях биологического окружения (быть коллоидно-стабильными). На поверхности НАФ, к сожалению, отсутствуют функциональные группы, необходимые для формирования прочной связи с нацеливающими биомолекулами для адресной доставки. Устранению этого недостатка также служит модификация поверхности НАФ.

К настоящему времени опубликовано уже много работ, посвященных методам модификации НАФ. По существу, везде реализуются три следующих основных подхода (рис.3) [9].

Во-первых, используют *бифункциональные биосовместимые соединения, способные замещать молекулы стабилизатора* (например, той же олеиновой кислоты), таким образом, чтобы гидрофильные группы этих соединений после присоединения к НАФ оказались бы обращены (говорят: «экспонированы») в водную фазу, что обеспечивает гидрофильность нанокристаллов (рис.4, путь 1). Для этих целей нашел широкое применение целый ряд соединений — фосфат полиэтиленгликоля, а также кислоты: меркаптопропионовая, адипиновая, меркаптоянтарная, меркаптоундекановая, лимонная, себациновая.

Один из вариантов данного метода модификации, так называемый метод послойного осаждения (англ. layer-by-layer), включает последовательную адсорбцию противоположно заряженных полиэлектролитов на поверхность НАФ, свободную от стабилизатора (рис.4,а). Этот метод позволяет получать НАФ с различным зарядом поверхности (по знаку и величине) и толщиной покрытия, а заодно и вводить требуемые функциональные группы.

Гидрофильная оболочка также может быть сформирована из диоксида кремния, который биосовместим и оптически прозрачен. Модификацию НАФ в этом случае проводят при добавлении функционализованных силанов (3-аминопропилтриэтоксисилана, 2-ацетоксиметилтриэтоксисилана, 1-меркаптометилтриэтоксисилана и др.), гидролиз которых приводит к образованию оболочки и получению гидрофилизованных коллоидно-стабильных реагентов НАФ с функциональными группами (рис.4,б).

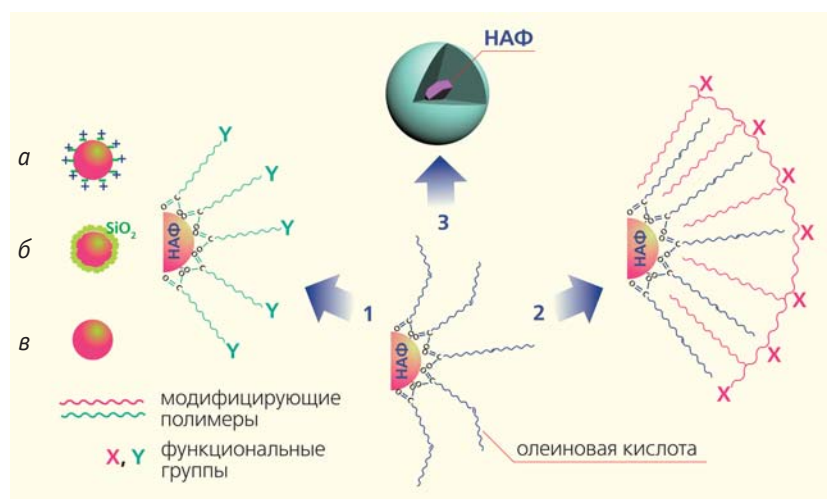


Рис.4. Способы модификации НАФ: 1 — с удалением стабилизатора, допускающий три варианта — адсорбцию противоположно заряженных полиэлектролитов (а), создание оболочки из диоксида кремния (б), без оболочки (в); 2 — без удаления стабилизатора; 3 — включение в частицы полимерной дисперсии.

Еще один вариант модификации — удаление стабилизатора с поверхности НАФ при участии неорганической кислоты без замещения каким-либо соединением. В результате получают НАФ с избыточным количеством атомов металлов на поверхности, которые могут формировать координационные связи с амино-, карбокси- или гидроксигруппами биологандов (рис.4,в).

Во-вторых, формируют *полимерный слой вокруг НАФ за счет проникновения гидрофобных фрагментов бифункциональных агентов в поверхностный слой олеиновой кислоты без удаления ее с поверхности НАФ* (путь 2). Здесь чаще всего применяют амфифильные полимеры: подход основан на гидрофобных взаимодействиях между фрагментами такого полимера и стабилизатора на поверхности НАФ. Гидрофильная часть амфифильного полимера, экспонированная в водную среду, обеспечивает коллоидную стабильность в условиях биологического окружения и содержит необходимые функциональные группы для присоединения нацеливающих биомолекул.

Модификация НАФ без удаления стабилизатора может быть также проведена за счет селективного окисления двойной связи олеиновой кислоты — при этом образуется гидрофильная азелаиновая кислота ($\text{HOOC}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$), которая делает НАФ вододиспергируемыми, с карбоксильными группами на поверхности, что позволяет формировать прочную связь с биомолекулами.

Наконец, НАФ можно включать в *частицы полимерных дисперсий* (путь 3). Этот подход реализуют, проводя осадительную полимеризацию акролеина в водно-щелочной среде в присутствии НАФ. В результате единичные нанокристаллы инкапсулируются в центре полиакролеиновых частиц, придавая тем флуоресцентные свойства, а активные альдегидные группы полиакролеина на поверхности могут легко взаимодействовать с аминогруппами белковых молекул [10].

Итак, перечисленные методы модификации НАФ, основанные на поверхностной химии, позволяют гидрофилизировать наночастицы и сделать их коллоидно-стабильными в водном растворе. И, что очень важно, подготовить «посадочные места» — специальные функциональные группы — для присоединения нацеливающих биомолекул.

Получить комплексы (конъюгаты) НАФ с последними совершенно необходимо для различных медико-биологических исследований, таких как биоанализ, визуализация опухолей, мультимодальная биовизуализация, фотодинамическая терапия.

Процесс получения конъюгатов осуществля­ют либо за счет физических сил, либо через об­разование ковалентной связи. В первом случае связь НАФ—биомолекула основана на электро­статических взаимодействиях или физической сорбции биомолекул. Такой способ получения конъюгатов довольно прост, но в живом орга­низме биомолекулы могут десорбироваться с поверхности НАФ в процессе циркуляции по кровеносной системе. При создании конъюга­тов посредством образования ковалентной свя­зи происходит взаимодействие функциональ­ной группы на поверхности НАФ и реакционно­способной группы нацеливающей биомолекулы. Используя описанные выше способы модифика­ции НАФ, можно получить различные функцио­нальные группы, такие как $-COOH$, $-NH_2$, $-SH$, способные вступать в реакцию конъюгации с белковыми молекулами, пептидами, ДНК, ле­карственными препаратами и др.

Ярмарка вакансий для НАФ

Задача **биоанализа** — определить наличие или концентрацию биомолекул (антител, пептидов, ДНК и т.д.), которые в этом случае носят название «аналит». Использование НАФ во флуоресцент­ных анализах имеет те преимущества, что уникальная природа этих нанокристаллов позволяет минимизировать фон от реакционной среды и условия проведения анализа (рН, температура, буфер и т.д.) не влияют на оптические свойства НАФ. Таким образом, анализ с их участием может быть реализован без потери чувствительности в самых различных средах — как в гетероген­ных, так и в гомогенных условиях (рис.5) [9].

Гетерогенный биоанализ, как правило, проводят путем форми­рования так называемой сэндвич-структуры (рис.5,а). Для этого биомолекулы, избранные для доставки НАФ, но не помеченные ими, сначала иммобили­зуют на твердой подложке с целью захвата определяемых молекул аналита. Когда вдоль под­ложки пропускают аналит, его молекулы связываются с функ­циональными группами биомо­лекул и закрепляются на поверх­ности. Затем добавляют те же специфические биомолекулы, но уже меченные НАФ (они тоже присоединяются к аналиту), ос­вещают их излучением накачки и по интенсивности сигнала флуоресценции определяют кон­центрацию аналита. В настоя­щее время разработаны различ­

ные тест-системы для проведения гетерогенного биоанализа с использованием НАФ, в частности для определения хорионического гонадотропина, наркотических средств, нуклеиновых кислот, бак­териальных патогенов.

Так удастся значительно повысить чувстви­тельность анализа по сравнению с традиционны­ми методами благодаря снижению фона, вызван­ного автофлуоресценцией среды. Например, пре­дел обнаружения хорионического гонадотропина человека при проведении анализа с участием НАФ в формате иммунохроматографического анализа на подложке составляет 10 пг, что в 10 раз превосхо­дит результаты, полученные с использованием на­ночастиц золота или латексных частиц [11].

Гомогенный биоанализ (рис.5,б) с участием НАФ основан на эффекте переноса световой энергии от донора (НАФ) к специально подбираемому акцеп­тору (органическому красителю и др.). Подобный пе­ренос возможен, если оба объекта размещены в не­посредственной близости друг от друга (расстояние не должно превышать в общем случае 10 нм), а спектр поглощения акцептора перекрывается со спектром эмиссии донора. Такие анализы могут быть реализованы в одностадийном процессе путем смешивания реагентов. Это значительно упрощает анализ, позволяет проводить его быстрее и в авто­матическом режиме, без многочисленных стадий сепарации и отмывки, характерных для гетероген­ного анализа.

Гомогенный анализ обычно проводят путем формирования сэндвич-структуры, в которой вза­имодействие донора и акцептора происходит че­рез молекулу аналита (донор и акцептор снабжа­ются специфическими биомолекулами, способ­ными формировать комплекс с молекулами ана­лита). Как правило, в растворе меченые донор

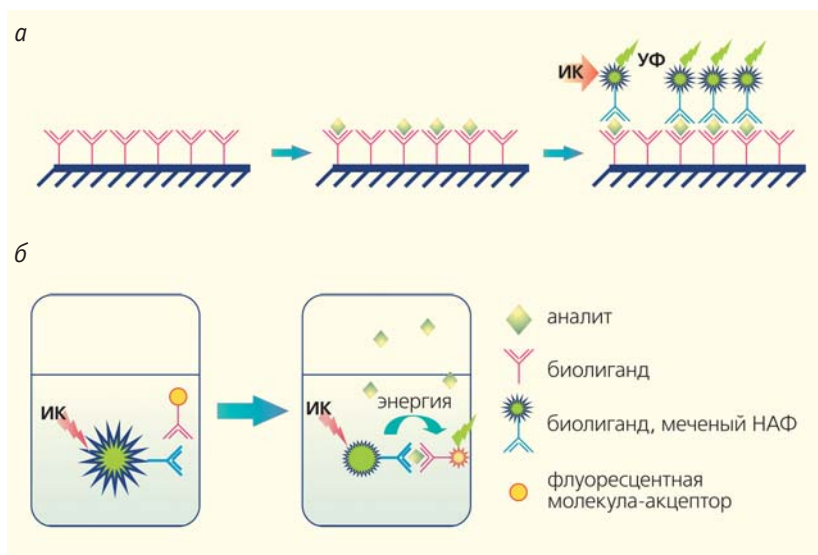


Рис.5. Схемы проведения биоанализа с участием НАФ: гетерогенного (а) и гомогенного (б).

и акцептор находятся далеко друг от друга, поэтому изменение флуоресцентного сигнала не регистрируется. При добавлении к такой смеси определяемого аналита последний связывается с донором и акцептором и формируется «сэндвич», т.е. донор и акцептор сближаются настолько, что излучение НАФ возбуждает эмиссию акцептора. В результате регистрируется изменение сигнала (ослабление флуоресценции донора — его излучение поглощается акцептором — и появление флуоресценции акцептора), интенсивность которого пропорциональна количеству аналита.

Этот анализ лежит в основе определения целевых ДНК, антител, глюкозы, ферментов и т.д. Например, разработана тест-система для определения ДНК, где донором служат НАФ, меченные комплементарным к определяемой ДНК олигонуклеотидом, а акцептором — маркер ДНК, меченный тетраметил-6-карбоксиродамином. Минимальная определяемая концентрация ДНК в этом анализе составляет 1.3 нМ [12]. Кроме органических красителей в гомогенном анализе могут быть использованы наночастицы (например, наночастицы золота и углеродные нанотрубки), которые значительно подавляют флуоресценцию донора (НАФ) при формировании сэндвич-структуры, что повышает чувствительность метода.

Оптическая визуализация клеток и биотканей с использованием флуорофоров играет важную роль в медико-биологических исследованиях, поскольку позволяет проводить неинвазивную раннюю диагностику, наблюдение и терапию, в частности, раковых опухолей. Естественно, самыми эффективными флуорофорами для биовизуализации оказываются те, у которых длина волны возбуждения флуоресценции лежит в «окне прозрачности» биоткани, что приводит к более глубокому проникновению света, снижению рассеяния и фона от автофлуоресценции биоткани. НАФ, как уже упоминалось, удовлетворяют этим требованиям.

Визуализация клеток in vitro. В последнее время появился ряд сообщений о применении НАФ для визуализации клеток как в качестве неспецифических контрастирующих агентов для окрашивания клеток за счет эндоцитоза, так и для направленной доставки к опухолевым клеткам.

Эксперименты по неспецифической доставке НАФ проводили на линии кератиноцитов человека HaCaT, линии раковых клеток SKBR-3, MCF-7, HeLa, HerG2 и др. В этом случае важную роль играют свойства поверхности НАФ. Например, НАФ, гидрофилизованные при участии гидроксида тетраметиламмония (без полимерного покрытия), имели наибольшую степень захвата кератиноцитами HaCaT. Полимерное покрытие, такое как полилактид, позволило получить НАФ с отрицательным зарядом поверхности, что способствовало эффективному захвату НАФ клетками [13].

Для селективной доставки НАФ к опухолевым клеткам и их компонентам *in vitro* необходимо, как мы помним, связывание НАФ с направляющими биомолекулами. Специфичность визуализации обеспечивается выбором на поверхности клетки такой мишени, которая оптимально подходит для каждого конкретного случая, и соответствующей направляющей молекулы. В качестве специфических мишеней для диагностики опухолей чаще всего используют рецепторную часть сигнальных белков на мембране опухолевых клеток. Направляющими биомолекулами, обеспечивающими целевую доставку НАФ к опухоли, обычно служат антитела и их фрагменты, лиганды к специфическим поверхностным рецепторам опухолевых клеток, пептиды, аптамеры (особые олигонуклеотиды). В качестве примера можно привести реагенты на основе НАФ, содержащие на поверхности такие направляющие молекулы:

- фолиевую кислоту, которая специфически взаимодействует с рецепторами данной кислоты на поверхности ряда опухолевых клеток (линии клеток HeLa, HT29 и т.д.);

- антитела к рецептору Claudin-4 на поверхности раковых клеток поджелудочной железы;

- антитела к рецептору HER2/neu на поверхности клеток рака молочной железы SKBR-3 [9].

Оптическая визуализация in vivo. За последние пять лет достигнуты значительные успехи в применении НАФ в качестве флуорофоров для изучения биораспределения, токсичности и доставки наночастиц в опухоли малых животных *in vivo*. При флуоресцентном мечении на уровне целого организма происходит ослабление сигнала, связанное с увеличением толщины тканей, а также усложнение доставки флуорофоров к целевым клеткам и тканям. Благодаря тому, что флуоресценция НАФ возбуждается ИК-светом из «окна прозрачности» биоткани, удастся повысить яркость получаемого сигнала и снизить фон.

При доставке НАФ в опухоли млекопитающих нанокристаллы должны преодолеть ряд структурных и физиологических барьеров, таких как иммунный, и избежать метаболической деградации. Кроме того, НАФ может попадать в нецелевые органы и ткани организма и накапливаться там, ухудшая контрастность и увеличивая вероятность проявления токсического эффекта. Накопление же НАФ в опухолевой ткани для ее последующей визуализации при внутривенном введении возможно посредством двух механизмов: пассивного или активного.

В случае пассивного механизма НАФ избирательно накапливаются в опухолевой ткани из-за ее структурных особенностей, таких как разрастание сосудов (гиперваскуляризация). При этом архитектура сосудистой сетки оказывается патологически нерегулярной, а сами сосуды опухоли обладают «дефектным» эндотелием и имеют относительно широкий просвет. Они настолько вели-

ки, что наночастицы размером до 1 мкм могут проникать в опухолевую ткань и накапливаться там (в этой ткани также отмечается нарушение лимфатического дренажа, поэтому НАФ могут оставаться в ней длительное время). Этот эффект увеличенной проницаемости и удерживания (англ. EPR-effect — enhanced permeability and retention) используется для доставки в опухоли терапевтических и диагностических агентов на основе наночастиц.

Степень накопления НАФ в опухолевой ткани при пассивной доставке зависит от ряда факторов: диаметра частиц, заряда поверхности, природы полимерной оболочки. Предпочтительно иметь наночастицы с диаметром в диапазоне 10–150 нм, покрытые полимером с минимальным уровнем неспецифического связывания с белками. Успешнее всего зарекомендовал себя в качестве такого полимера полиэтиленгликоль (ПЭГ), который гидрофилен, нетоксичен и неиммуногенен, а также характеризуется низкими сорбционными свойствами в отношении белковых молекул. Перспективность использования таких НАФ-ПЭГ для высококонтрастной оптической визуализации опухолевого очага, в частности, была показана на модели опухоли легкого (эпидермоидной карциномы Льюиса), перевитой мышам (рис.6) [14]. Видно, что накопление наночастиц идет по периферии, где сильно развита сосудистая система.

Активный механизм — это адресная доставка НАФ, на этот раз — к опухоли, с помощью направляющих молекул, которые связываются со специфическими рецепторами на поверхности опухолевых клеток. Но если об адресной доставке НАФ *in vitro* в литературе существует большое количество сообщений, то прижизненная доставка пока

удалась лишь с помощью конъюгатов НАФ с фолиевой кислотой или трипептидом, состоящим из L-аргинина, глицина и L-аспарагиновой кислоты (RGD-пептидом), в качестве направляющих молекул. Известно, что RGD-пептид имеет высокое сродство к $\alpha v \beta_3$ -интегриновому рецептору, который играет ключевую роль в развитии опухоли. В работе [15] RGD-пептид связывали с поверхностью НАФ для адресной доставки к клеткам глиобластомы U87MG. Существенное накопление наночастиц в опухоли наблюдалось через 1 ч после введения, оно сохранялось в течение 24 ч. Важно отметить, что в этом случае удалось достичь высокого значения сигнал/шум между опухолью и фоном, которое составило 24. Таким образом, использование активного механизма доставки позволило значительно увеличить накопление НАФ в опухоли.

Однако во всех вариантах наряду с успешным маркированием опухолей *in vivo* как по активному, так и пассивному механизму наблюдается неспецифическое накопление НАФ в различных органах экспериментальных животных, прежде всего в печени и селезенке.

Уникальные оптические свойства НАФ делают эти частицы весьма привлекательными для различных **терапевтических приложений** благодаря возможности создания наноконструктов, сочетающих в себе свойства визуализирующих и терапевтических агентов.

Известно, что фотохимические реакции под действием УФ-излучения имеют особое значение в терапии. УФ-фотоны могут управлять функциями биомолекул в живых системах посредством эффективной фотоактивации, но такое излучение обладает фототоксичностью и характеризуется незначительной глубиной проникновения в био-

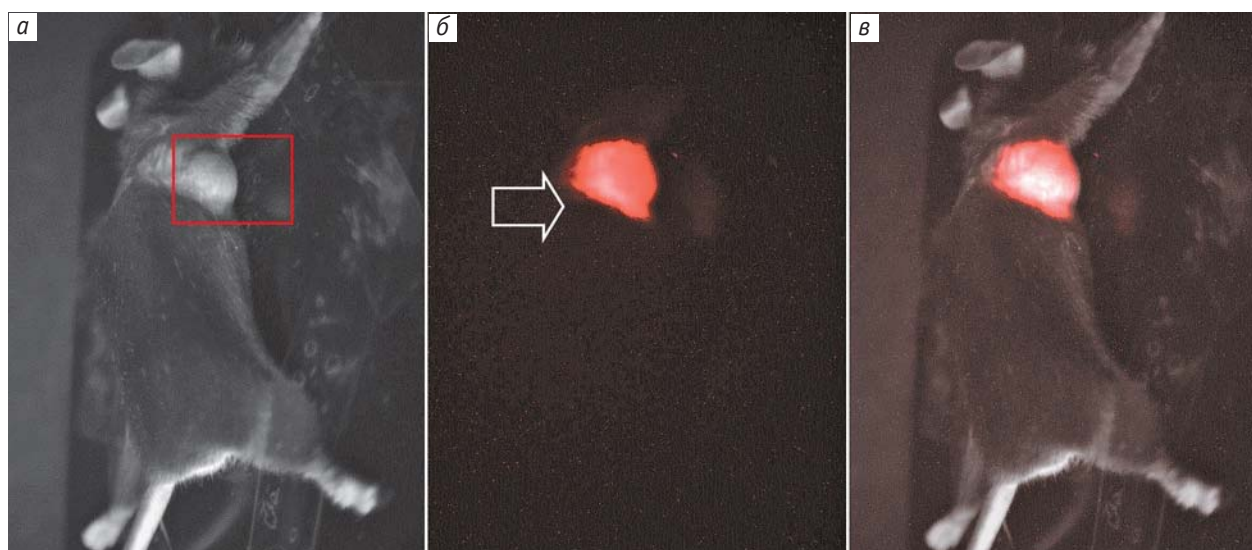


Рис.6. Демонстрация прижизненной доставки НАФ, покрытых амфифильной полимерной оболочкой, в раковую опухоль мыши. Изображение *in vivo* получено через 1 ч после введения препарата. Время выведения животного из эксперимента 180 мин. Светлопольное (а), эпифлюоресцентное (б) и наложенное (в) изображения [14].

ткани. Но НАФ, возбуждаемые светом из ИК-диапазона, могут производить УФ-излучение непосредственно в заданном месте, что важно, например, в случае применения фотодинамической терапии для лечения раковых опухолей.

Такая терапия — перспективный метод лечения онкологических заболеваний, позволяющий воздействовать на опухоль локально, активируя светом (как правило, ультрафиолетовым) предварительно доставленный химический фотосенсибилизатор (ФС). В результате образуются активные формы кислорода, вызывающие гибель клеток и деградацию опухоли. Создавая наноконплексы НАФ-ФС, в которых осуществляется перенос энергии от донора (НАФ) к акцептору (ФС) подобно аналогичному процессу в гомогенном биоанализе, можно активировать ФС путем воздействия гораздо более подходящего ИК-света.

Недавно в литературе появилось сообщение о применении *in vivo* наноконплекса на основе НАФ и фотосенсибилизатора хлорина 6 (СЕ6), включенного в оболочку ПЭГ на поверхности

НАФ [16]. Комплекс вводили непосредственно в область опухоли, и после облучения ИК-светом с длиной волны 980 нм наблюдали значительную регрессию злокачественного образования.

* * *

Таким образом, НАФ благодаря их уникальным оптическим и химическим свойствам имеют огромный потенциал для использования в медико-биологических исследованиях. Сейчас на их основе активно разрабатываются реагенты, применяемые для диагностики, визуализации на уровне клеток и целого организма малых животных, а также для терапии с применением светоактивации. Дальнейшие исследования, ставящие целью усовершенствовать оптические свойства наночастиц, их размеры, форму, лучше разобраться в поверхностной химии, а также работы по созданию гибридных наноконплексов с частицами, обладающими плазмонным эффектом, магнитными частицами и др., позволят повысить эффективность применения НАФ. ■

Обзор подготовлен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-13-01421).

Литература

1. *Lakowicz J.R.* Principles of Fluorescence Spectroscopy. N.Y., 2006.
2. *Wang M., Abbineni G., Clevenger A. et al.* Upconversion nanoparticles: synthesis, surface modification and biological applications // *Nanomed. Nanotechnol. Biol. Med.* 2011. V.7. P.710–729.
3. *Здобнова Т.А., Лебедева Е.Н., Деев С.М.* Квантовые точки для молекулярной диагностики опухолей // *Acta Naturae.* 2011. V.3. №1. P.29.
4. *Mai H., Zhang Y., Sun L., Yan C.* Highly efficient multicolor up-conversion emissions and their mechanisms of monodisperse NaYF₄/Yb, Er core and core/shell-structured nanocrystals // *J. Phys. Chem. C.* 2007. V.111. P.13721–13729.
5. *Khaydukov E.V., Semchishen V.A., Seminogov V.N. et al.* Visualization of upconverting nanoparticles in strongly scattering media // *Biomed. Opt. Express.* 2014. V.5. P.1952–1956.
6. *Ye X.C., Collins J.E., Kang Y.J. et al.* Morphologically controlled synthesis of colloidal upconversion nanophosphors and their shape-directed self-assembly // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2010. V.107. P.22430–22435.
7. *Qian H.S., Zhang Y.* Synthesis of hexagonal-phase core-shell NaYF₄ nanocrystals with tunable upconversion fluorescence // *Langmuir.* 2008. V.24. P.12123–12125.
8. *Jiang W., Kim B.Y.S., Rutka J.T., Chan W.C.W.* Nanoparticle-mediated cellular response is size-dependent // *Nat. Nanotechnol.* 2008. V.3. P.145–150.
9. *Chen G., Qiu H., Prasad P.N., Chen X.* Upconversion nanoparticles: design, nanochemistry, and applications in theranostics // *Chem. Rev.* 2014. V.114. P.5161–5214.
10. *Generalova A.N., Kochneva I.K., Khaydukov E.V. et al.* Submicron polyacrolein particles in situ embedded with upconversion nanoparticles for bioassay // *Nanoscale.* 2014. V.7. P.1709–1717.
11. *Hampf J., Hall M., Mufti N.A. et al.* Upconverting phosphor reporters in immunochromatographic assays // *Anal. Biochem.* 2001. V.288. P.176–181.
12. *Zhang P., Rogelj S., Nguyen K., Wheeler D.J.* Design of a highly sensitive and specific nucleotide sensor based on photon upconverting particles // *Am. Chem. Soc.* 2006. V.128. P.12410–12411.
13. *Guller A.E., Generalova A.N., Petersen E.V. et al.* Cytotoxicity and non-specific cellular uptake of bare and surface-modified upconversion nanoparticles in human skin cells // *Nanoresearch.* 2015. V.8. P.1546–1562.
14. *Generalova A.N., Rocheva V.V., Nechaev A.V. et al.* PEG-modified upconversion nanoparticles for in vivo optical imaging of tumors // *RSC Advances.* 2016. Doi:10.1039/C5RA25304G.
15. *Xiong L.Q., Chen Z.G., Tian Q.W. et al.* High contrast upconversion luminescence targeted imaging in vivo using peptide-labeled nanophosphors // *Anal. Chem.* 2009. V.81. P.8687–8694.
16. *Wang C., Tao H.Q., Cheng L., Liu Z.* Near-infrared light induced in vivo photodynamic therapy of cancer based on upconversion nanoparticles // *Biomaterials.* 2011. V.32. P.6145–6154.

Новый взгляд на строение и происхождение полости тела многоклеточных

В.В.Малахов, Е.В.Богомолова

Полость тела — одно из фундаментальных понятий морфологии животных. В классических учебниках, по которым обучаются студенты-биологи и в нашей стране, и за рубежом [1–4], обязательно есть главы, где обсуждаются проблемы происхождения и природы первичной и вторичной полостей тела. Правда, зачастую можно столкнуться с тем, что одна и та же полость тела у какой-то группы животных не только трактуется, но даже называется по-разному. Так, полость тела круглых червей (нематод) может именоваться и первичной полостью (протоцелом), и псевдоцелом, и схизоцелом. Одни биологи связывали ее происхождение с редукцией целома (вторичной полости тела), другие — считали ее производной бластоцеля (полости зародышевого пузыря, или бластулы), третьи — принимали за щелевидное пространство между органами, которое не имеет прямого отношения ни к бластоцелю, ни к целому.

Революционные события в зоологии на рубеже XX в. и XXI в. существенно изменили наши представления о системе и филогении царства животных [5–7]. Новые данные по их тонкому строению, полученные с применением электронного микроскопа, заставили по-новому трактовать строение тканей и систем органов. Эти изменения коснулись и представлений о природе и происхождении

полости тела. Настоящая статья задумана как попытка объяснить, какие типы полостей тела есть у животных, чем они друг от друга отличаются, как они произошли и какие основные функции выполняют. В первой части статьи мы расскажем о том, какие типы полости тела встречаются у низших многоклеточных. Начнем наши рассуждения с губок — сидячих водных организмов-фильтраторов, распространенных и в море, и в пресных водах (рис.1).



Владимир Васильевич Малахов, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой зоологии беспозвоночных биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, руководитель лаборатории биологии морских беспозвоночных Дальневосточного федерального университета (Владивосток). Область научных интересов — сравнительная анатомия, эмбриология и филогения беспозвоночных.



Екатерина Валериевна Богомолова, кандидат биологических наук, доцент той же кафедры. Занимается изучением морфологии, ультраструктурного строения, развития и биологии морских пауков (*Arthropoda*, *Rusnagonida*), вопросами методики преподавания биологии в высших и средних учебных заведениях.

Ключевые слова: полость тела, бластоцель, мезохил, мезоглея, губки, стрекающие кишечнополостные.

Key words: body cavity, blastocoel, mesohyl, mesoglea, sponges, cnidarians.

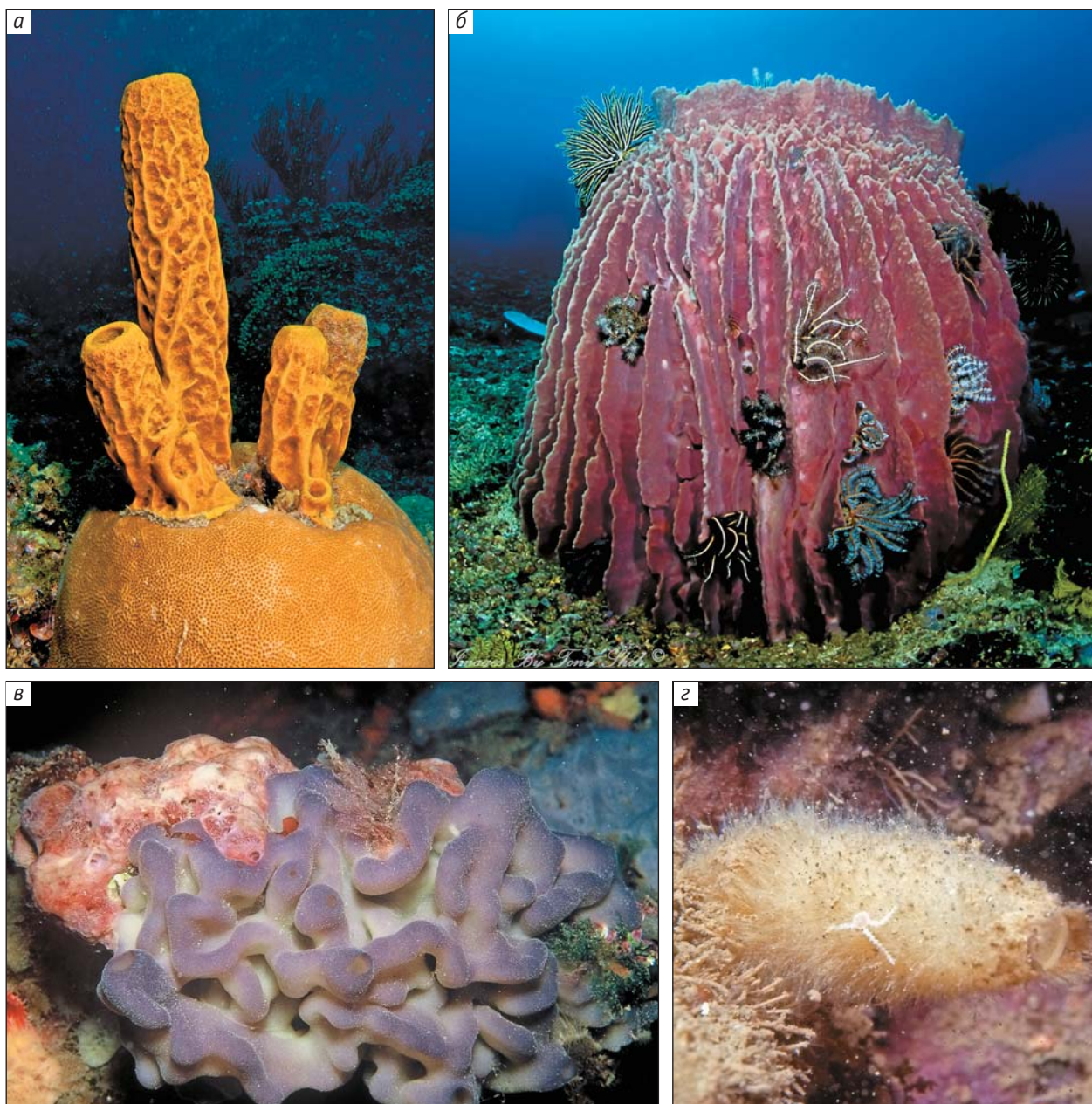


Рис.1. Разнообразие губок: кремнегоровые (а — фото Nick Hobgood, б — фото Tony Shih), гомосклеридная оскарелла (в — фото Parent Géry) и известковая губка сикон (г — фото Christophe Quintin).

Гомосклеридные губки

Хотя у губок нет ни нервной системы, ни настоящих мышечных клеток, они способны к ограниченной подвижности, изменению формы и объема тела [8]. Нет у губок даже рта и кишечника. Как же они питаются? Через крошечные поры вода из внешней среды по сложной ирригационной системе попадает в жгутиковые камеры, выстланные воротничковыми жгутиковыми клетками — хоаноцитами (рис.2,а). Они захватывают мелкие пищевые частицы (преимущественно бактерии) и перевари-

вают их сами или передают для переваривания другим клеткам. Биение жгутов хоаноцитов обеспечивает ток воды через организм губок. Из жгутиковых камер вода движется дальше по ирригационной системе и поступает к широкому отверстию — устью (оскулюму), из которого выбрасывается во внешнюю среду. Снаружи губки одеты слоем уплотненных клеток — пинакодермой. Между пинакодермой, каналами ирригационной системы и жгутиковыми камерами лежит мезохил — студенистый слой, содержащий соединительнотканые белки (коллаген и спонгин) и разнообразные клетки.

В индивидуальном развитии некоторых губок имеются бластулообразные личинки (цинктобластулы), которые состоят из одного слоя жгутиковых клеток (рис.2,б). Особенно характерны они для примитивной группы гомосклеридных губок (Homoscleromorpha). Внутри их шарообразной или яйцевидной личинки есть обширная полость, которая, как и полость бластулообразных личинок высших многоклеточных, ограничена базальной пластинкой — слоем неклеточного вещества, подстилающего основания клеток. В состав базальной пластинки у гомосклеридных губок входят те же компоненты, что и у других многоклеточных животных, — коллаген IV типа, фибронектин, ламинин и др.

При метаморфозе передний конец личинки гомосклеридных губок впячивается внутрь и дает начало слою хоаноцитов — хоанодерме, а из задней половины личинки развивается покровный слой клеток — пинакодерма (рис.2,в-е). В действительности метаморфоз цинктобластулы может протекать несколькими способами, но суть процессов не меняется [9]. Бластицель личинки заполняется белковым матриксом, который содержит коллагены и специфический для губок белок спонгин, заселяется клетками и превращается в мезохил. У гомосклеридных губок он представлен тоненькой прослойкой между пинакодермой и хоанодермой, причем базальная пластинка сохраняется даже у взрослых форм. У других губок мезохил гораздо обширнее; особенно объемён он у очень крупной (до 1.5–2 м) губки класса Demospongia — знаменитого «кубка Нептуна» (*Cliona patera*). В данном случае мезохил обычно содержит помимо органических компонентов еще и минеральные иглы (спикулы), может быть очень плотным, из-за чего вся губка кажется твердой на ощупь. У Demospongia, в отличие от Homoscleromorpha, слой хоаноцитов и пинакодерма не отделены от мезохила базальной пластинкой и поэтому обычно не рассматриваются как эпителии.

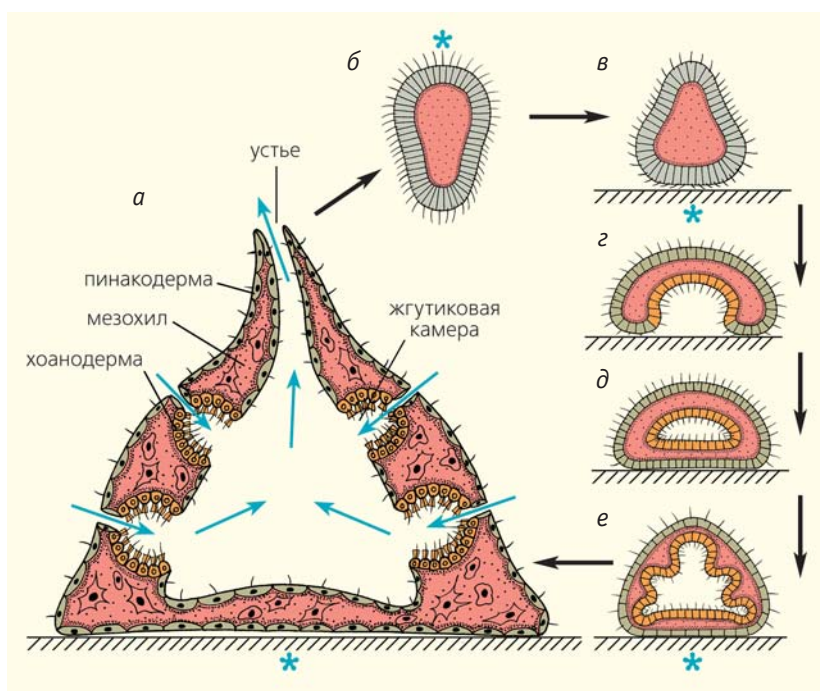


Рис.2. Схема строения молодой гомосклеридной губки (а), ее личинки — цинктобластулы (б) и метаморфоза личинки (в-е). Синие стрелки — движение воды. Звездочки — полюс, который соответствует переднему концу личинки. Базальная пластинка здесь и на остальных рисунках показана плотным рядом точек.

Стрекающие кишечнopolостные

Однослойный шар из клеток (бластула с обширной полостью — бластоцелем) — характерная стадия развития стрекающих кишечнopolостных (рис.3). У кораллов бластула путем впячивания ее стенки превращается в двуслойную личинку — гастролу. У нее есть рот и кишечник, выстланный

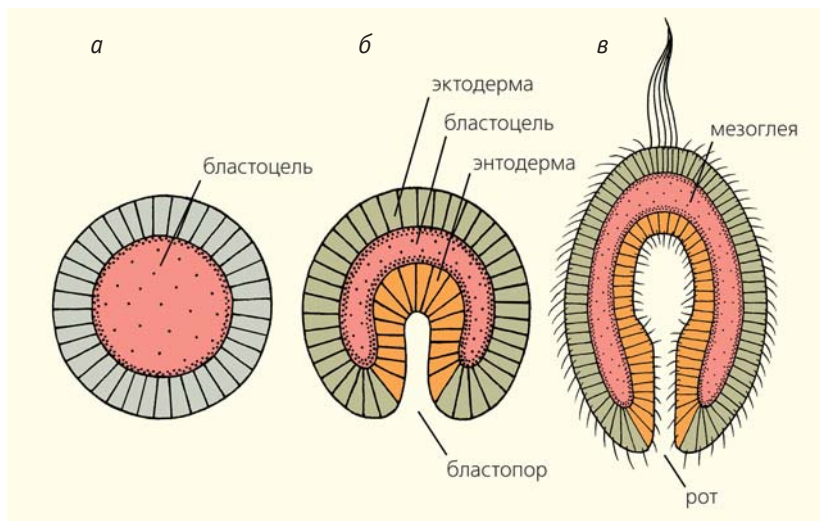


Рис.3. Стадии развития коралла на примере актинии: бластула (а), формирование двуслойного зародыша — гастролы (б), личинка актинии (в).



Рис.4. Сцифоидная медуза аурелия; хорошо видны гастроваскулярные каналы.
Фото А.А.Семенова

жгутиковой энтодермой, а покровы представлены жгутиковой эктодермой. При формировании гастролы объем бластоцеля уменьшается, он заполняется студенистым белковым содержимым. В результате на месте бластоцеля образуется мезогля, которая лежит между экто- и энтодермой и всегда отделена от них базальными пластинками. В разных группах кишечнополостных мезогля имеет разную толщину. У кораллов это нетолстая пластинка между экто- и энтодермой, содержащая не только соединительнотканые белки (коллаген и др.), но и клетки-амебоциты. Заметим, что у восьмилучевых кораллов в мезоглее развивается внутренний скелет, состоящий из известковых спикул. Особенно мощного развития достигает мезогля у сцифоидных медуз, где она составляет 98% от общего объема тела. Мезогля сцифоидных — плотная желеобразная структура, содержащая не только коллаген, но и специфические белки, например мезоглеин, и рассеянные амебоциты. Толстая мезогля характерна и для гидроидных медуз, но у них она не заселена клетками. У гидроидных полипов (например, у гидры) мезогля — очень тонкая пластинка, толщина которой составляет всего 1–2 мкм.

Название «кишечнополостные» связано с наличием у этих животных кишечной полости, которая сообщается с внешней средой ртом и в которой происходит переваривание пищи. У крупных представителей кишечнополостных кишечная полость обеспечивает и распределение пищи по всему организму. Так, у крупных медуз от желудка отходит сложная система каналов, по которой пища транспортируется ко всем, даже самым удаленным участкам организма (рис.4). Поэтому другое название кишечной полости — гастроваскулярная полость (от греч. *γαστρο* — желудочный

и лат. *vasculum* — небольшой сосуд), т.е. кишечно-сосудистая полость. Таким образом, в отсутствие других циркуляторных систем гастроваскулярная полость выполняет распределительную функцию.

С кишечной полостью связаны и некоторые другие важные функции. У полипов, лишенных минерального скелета (актинии, обыкновенной гидры), вода, заключенная в кишечной полости, служит опорой для тела, т.е. гидроскелетом. В самом деле, полип при нападении на него обычно сжимается, превращаясь в плоскую лепешечку. Как же ему расправиться? Для этого он биением ресничек нагнетает в кишечную полость жидкость, затем плотно закрывает рот, сокращает кольцевую мускулатуру,

и жидкость кишечной полости растягивает тело полипа. Некоторые актинии при приближении хищника, например морской звезды, плотно закрывают рот, открепляются от субстрата и, попеременно изгибая тело то в одну, то в другую сторону, всплывают в толщу воды (рис.5).

Среди актиний немало форм, которые живут не на поверхности дна, а в толще осадка. Они способны зарываться в грунт и передвигаться гидравлическим способом, перекачивая жидкость из одного участка тела в другой (рис.6). Во всех этих случаях кишечная полость выполняет опорную функцию.

У кишечнополостных нет специализированных выделительных органов. Продукты обмена выделяются в кишечную полость (в каналы гастроваскулярной системы), а дальше через рот выбрасываются во внешнюю среду. Выделительную функцию у кишечнополостных выполняет кишечная полость.

У кораллов и сцифоидных развитие яйцеклеток и сперматозоидов происходит в энтодермальном эпителии, затем они высвобождаются в кишечную полость и через рот выводятся во внешнюю среду. Только у некоторых гидроидных предшественники половых клеток мигрируют в эктодерму, где происходит их дальнейшее развитие. Таким образом, у большинства кишечнополостных кишечная полость выполняет еще и половую функцию.

Завершая первую часть нашей статьи, отметим, что у личинок губок имеется только одна полость тела — бластоцель, которая у взрослых форм заполняется клеточным и неклеточным материалом и становится мезохилом. Хоанодерма и пинакодерма губок окружают мезохил и по существу представляют собой непрерывный клеточный

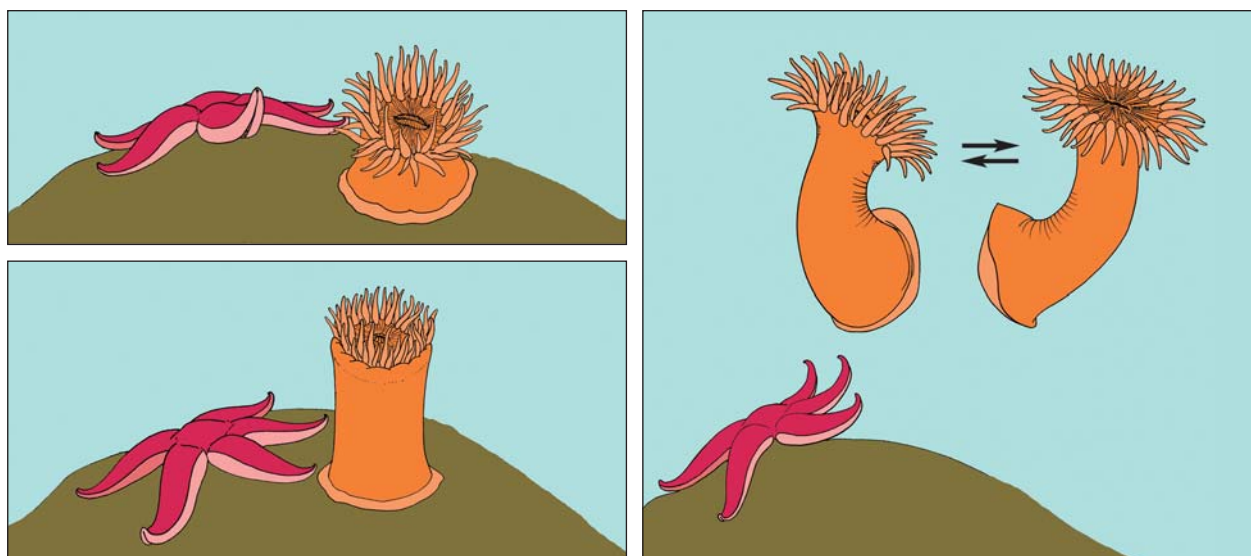


Рис.5. Актиния, спасающаяся от нападения морской звезды.

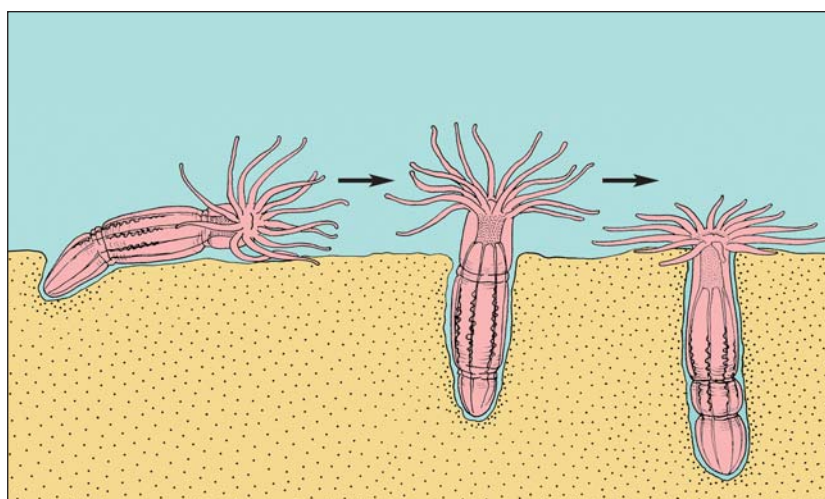


Рис.6. Актиния нематостелла, закапывающаяся в грунт.

слой, только по-разному дифференцированный в разных участках. Губки — это однослойные животные. У кишечнополостных уже на личиночной стадии формируется не только бластоцель, но и кишечная полость, выполняющая отнюдь не только пищеварительные функции. Для кишечнополостных характерно наличие двух эпителиальных слоев: эктодермы и энтодермы. Для билатерально-симметричных животных характерно развитие вторичной полости тела (целома) и третьего зародышевого листка — мезодермы. Но об этом мы расскажем во второй части статьи. ■

Материал для настоящей работы был собран при поддержке Российского научного фонда (соглашение №14-50-00034), изготовление оригинальных рисунков и работа над рукописью поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 15-29-0260-офи-м).

Литература

1. Беклемишев В.Н. Основы сравнительной анатомии беспозвоночных. М., 1964. Т.2.
2. Догель В.А. Зоология беспозвоночных. М., 1981.
3. Westheide W., Rieger R. Spezielle Zoologie. Erster Teil: Einzeller und Wirbellose Tiere. Stuttgart; Jena; N.Y., 1996.
4. Ruppert E.E., Fox R.S., Barnes R.D. Invertebrate Zoology: A Functional Evolutionary Approach. Belmont, 2004.
5. Aguinaldo A.M.A., Turbeville J.M., Linford L.S. et al. Evidence for a clade of nematodes, arthropods and other moulting animals // Nature. 1997. V.387. P.489–493. Doi:10.1038/387489a0.
6. Малахов В.В. Революция в зоологии: новая система билатерий // Природа. 2009. №3. С. 40–54.
7. Dunn C.W., Giribet G., Edgecombe G.D., Hejnol A. Animal Phylogeny and its Evolutionary Implications // Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 2014. V.45. P.371–95. Doi:10.1146/annurev-ecolsys-120213-091627.
8. Лавров А.И., Косевич И.А. Реагрегация клеток у губок // Природа. 2013. №2 С.87–90.
9. Ereskovsky A.V. The Comparative Embryology of Sponges. L.; N.Y., 2010.

Новости о древних людях

М.С.Гельфанд

Новые результаты исследований, посвященных ДНК древних людей, на часть вопросов, которые мы обсуждали почти год назад [1], отвечают, какие-то из них оставляют открытыми, а некоторые — ставят заново.

Были проанализированы денисовские фрагменты в геномах австралонезийцев и кроманьонские — в геномах неандертальцев. В геномах африканцев были найдены некрманьонские фрагменты, что указывает на гибридизацию с какими-то неизвестными представителями рода *Ното*. Продолжились исследования отдельных групп генов. Надо сказать, что картина взаимоотношений между ветвями человечества стала более подробной, но и более запутанной. Кроме того, некоторые исследования, убедительные сами по себе, друг другу противоречат.

Древние геномы

Была определена последовательность Y-хромосомы (точнее, ее белок-кодирующих фрагментов) неандертальца из испанской пещеры Эль Сидрон. Это первая секвенированная древняя Y-хромосома [2]. Ее эволюционная история не имеет неожиданностей — она более или менее совпадает с историей соматических хромосом. Зато удалось выяснить, продукты каких генов могли способствовать репродуктивной изоляции неандертальцев: три белка, в генах



Михаил Сергеевич Гельфанд, доктор биологических наук, член Европейской академии, заместитель директора Института проблем передачи информации имени А.А.Харкевича РАН, профессор факультета биоинженерии и биоинформатики Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — биоинформатика, сравнительная и функциональная геномика, молекулярная эволюция, системная биология, метагеномика.

Ключевые слова: эволюция, происхождение человека, геномика, неандертальцы, денисовцы, древняя ДНК.

Key words: evolution, human origins, genomics, Neanderthals, Denisovans, ancient DNA.

которых наблюдаются различия между неандертальцами и кроманьонцами, по-видимому, могли вызывать потенциальный иммунный конфликт между матерью и сыном. Это согласуется с классическим правилом Холдейна: если при скрещивании разных подвидов или рас жизнеспособность потомства зависит от пола, более редким (или вообще отсутствующим) будет гетерогаметный пол, то есть у млекопитающих — самцы [3]. Таким образом, в браках между неандертальцами и кроманьонцами, возможно, не было сыновей и почти наверняка — внуков по мужской линии. Авторы статьи заключают, что у потомков таких скрещиваний, т.е. современных европейцев и азиатов, не была обнаружена неандертальская Y-хромосома, однако это утверждение кажется излишним. Действительно, никого ведь не удивляет, что у современных людей не было обнаружено неандертальских митохондриальных геномов, передающихся, наоборот, строго по материнской линии. В связи с этой работой можно вспомнить и более раннее наблюдение: неандертальские варианты в геномах современных людей относительно редки в X-хромосомах и полностью отсутствуют в генах, экспрессирующихся в семенниках, что говорит о повышенной мужской стерильности потомков смешанных пар [4].

Многие неандертальские аллели, по-видимому, были в той или иной степени вредны, так как в 51 исследованном геноме древних евроазиатов возрастом от 7 до 45 тыс. лет доля неандертальских вариантов постепенно сокращалась [5] (рис.1, 2). Впрочем, отмечено, что частота неандертальских фрагментов падает вблизи границ об-

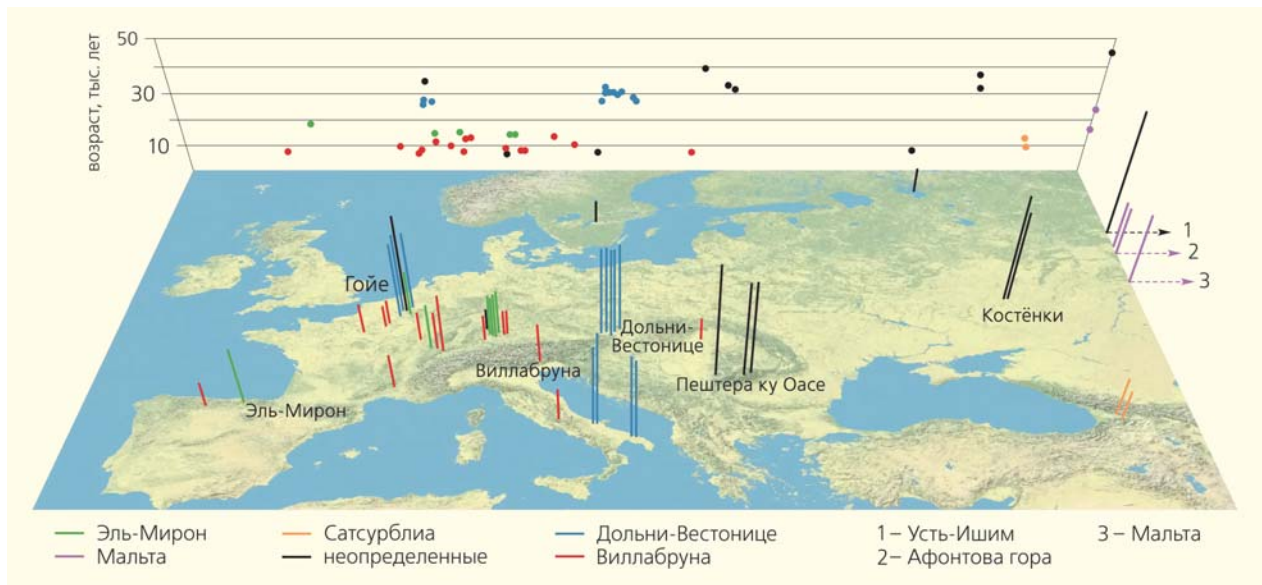


Рис.1. Возраст и географическое происхождение образцов ДНК древних кроманьонцев (всего 51) [5]. Каждому геному соответствует столбец, высота которого пропорциональна возрасту найденных останков, а цвет обозначает принадлежность к одному из генетических кластеров. Справа, на краю карты, изображены столбцы для четырех сибирских образцов.

ластей структурных перестроек генома — видимо, последние препятствуют рекомбинации [6].

Секвенирование еще двух денисовских геномов показало, что, судя по числу замен, самый древний геном старше самого молодого на 60 тыс. лет [7]. К сожалению, качество ядерных геномов не позволило провести более детальные исследования, например, чтобы понять, какой из геномов ближе к денисовскому предку австралонезийцев. Был также секвенирован ядерный геном человека из испанской пещеры Сима де лос Уэсос возрастом около 430 тыс. лет, относящийся к среднему плейстоцену [8]. Напомним, что этот человек оказался ближайшим родственником денисовцев по материнской линии: именно на его митохондриальный геном больше всего похож митохондриальный геном денисовца. Оба отделились от ветви неандертальцев и кроманьонцев примерно миллион лет назад. Однако два ядерных генома из пещеры Сима де лос Уэсос говорят о другом: они существенно больше похожи на геном алтайского неандертальца, чем на геномы денисовца и кроманьонца. Получается, интрогрессия митохондриальной ДНК могла случиться не от неизвестных представителей рода *Homo* (обсуждался даже *H. erectus*) к людям из Сима де

лос Уэсос и из Денисовой пещеры (независимо?), а от африканских кроманьонцев к неандертальцам, причем первоначальные неандертальские митохондриальные геномы в позднем плейстоцене уже не сохранились. Расхождение ветвей кроманьонцев с неандертальцами и денисовцами при этом сдвигается в более ранний период, чем полагали до сих пор, — по-видимому, это произошло 765–550 тыс. лет назад [9].

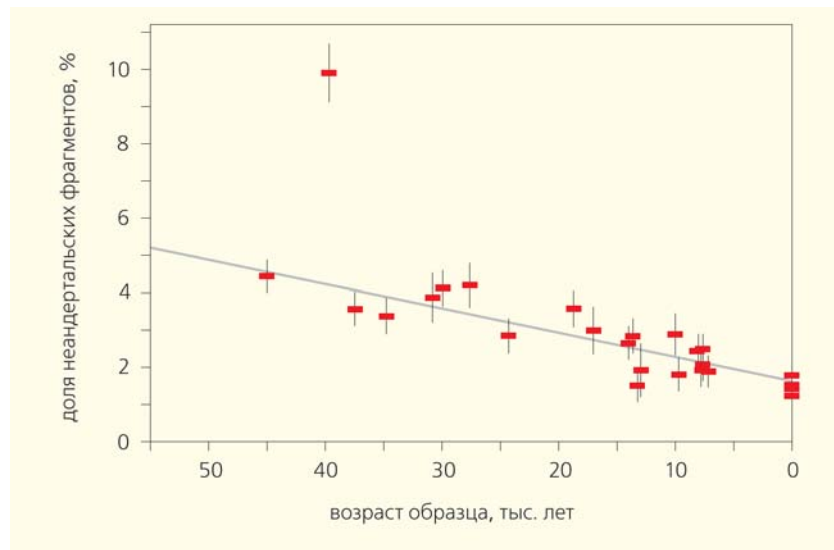


Рис.2. Зависимость доли неандертальских фрагментов в геномах древних кроманьонцев от возраста образца ДНК. Выделяется геном представителя туниковой ветви, останки которого были найдены в румынской пещере Пештера ку Оасе, — гибридизация произошла за 4–6 поколений до него. В качестве современных взяты геномы азиатов.

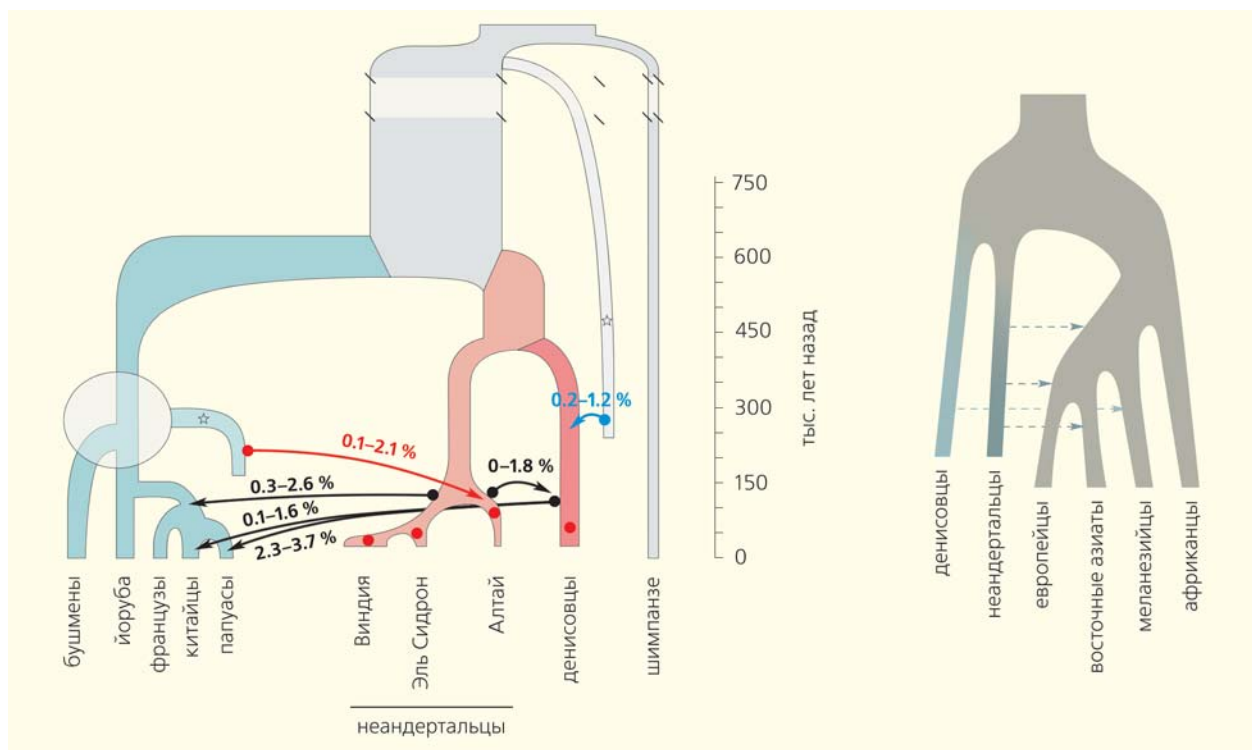


Рис.3. Реконструкция событий гибридизации [10, 11]. Кружком (слева) обведено место, соответствующее ответвлению людей (ветвь помечена голубой звездочкой), гибридизовавшихся с предками алтайских неандертальцев, — либо вскоре после первого расхождения современных популяций (ответвления койсанских народов), либо еще раньше. Числа над стрелками обозначают среднюю долю фрагментов, появившихся в геномах представителей популяции-реципиента в результате каждого события гибридизации. Серая звездочка — неизвестная древняя ветвь. Различия в порядке ответвления европейцев, китайцев и папуасов на рисунках слева и справа отражают противоречия в цитируемых статьях.

Анализ уже секвенированных последовательностей — полных геномов алтайских неандертальца и денисовца и 21-й хромосомы неандертальцев из испанской пещеры Эль Сидрон и хорватской пещеры Виндия — показал наличие кроманьонских фрагментов в геноме алтайского неандертальца, но не в трех других [10]. Анализ последовательностей и моделирование популяционной истории показывает, что эти фрагменты появились в результате гибридизации, случившейся около 100 тыс. лет назад. Если это верно, то их источник — неизвестная ветвь кроманьонцев, вышедших из Африки задолго до общих предков современных европейцев и азиатов и гибридизовавшихся с одной из групп неандертальцев. Интересно, что один из кроманьонских фрагментов в геноме алтайского неандертальца включает ген *FOXP2*, отвечающий за развитие речи. В геномах современных людей эта область никогда не содержит неандертальских вариантов, а стало быть, для современного человека неандертальские варианты этой области вредны, в то время как для неандертальца кроманьонский вариант, похоже, оказался полезным. Кроме того, было подтверждено наличие в денисовском геноме фрагментов, происходящих от представителя неизвестной ветви рода *Homo* (рис.3, слева).

Современные геномы

Как и ожидалось, сразу несколькими группами был проведен анализ денисовских и неандертальских фрагментов в геномах сотен современных людей, в том числе десятков меланезийцев [11, 12].

В первой из этих работ было реконструировано в общей сложности 1.34 млрд нуклеотидов (примерно треть) неандертальского генома и 303 млн нуклеотидов (примерно одна десятая часть) денисовского [11]. Авторы постулировали, что имели место как минимум три волны гибридизации предков современных людей с неандертальцами: общего предка европейцев и азиатов (включая меланезийцев), предка европейцев и восточных азиатов (после ответвления меланезийцев) и предка восточных азиатов (рис.3, справа). Стало уже традиционным определять области с повышенной частотой неандертальских вариантов и те, в которых следов древних геномов нет вовсе. Так вот, последние содержат много старых знакомых: гены, экспрессирующиеся в некоторых областях мозга, гены, связанные с аутизмом, и, конечно, *FOXP2*, ассоциирующийся с развитием речи. В геномах меланезийцев нашлась 21 область, в которой древние варианты могли быть адаптивны-



Рис.4. Области проживания пигмеев (племена бака, ака, мбензеле, кола и мбенга), в геномах которых обнаружили фрагменты, происходящие от неизвестного древнего человека.

ми: 14 — неандертальского происхождения, три — денисовского, три — неясного (невозможно различить) и одна область, в которой с повышенной частотой встречаются и неандертальские, и денисовские варианты. И опять эти области содержали гены различных метаболических систем, в том числе метаболизма липидов, и гены, связанные с иммунной системой.

Во второй работе был проведен анализ длин фрагментов денисовского и неандертальского происхождения из 257 современных геномов (представителей 120 популяций) [12]. На его основании было показано, что гибридизация предков современных австралонезийцев с денисовцами случилась позднее, чем с неандертальцами, так как денисовские фрагменты оказались длиннее. Это укладывается в общепринятый сценарий, согласно которому гибридизация с неандертальцем произошла у общего предка всех евроазиатов, а с денисовцем — у предка австралонезийцев. Как и в ряде других работ, доля денисовских фрагментов в геномах восточных азиатов оказалась выше, чем можно было предположить, исходя из более поздних взаимодействий с жителями Океании, а значит, следует предположить независимую гибридизацию предков восточных азиатов с денисовцами. Анализ областей, в которых никогда не находили древние аллели, показал преобладание областей X-хромосомных локусов, генов, экспрессирующихся в семенниках, и генов, находящихся под действием положительного отбора в линии современного человека. Все это согласуется с другими наблюдениями

и, в частности, указывает на пониженную фертильность мужского потомства смешанных пар.

Были продолжены исследования по поиску следов геномов древних людей в геномах современных африканцев: кочевых западноафриканских пигмеев ака (биака) и бака, живущих за счет охоты и собирательства на границах Центрально-Африканской Республики, Конго, Камеруна и Габона (рис.4). У них обнаружилось 265 фрагментов общей длиной примерно 20 млн нуклеотидов (две трети процента от размера генома), происходящих от генома, разошедшегося с геномом *H. sapiens* около миллиона лет назад [13]. Время гибридизации было определено с очень малой точностью: наилучшая оценка составляет 30 тыс. лет назад, но, возможно, вторая волна гибридизации произошла 9 тыс. лет назад. Эти оценки следует считать очень предварительными. Чтобы их улучшить, потребуется анализ существенно большего числа геномов, в том числе представителей разных этнических групп (в частности, центральноафриканских пигмеев мбути, южноафриканских — сан и коса).

Наконец, были секвенированы геномы 10 аборигенов Андаманских о-вов (в мировой литературе представленный дикарем Тонга из «Знака четырех» Конан Дойла). Оказалось, что в каждом из них примерно 15 млн нуклеотидов (0,5 % размера генома) происходят от неизвестного представителя рода *Homo* (не от денисовца или неандертальца!), разошедшегося с современным человеком минимум 300 тыс. лет назад [14]. Впрочем, эта работа была подвергнута критике: обнаружили

внутренние противоречия между приводимыми статистическими данными и предложенным объяснением, а также отсутствие аналогичного сигнала гибридизации в других наборах данных [15]. В любом случае было бы поучительно сопоставить предполагаемые ультрадревние фрагменты в геномах андаманцев и африканских пигмеев: совпадение даже небольшого числа последовательностей вполне убедительно свидетельствовало бы в пользу их реальности.

Следует отметить, что датировки событий дивергенции и гибридизации, полученные в обсуждаемых работах, слабо согласуются друг с другом, хотя сам факт, что гибридизации неоднократно происходили, уже не подлежит сомнению. Неясно также, до какой степени повышенная доля некрманьонских фрагментов в геномах людей, принадлежащих различным популяциям, вызвана дополнительными гибридизациями, а не другим режимом отбора. Вероятно, с этим можно было бы разобраться, не сопоставляя суммарные статистики, а проводя тщательный дифференциальный анализ геномов гибридизовавшихся неандертальцев и денисовцев, реконструируемых по фрагментам, сохранившимся в современных популяциях, в сравнении со свидетельствами положительного и очищающего отбора в линии кроманьонцев. Впрочем, данных для получения значимых результатов такого анализа сейчас недостаточно — нужны и новые геномы древних людей, и больше разнообразных современных геномов.

Отдельные гены и их группы

Анализ конкретных генов, в отличие от анализа геномов, зачастую приводит к вполне понятным и хорошо согласованным выводам. Пожалуй, самые яркие и многочисленные примеры неандертальского наследства — гены иммунной системы. Кроме уже упоминавшихся в прошлом обзоре гена *STAT1* (влияющего на активность врожденного иммунитета), кластера генов *OAS* (противостоящих вирусным инфекциям) и неандертальских и денисовских аллелей главного комплекса гистосовместимости класса I, была обнаружена высокая частота двух неандертальских и одного денисовского варианта области, содержащей кластер трех генов (*TLR6-TLR1-TLR10*) Toll-подобных рецепторов, отвечающих за врожденный иммунитет (рис.5) [16]. Та же область, а также гены *IFITM1-3* (кодирующие эффекторные молекулы иммунитета) имеют повышенную частоту неандертальских вариантов у европейцев, а гены *NLRC5* (кодирующий Nod-подобный рецептор, участвующий в регуляции врожденного иммунитета), *IRF6* (кодирующий регуляторный фактор интерферона) и *SIRT1* (кодирующий белок сиртуин-1) — у азиатов, причем в случае *TLR6-TLR1-TLR10* и *SIRT1* были также найдены независимые признаки положительного отбора — в сторону ускорения эволюции [17].

При систематическом анализе геномов меланезийцев была, в частности, обнаружена повышенная частота неандертальских аллелей генов *GBP4* и *GBP7*, экспрессия которых индуцируется интерфероном, а продукты — гуанилат-связывающие белки — участвуют в реализации механизмов врожденного иммунитета [11].

Систематический анализ вариантов, связанных с генетическими болезнями или предрасположенностями к ним, показал, что с неандертальским наследством преимущественно связаны нейropsychиатрические, кожные и иммунные заболевания [18]. Это неудивительно: коль скоро такие аллели сохранились до сих пор, они, видимо, были адаптивны (или хотя бы нейтральны) в другом контексте. Например, варианты, связанные с нарушениями обмена веществ, могли быть полезны при нерегулярном режиме питания. Особый интерес представляют неандертальские варианты генов, ассоциирующиеся с психическими расстройствами, в частности с депрессией. С одной стороны, известно, что у человека

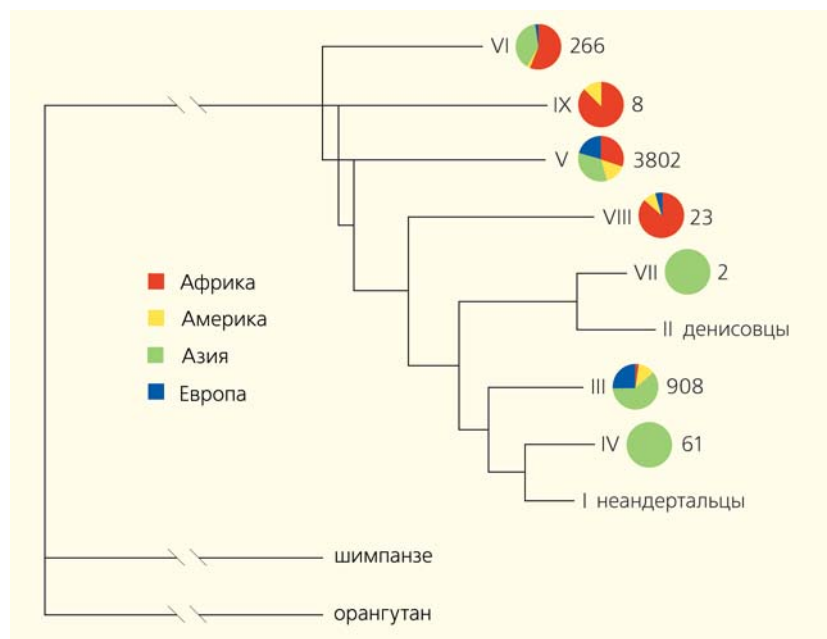


Рис.5. Филогенетическое дерево вариантов кластера генов *TLR6-TLR1-TLR10*, кодирующих Toll-подобные рецепторы: семи современных вариантов (III–IX), неандертальского (I) и денисовского (II) [16]. В круговых диаграммах представлено распределение современных вариантов по частям света. Справа от каждой диаграммы обозначено, сколько индивидов имеет такой гаплотип.

ее развитие связано с нарушением циркадных ритмов, а соответствующие гены перепредставлены в наборе генов, имеющих неандертальские варианты. Однако можно предположить, что эти варианты были адаптивны при переходе от жизни в тропиках к жизни в северных широтах с коротким световым днем зимой. С другой стороны, систематический анализ генов, связанных с шизофренией, показал, что многие из них находились под действием положительного отбора после разделения кроманьонцев и неандертальцев [19].

Итак, как и следовало ожидать, секвенирование новых геномов, как древних, так и современ-

ных, усложнило наши представления о предыстории человека. Стало ясно, что гибридизация кроманьонцев с неандертальцами происходила неоднократно, и потомки смешанных пар жили не только с кроманьонцами (став источником неандертальских аллелей у европейцев и азиатов), но и с неандертальцами (объясняя присутствие кроманьонских аллелей у алтайского неандертальца). В геномах некоторых африканцев были найдены следы гибридизации с неизвестным представителем рода *Homo*. Однако эволюционные сценарии, предложенные в различных статьях, плохо согласуются друг с другом. ■

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-24-00155).

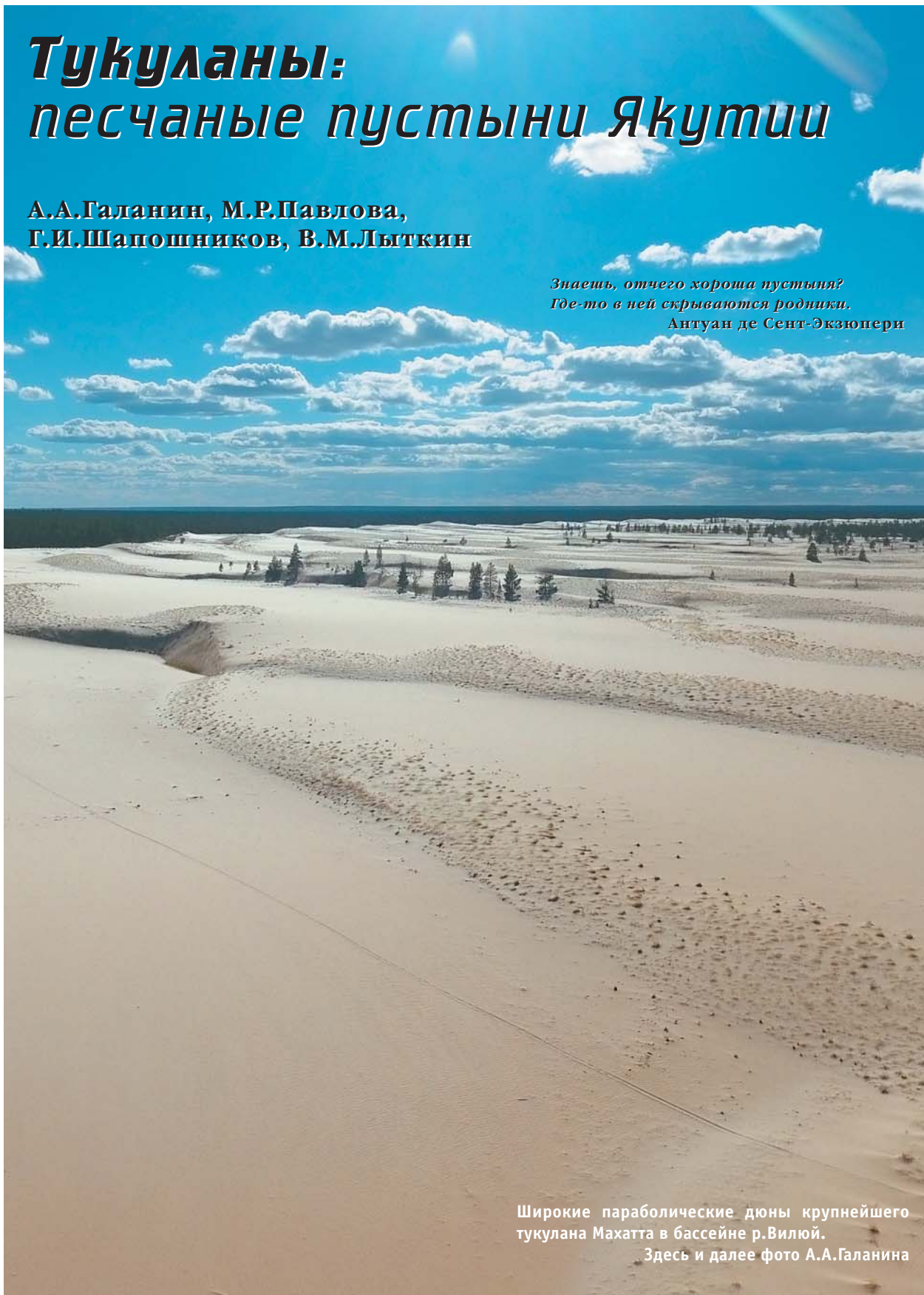
Литература

1. Гельфанд М.С. Геном неандертальца: открытые вопросы // Природа. 2016. №1. С.27–35.
2. Mendez F.L., Poznik G.D., Castellano S. et al. The divergence of Neandertal and modern human Y chromosomes // Am. J. Hum. Genet. 2016. V.98. P.728–734. Doi:10.1016/j.ajhg.2016.02.023.
3. Haldane J.B.S. Sex ratio and unisexual sterility in hybrid animals // Journ. of Gen. 1922. V.12. P.101–109. Doi:10.1007/BF02983075.
4. Wall J.D., Yang M.A., Jay F. et al. Higher levels of neanderthal ancestry in East Asians than in Europeans // Genetics. 2013. V.194. P.199–209. Doi:10.1534/genetics.112.148213.
5. Fu Q., Posth C., Hajdinjak M. et al. The genetic history of Ice Age Europe // Nature. 2016. V.534. P. 200–205. Doi:10.1038/nature17993.
6. Rogers R.L. Chromosomal rearrangements as barriers to genetic homogenization between archaic and modern humans // Mol. Biol. Evol. 2015. V.32. P.3064–3078. Doi:10.1093/molbev/msv204.
7. Sawyer S., Renaud G., Viola B. et al. Nuclear and mitochondrial DNA sequences from two Denisovan individuals // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2015. V.112. P.15696–15700. Doi:10.1073/pnas.1519905112.
8. Meyer M., Arsuaga J.L., de Filippo C. et al. Nuclear DNA sequences from the Middle Pleistocene Sima de los Huesos hominins // Nature. 2016. V.531. P.504–507. Doi:10.1038/nature17405.
9. Gibbons A. DNA from Neandertal relative may shake up human family tree // Science. 2015. Doi:10.1126/science.aad1740.
10. Kublwilm M., Gronau I., Hubisz M.J. et al. Ancient gene flow from early modern humans into Eastern Neanderthals // Nature. 2016. V.530. P.429–433. Doi:10.1038/nature16544.
11. Vernot B., Tucci S., Kelso J. et al. Excavating Neandertal and Denisovan DNA from the genomes of Melanesian individuals // Science. 2016. V.352. P.235–239. Doi:10.1126/science.aad9416.
12. Sankararaman S., Mallick S., Patterson N. et al. The combined landscape of Denisovan and Neandertal ancestry in present-day humans // Curr. Biol. 2016. V.26. P.1241–1247. Doi:10.1016/j.cub.2016.03.037.
13. Hsieh P., Woerner A.E., Wall J.D. et al. Model-based analyses of whole-genome data reveal a complex evolutionary history involving archaic introgression in Central African Pygmies // Genome Res. 2016. V.26. P.291–300. Doi:10.1101/gr.196634.115.
14. Mondal M., Casals F., Xu T. et al. Genomic analysis of Andamanese provides insights into ancient human migration into Asia and adaptation // Nat. Genet. 2016. V.48. P.1066–1070. Doi:10.1038/ng.3621.
15. Skoglund P., Mallick S., Patterson N. et al. No evidence for unknown archaic ancestry in South Asia // 2016. BioRxiv. Doi:10.1101/068155.
16. Dannemann M., Andrés A.M., Kelso J. Introgression of Neandertal- and Denisovan-like haplotypes contributes to adaptive variation in human Toll-like receptors // Am. J. Hum. Genet. 2016. V.98. P.22–33. Doi:10.1016/j.ajhg.2015.11.015.
17. Deschamps M., Laval G., Fagny M. et al. Genomic signatures of selective pressures and introgression from archaic hominins at human innate immunity genes // Am. J. Hum. Genet. 2016. V.98. P.5–21. Doi:10.1016/j.ajhg.2015.11.014.
18. Simonti C.N., Vernot B., Bastarache L. et al. The phenotypic legacy of admixture between modern humans and Neandertals // Science. 2016. V.351. P.737–741. Doi:10.1126/science.aad2149.
19. Srinivasan S., Bettella F., Mattingsdal M. et al. Genetic markers of human evolution are enriched in schizophrenia // Biol. Psychiatry. 2016. V.80. P.284–292. Doi:10.1016/j.biopsych.2015.10.009.

Тукуланы: песчаные пустыни Якутии

**А.А.Галанин, М.Р.Павлова,
Г.И.Шапошников, В.М.Лыткин**

*Знаешь, отчего хороша пустыня?
Где-то в ней скрываются родники.
Антуан де Сент-Экзюпери*



Широкие параболические дюны крупнейшего
тукулана Махатта в бассейне р.Вилуй.
Здесь и далее фото А.А.Галанина

Даже на мелкомасштабных космических снимках Центральной Якутии нетрудно заметить светлые пятна среди изумрудно-зеленых озерно-болотных просторов, покрытых листовенничным редколесьем. Это тукуланы — крупные массивы развееваемых песков, напоминающие пустыни и образовавшиеся там, где им, казалось бы, совсем не место. Белоснежные дюны выглядят внушительными географическими аномалиями. Их ландшафтная структура удивительно многообразна. Здесь можно встретить серповидные и копьевидные дюны, котловины выдувания, эолово-биогенные бугры и гривы, упорядоченные цепочки серповидных понижений с небольшими озерами и миртовыми болотами, извилистые сухие ложбины, занятые редкими лесами из сосны и березы.

Феномен тукуланов давно привлекает внимание исследователей [1]. Уже известно, что песчаные дюны — специфические реликты холодной арктической криопустыни, занимавшей обширные пространства Центральной Якутии относительно недавно — всего 15–20 тыс. лет назад. Однако во многом эти необычные образования все же продолжают оставаться *terra incognita*.

В обрывах крупных рек — Лены, Вилюя, Линде и Синеи — встречаются разрезы, в которых запечатлена удивительная история формирования тукуланов. Так, на правом берегу р.Вилюй, в 30 км ниже пос.Кысыл-Сыр (63°54'с.ш., 123°16'в.д.), расположен разрез мощностью до 25–30 м, вскрывающий строение одноименного тукулана. Это яркий пример криогенно-эоловых образований бассейна нижнего течения Вилюя. Площадь Кысыл-Сырского тукулана составляет 48 км², а протяженность естественного обнажения достигает 2,5 км. Нам удалось исследовать этот разрез и попытаться расшифровать несколько

© Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М., 2016



Алексей Александрович Галанин, доктор географических наук, руководитель лаборатории радиоуглеродного анализа Института мерзлотоведения имени П.И.Мельникова СО РАН, профессор кафедры региональной геологии и геоинформатики Северо-Восточного федерального университета имени М.К.Аммосова. Научные интересы — палеогеография четвертичного периода и радиоуглеродное датирование.



Мария Романовна Павлова, младший научный сотрудник лаборатории общей геокриологии того же института. Занимается спорово-пыльцевым анализом, геоморфологией и палеогеографией дюнных образований Центральной Якутии.



Григорий Иванович Шапошников, инженер-исследователь лаборатории радиоуглеродного анализа того же института. Научные интересы связаны с радиоуглеродным анализом, геофизическими методами исследования криолитозоны.



Василий Михайлович Лыткин, младший научный сотрудник лаборатории общей геокриологии того же института. Изучает геоморфологию криогенных ландшафтов, занимается дистанционным картографированием, ГИС-технологиями.

Ключевые слова: Якутия, тукуланы, эоловые отложения, криопустыни, радиоуглеродные датировки.

Key words: Yakutia, tukulans, aeolian deposits, cryogenic desert, radiocarbon dates.

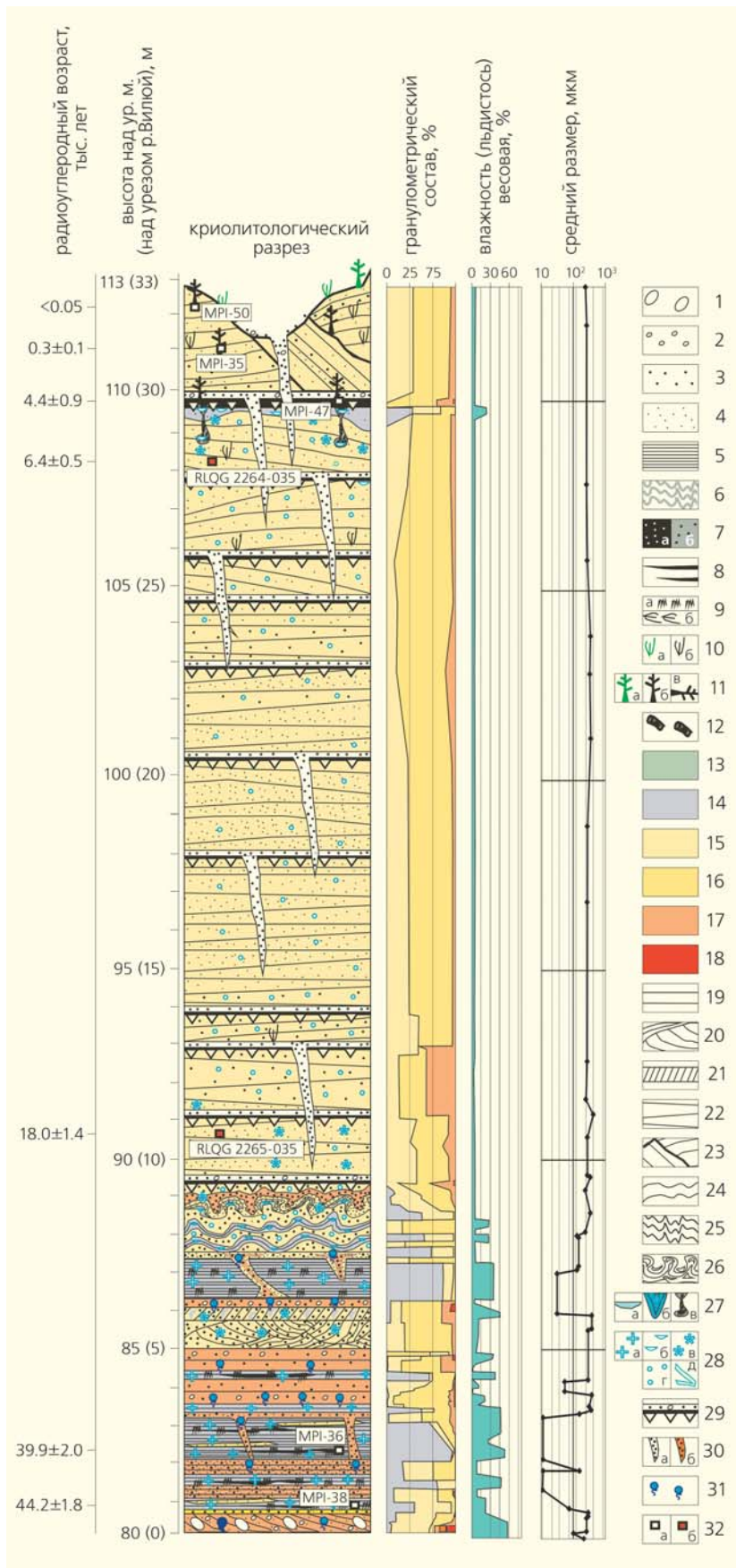
страниц недавней истории развития окружающих ландшафтов. Наши палеогеографические реконструкции базируются на результатах радиоуглеродного [2, 3], спорово-пыльцевого [4, 5] и криофациального анализов, а также на данных о составе погребенных торфяников. Выделены основные стадии формирования Кысыл-Сырского тукулана и этапы развития растительности в долине нижнего течения р.Вилюй.



Параболические дюны Кысыл-Сырского тукулана на правом берегу р.Вилуй.



Естественное обнажение позднечетвертичных криогенно-эоловых отложений и выходы подземных источников в береговом обрыве р.Вилуй (Кысыл-Сырский тукулан).



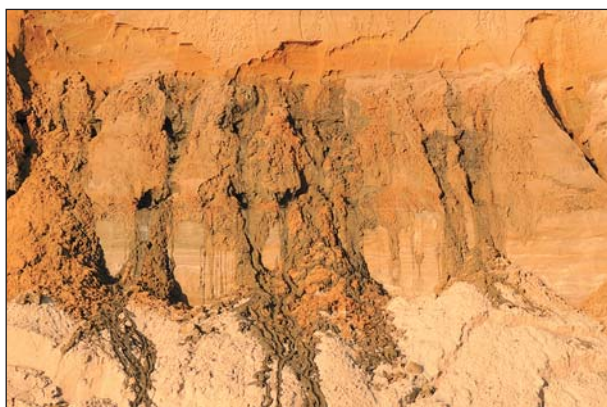
Криолитологический разрез первой надпойменной террасы правобережья р.Вилуи. Условные обозначения. Литология (1–12): 1 — мелкая галька, 2 — мелкий гравий, 3 — средний песок, 4 — мелкий песок и супесь, 5 — ил и суглинок, 6 — супесь с тонкими (1 мм) ритмичными прослоями суглинка, 7 — гумус с примесью песка (а) и песок с примесью гумуса (б), 8 — тонкие прослои и линзы аллохтонного растительного детрита, 9 — кустарничковый (а) и травянистый (б) торф, 10 — живые (а) и отмершие (б) вертикально погребенные стебли и куртины злаков, 11 — живые (а) и ископаемые (б — вертикально захороненные, в — горизонтально захороненные) деревья, 12 — уголь и фрагменты окаменелой древесины мелового возраста. Гранулометрия (13–18): 13 — тяжелый суглинок и глина (<0.01 мм), 14 — супесь с суглинком интенсивно оглеенные (<0.1 мм), 15 — мелкий песок (0.1–0.25 мм), 16 — средний песок (0.25–0.5 мм), 17 — крупный песок (0.5–1 мм), 18 — гравий, мелкая галька. Текстуры флювиальные сингенетические (19–21): 19 — горизонтальная, 20 — линзовидная, 21 — косослоистая. Текстуры эоловые (22, 23): 22 — пологая перекрестно-слоистая (параболических дюн) с вариацией толщины элементарных слоев от 1 мм до 30 см, 23 — круто наклонная перекрестно-слоистая (накидных дюн и барханов). Постлитогенные инволюции и криотурбация (24–26): 24 — волнистая, 25 — пloyчатая, 26 — диапировая. Распределение льда (27): а — тонкие линзы и шпирьы сублимационных льдов, б — вертикальные ледяные жилы полигонального типа, в — мерзлые грунтовые (суглинисто-гумусовые) жилы. Криотекстуры цементирующего льда (28): а — массивная, б — мелкоячеистая, в — гнездовидная сублимационная, г — контактная сублимационная. Прочие элементы: 29 — структурные и седиментационные несогласия, поверхности интенсивной дефляции, 30 — сухо-мерзлые син- и эпигенетические жилы: а — заполненные отбеленным кварцевым песком, б — интенсивно ожелезненные (зоны фильтрации отмерших межмерзлотных таликов), 31 — участки выхода самоизливающихся межмерзлотных таликов, 32 — точки определения абсолютного возраста радиоуглеродным (а) и оптико-люминесцентным (б) методами.

Каргинское межледниковье

В основании разреза лежит пачка аллювиальных отложений. В ней чередуются прослой гравия и мелкой гальки, а также косослоистые пески и супеси. Все это — фации, сформировавшихся в русле Палеовилюя. В разрезе аллювиальной пачки обнажаются темные отверстия, из которых сочатся грунтовые воды межмерзлотных таликов. Из таких зон разгрузки сформированы горизонтальные ярусы.



Косослоистый русловой аллювий в нижней части разреза Кысыл-Сырского тукулана. Эти отложения накапливались в русле Палеовилюя.



Горизонтально-слоистый плесовый аллювий с эпигенетическими устьями выходов межмерзлотных вод.

Время формирования аллювиальных отложений нижней части разреза Кысыл-Сырского тукулана относится к концу предпоследнего межледниковья, именуемого в Сибири каргинским термохроном и длившегося в интервале 65–28 тыс. лет назад. В его начальный период климат был значительно мягче, чем в предшествовавший зырянский криохрон. Однако считается, что в то время было все же холоднее и суше, чем сегодня. Начавшаяся около 100 тыс. лет назад последняя ледниковая эпоха не закончилась, а лишь взяла небольшую передышку. В горах Западного Верхоянья площадь ледников несколько сократилась, а на поверхности Приленской равнины остались обширные пояса морен.

Во время каргинского термохрона общий объем материкового оледенения значительно превышал современный, поэтому уровень моря был ниже, чем сегодня, примерно на 20–30 м [6]. Это привело к врезанию рек и формированию пойм, которые оказались теперь ниже уреза Вилюя.

Низкая циклоническая активность на протяжении каргинского термохрона способствовала сохранению относительно сухого климата. Территория современной Центральной Якутии была занята в основном светлохвойной лиственничной тайгой. Многие исследователи считают, что в каргинское время здесь преобладали относительно сухие лиственнично-кустарниковые редколесья с примесью березы белой, а также различные варианты кустарниковых тундр, обедненных степей (тундростепей) и лугов [6]. На более сухих участках — водоразделах и бровках террас — встречались заросли кедрового стланика и сосновые рощи. Из кустарничков доминировали плаунки, верескоцветные и др. Вероятно, что в пойменных ландшафтах Вилюя кроме типичных ивняково-ольховниковых ассоциаций и лугов где-то сохранились островки еловых лесов.

Кровлю аллювиальной пачки на высоте около 88–87 м над ур.м. венчает горизонт тонкослоистых темно-сизых пойменных суглинков. Поймен-



Пойменный аллювий — темно-сизые горизонтально-слоистые суглинки с песчаными жилами и криотурбациями.

ная фация совершенно не содержит древесных остатков. Отложения представляют собой тонкослоистый сапропель с тонкими пропластками растительного детрита — листьев, травы, тонких веточек кустарничков. Все это накапливалось в конце каргинского термохрона, а именно во время конощельского похолодания [7], после которого началась последняя фаза плейстоценового оледенения — сартанский криохрон. Характер пойменных отложений говорит нам о том, что растительный покров окружающих территорий в то время был относительно бедным.

Несмотря на то что в спорово-пыльцевых спектрах позднекаргинских отложений Кысыл-Сырского разреза отмечено некоторое количество пыльцы ели, сосны и других бореальных видов, здесь все-таки доминируют виды сухолюбивых степных сообществ — полыни, злаки, осоковые, а также элементы сухих кустарничковых тундр — плаунок сибирский, кустарниковая береза, сухолюбивые мхи и лишайники. Отметим, что перечисленные таксоны плохо совместимы между собой и относятся к различным биогеографическим зонам. Например, присутствие пыльцы ели указывает на умеренно влажную темнохвойную бореальную тайгу, а плаунка сибирского — на сухую гипоарктическую тундру. Поэтому при интерпретации спорово-пыльцевых спектров, особенно из аллювиальных отложений, крайне важно учитывать возможность переотложения пыльцы древесной растительности из более древних осадков теплых эпох.

Сартанское оледенение

Каргинские отложения (пойменная фация) имеют массивную криотекстуру и содержат до 30% льда-цемента. Их самая верхняя часть — кровля — интенсивно деформирована процессами криотурбации. Пласт сизых пойменных суглинков, изначально залегающий субгоризонтально, разбит короткими вертикальными трещинами, образующими хорошо знакомую всем мерзлотоведам полигональную решетку.

Многим жителям Якутии известно, что деформации грунта и формирование полигонов с вертикальными ледяными жилами связано с сезонным промерзанием и оттаиванием грунта. Трещины, раскрывающиеся на поверхности поймы зимой, в весенне-летний период заполняются снеговыми, паводковыми, дождевыми или надмерзлотными водами, которые, замерзая, превращаются в ледяные клинья. Однако полигональные трещины древнего пойменного горизонта Кысыл-Сырского разреза заполнены не ледяными клинциями, а сухим хорошо отвееванным крупнозернистым песком с охристыми разводами. Возникают вопросы: откуда брался сухой песок, почему трещины промерзающей палеопоймы не наполни-

лись водой и куда девались все эти перечисленные выше воды? Все-таки пойма — один из наиболее низких элементов рельефа долины, а периодическое затопление — основной процесс ее формирования.

Дело в том, что Вилюй, как и многие другие реки Центральной Якутии, относится к транзитному типу, он практически не имеет питания в зимний период. И даже летом, во время межени, уровень падает так низко, что открываются участки русла. Около 28 тыс. лет назад, с началом последнего позднеплейстоценового похолодания, климат с каждым годом становился все более сухим и холодным. К летней межени Палеовилюй практически пересыхал, обнажая массы русловых песков. В зимний период снега выпадало все меньше, к тому же он быстро испарялся на сильном морозе*. Растительный покров также становился все более скудным. Постепенно исчезали древесные и кустарниковые виды, почвенный покров иссушался и местами редуцировался. Свободно гуляющие по долинам ветры развеивали наносы обезвоженных русел рек. Берега покрывались слоем песка и пыли. Пляжи и косы превращались в прирусловые дюны и блокировали сток мелких водотоков. Это приводило к местным затоплениям, образованию внутренних дельт и озерно-болотных котловин, вокруг которых сохранялись островки чахлой лиственничной лесотундры. С понижением количества осадков все менее заметными становились весенне-летние половодья. Настал момент, когда очередное половодье уже не достигло уровня поймы. Она превратилась в низкую, покрытую полигональной решеткой поверхность. Аллювиальное накопление осадков здесь полностью прекратилось. Начали господствовать криогенные и эоловые процессы.

Все эти изменения прекрасно видны в разрезе Кысыл-Сырского тукулана: каргинский пойменный горизонт сменяется толщей эоловых отложений, которая достигает мощности 20 м. Это и есть осадки наиболее холодной эпохи плейстоцена — сартанского криохрона.

Глобальный термический минимум

По мере зачистки и опробования разреза тукулана, двигаясь по нему снизу вверх, мы наконец приблизились к наиболее суровому этапу истории всей четвертичной эпохи — глобальному термическому минимуму, наступившему в середине сартанского криохрона, в интервале 20–18 тыс.

* Экспериментальные данные показывают, что в современном климате примерно 30% снежного покрова в Центральной Якутии испаряется. Происходит это путем прямой возгонки, минуя жидкую фазу. Такой интенсивности зимнего испарения способствует крайне низкая влажность воздуха.

лет назад. Оптико-люминесцентная датировка* 18 ± 1.4 тыс. лет назад, полученная в нижней части эоловой пачки, как раз относится к этому пику похолодания.

О сухих и холодных климатических условиях той эпохи свидетельствует пологая перекрестная слоистость песков. Она указывает на динамику эоловых процессов — чередование дефляции с аккумуляцией. Рыхлое сложение и высокая пористость осадков говорят о воздушном осаждении частиц, а крайне низкая льдистость (влажность) и практически полное отсутствие растительных остатков — об условиях холодной криопустыни.

Здесь необходимо остановиться на характере льдистости дюнных песков. По этому показателю они кардинальным образом отличаются от других типов многолетнемерзлых тонкодисперсных отложений. Содержание любой влаги в дюнах крайне мало, за исключением нижних слоев, которые служили зонами инфильтрации подземных вод. В них лед-цемент нередко занимает все поровое пространство между частицами, формируя так называемую массивную криотекстуру. В собственно эоловых перекрестно-слоистых песках содержание льда не превышает 5%, причем распределен он неравномерно. В целом в этой фациальной разновидности преобладает контактная криотекстура — сформировавшаяся при конденсации и замерзании переохлажденного водяного пара. Испарение и конденсацию, которые проходят, минуя жидкую фазу, иногда называют сублимацией. Отдельные частицы песка в дюнных отложениях лишь слегка приморожены друг к другу ребрами и вершинами, при этом все поровое пространство свободно ото льда. Данный тип криотекстуры именуют контактной сублимационной.

Еще один специфический тип распределения эпигенетического (вторичного) льда часто встречается в перекрестно-слоистых дюнных песках. Это так называемая тонкошлифовая криотекстура. Вторичный лед, имеющий также сублимационное происхождение, образует в рыхлом переохлажденном песке с отрицательными температурами тонкие горизонтальные прослойки и пленки толщиной не более 0.5 мм. Расстояние между соседними прослойками от нескольких миллиметров до 5–10 см. При прокладке шурфа в таких отложениях лопата легко с хрустом разрезает пленки льда, а находящийся между ними сухой песок высыпается из стенки. Создается структура, напоминающая торт «Наполеон».

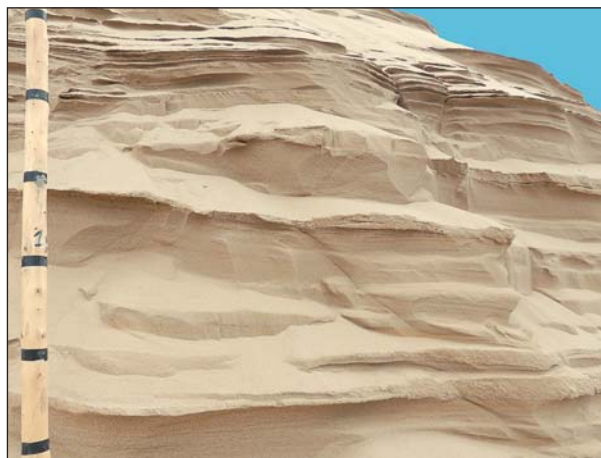
Сублимационные криотекстуры — хороший признак, указывающий на формирование песча-

ных отложений в экстрааридных условиях при крайне низком увлажнении.

Внутри песчаных пластов видна тонкая микро-слоистость, отражающая внутригодовую (сезонную) ритмичность эолового осадконакопления. Слоистость образована чередованием летних суб-параллельных прослоев отбеленного кварцевого песка толщиной 2–3 см и зимних более тонких (1–2 мм) слоев охристой супеси с небольшим количеством темной пыли. Эта микро-слоистость придает осадкам специфический полосчатый облик, что позволяет однозначно отличать их от всех других типов супесчаных отложений региона. Зимние супесчано-суглинистые слои слабо сцементированы гидроокислами железа по сравнению с отбеленными летними, поэтому в береговых обрывах, разрушающихся естественным путем под воздействием ветра и гравитации, происходит избирательная денудация, возникает специфическая микро-ступенчатость, появляются тонкие козырьки.

В целом эоловые пачки отложений в разрезе отличаются светлым цветом, а также наличием охристых горизонтов, что свидетельствует об окислительных условиях накопления — хорошей аэрации и высокой сухости. Во влажных же восстановительных обстановках, напротив, железо подвижно: оно переходит в закисную двухвалентную форму, мигрирует с почвенными растворами и поступает в заболоченные понижения, где накапливается в виде сизого глеевого горизонта.

Еще один характерный признак древних эоловых отложений — узкие вертикальные трещины шириной до 10–15 см и длиной до нескольких метров, заполненные сухим отбеленным кварцевым песком. Они напоминают микро-разрывы и имеют отчетливые признаки вертикальных смещений. Кроме того, отдельные трещины ветвятся, резко меняют направление. На поверхнос-



Дюнные пески с микрополосчатой полой слоистостью. Тонкие козырьки — результат избирательной денудации песчаных пород.

* Оптико-люминесцентный метод датирования основан на свойстве фотоэффекта «засвечивания» кварцевых зерен, которые обладают способностью захвата световых квантов в кристаллическую решетку в момент отложения осадка. После погребения под очередными слоями отложений зерна кварца начинают медленно выпустать захваченные кванты.

ти некоторых котловин выдувания трещинная структура отпрепарирована ветром. Слагающий трещины материал устойчив к дефляции и морфологически схож с вулканическими микродайками. Ветвящиеся трещины не организованы в полигоны, а крайне низкая льдистость и высокая пористость отложений не позволяют связать образование трещин исключительно с мерзлотным пучением и полигонообразованием. Поэтому генезис песчаных жил остается пока неясным. Вероятно, он может быть связан с деформациями песчаного массива в результате его гравитационного уплотнения и усадки или же с глубинной суффозией.

Во время полевых работ в июне 2014 г., находясь в нескольких сотнях метров от Кысыл-Сырского тукулана, мы неоднократно слышали мощ-

ные, как пушечный выстрел, звуки. Можно было предположить, что рушились большие массы грунта. Однако поиски предполагаемых мест обрушения не увенчались успехом: никаких признаков крупных обвалов мы не обнаружили. Возможно, причиной специфических звуков стало именно формирование новых трещин внутри тукулана.

Некоторые исследователи считают, что во время глобального термического минимума зимние температуры в наиболее континентальных районах Северной Азии могли опускаться ниже -100°C . В таких условиях атмосферный воздух становится почти абсолютно сухим, происходит обезвоживание земной поверхности путем прямой сублимации внутрпочвенной влаги и льдов. Это привело к практически полному исчезновению древесной растительности на территории



Микроразрывы и песчаные жилы в криогенно-эоловых отложениях тукуланов: *а* — эпигенетические деформации и песчаные жилы в дюнных песках, *б* — отпрепарированные жилы на поверхности котловины выдувания, *в* — микроразрыв с горизонтальным смещением, рассекающий вертикальную песчаную жилу, *г* — эпигенетическая жила, заполненная крупным песком с примесью мелкого гравия и признаками ожелезнения (толщина жилы 0.5 м, глубина 8 м).

Центральной Якутии и распространению здесь криостепей и каменистых полупустынь.

В результате катастрофического снижения количества осадков даже крупные реки часто полностью пересыхали. На обдуваемых ветром водоразделах почвенно-растительный покров местами вовсе редуцировался, активная дефляция приводила к выносу мелкозема и формированию каменистых пустынь с ветрогранниками — специфическими трех- и четырехгранными камнями с асимметрично отшлифованными поверхностями. На речных террасах возникали обширные дюнные массивы, двигавшиеся в юго-восточном направлении.

Тем не менее даже во время глобального термического минимума ландшафты не были абсолютно пустынными и безжизненными. Движение песчаных дюн приводило к частичному блокированию стока и разрушению мелкодолинной дренажной сети. Формировалось множество бессточных котловин и внутренних дельт с небольшими озерами, где аккумулировалась влекомая ветром пыль. Здесь накапливались специфические ледово-лессовые отложения, служившие хорошим водоупором и аккумулятором подземных льдов. В озерно-болотных котловинах флора региона пережидала глобальное похолодание, организуясь в виде мозаичного сочетания лесотундровых, луговых и криостепных сообществ.

Окончание ледниковой эпохи

В кровле сартанской части разреза Кысыл-Сырского тукулана — эоловой пачки микрополосчатых супесей — заметны изменения, свидетельствующие о постепенном смягчении климата. Здесь начинают попадаться единичные вертикальные корешки и тонкие прослойки (1–2 мм) дерна. Они чередуются со слоями чистого хорошо отве-



Чередование погребенных дерновых горизонтов и эоловых песков.

янного кварцевого песка. Это свидетельствует о снижении активности эоловых процессов и о возможности кратковременного закрепления дюн травянистой растительностью.

В самой верхней части эоловых отложений этого возраста мы наблюдаем резкое изменение обстановки осадконакопления по всей площади тукулана, что отражает уже не смену местных условий, а глобальный климатический переход, случившийся на рубеже позднего плейстоцена и голоцена, около 12.5 тыс. лет назад.

Климатический оптимум голоцена

Особенно ценной находкой в исследованном обнажении стал погребенный под современными песками торфяник линзовидной формы, мощный местами достигает 2 м. Органический материал торфяника имеет светло-бурый цвет, а слагающая его растительность отличается очень хорошей сохранностью. Торф расслаивается на горизонтальные пласты, состоящие из разных видов растений. Многие из них были определены в лаборатории геоботаники Биолого-почвенного института ДВО РАН. Кроме того, получен абсолютный возраст каждого пласта торфа и выполнен спорово-пыльцевой анализ. Полученные результаты позволяют уверенно реконструировать события, происходившие в пределах Кысыл-Сырского тукулана в интервале от 10 до 3.5 тыс. лет назад — а именно такой возраст был установлен для нижней и верхней частей торфяника соответственно.

Итак, около 12.5 тыс. лет назад эоловые процессы постепенно затухают, а всхолмленная поверхность дюнного массива начинает закрепляться куртинами полыни, чабреца, горцев и некоторых видов злаков. Сначала зарастали пониженные участки — котловины выдувания и междюнные понижения. В таких местах накапливалось боль-



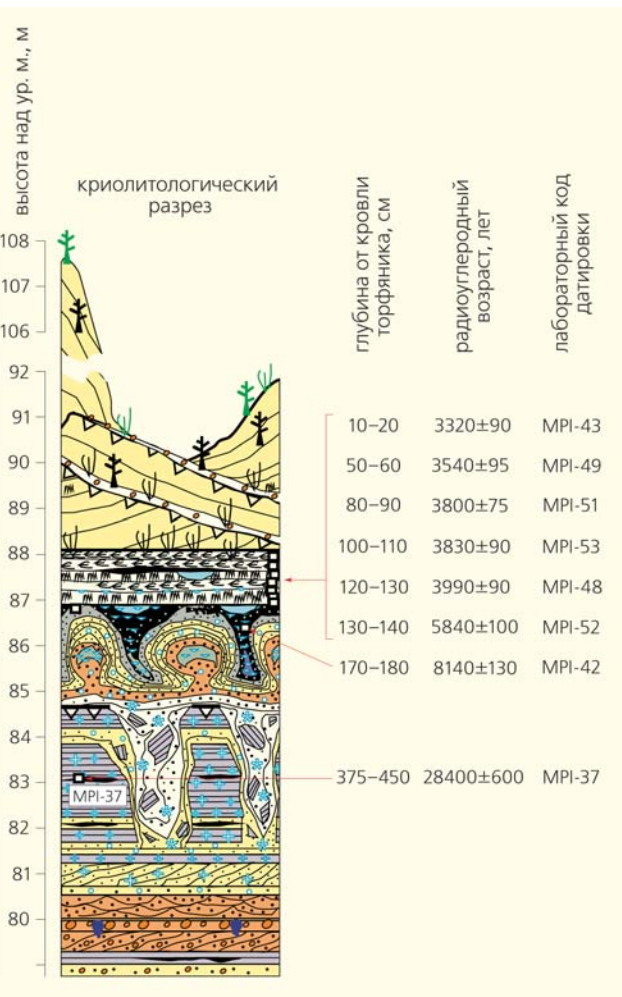
Голоценовый торфяник, вскрытый канавой в дюнных отложениях Кысыл-Сырского тукулана.

ше снега, поэтому и грунт был значительно лучше увлажнен. Полынно-злаковые сообщества котловин активно улавливали пыль и песок, сдуваемые с обнаженных дюнных гребней. Это привело к заиливанию и переувлажнению почвы. Около 10 тыс. лет назад полынно-злаковые сообщества в днищах междюнных котловин сменились лугами с фрагментами лиственничной лесотундры. Позднее, уже примерно 9 тыс. лет назад, им на смену пришли луговые ассоциации, впоследствии превратившиеся в осоковые болота. На сухих участках распространились сообщества из кустарниковой ольхи и березы.

Процессы ландшафтных изменений первой половины голоцена происходили на фоне глобального потепления, таяния ледников, подъема уровня океана и увеличения влажности климата. Около 7 тыс. лет назад уровень океана достиг современного и даже превысил его примерно на 5 м. К этому времени почти вся поверхность тукулана, за исключением дюнных гребней, покрылась слоем почвы и растительности, состоящей из мозаичного сплетения лиственнично-березовых ассоциаций с примесью кедрового стланика, ольхи и верескоцветных кустарничков.

Некоторые из заболоченных понижений превратились в мелкие бессточные осоковые озера, берега которых поросли миртом болотным, багульников, голубикой, шикшей. Причиной формирования этих специфических озер стало заиливание днищ междюнных котловин, постепенное промерзание и формирование мерзлого водоупора. Это препятствовало просачиванию надмерзлотных вод в нижние горизонты песчаных отложений тукулана. В результате образовалось множество замкнутых котловин, где формировались дерново-торфяные глеевые почвы и накапливались озерные сапропели. В южной части Кысыл-Сырского массива встречаются такие «тукуланные озера». Их глубина не превышает 1,5 м, а вода прогревается летом выше 25°C. Поразительно, что на глубине 15–20 см от поверхности дна под слоем ила находится многолетнемерзлый высокольдистый горизонт.

Около 6–5 тыс. лет назад в растительном покрове тукулана снова происходят существенные



Разрез и абсолютные датировки торфяника, погребенного в Кысыл-Сырском тукулане под позднеголоценовыми дюнными отложениями. Условные обозначения — см. рис. на с.47.

изменения. В результате повышения среднегодовых температур увеличивается глубина сезонного протаивания, что негативно влияет на внутрпочвенное увлажнение. Лиственнично-березовые сухие редколесья сменяются еще более ксерофитными группировками, в составе которых доминируют сосна обыкновенная и береза белая. В напочвенном ярусе распространяются брусника и толокнянка. Так в истории Кысыл-Сырского тукулана завершилась первая, наиболее теплая часть голоцена, именуемая здесь бореальным оптимумом.

Парковые сосновые леса, сформировавшиеся на Кысыл-Сырском тукулане около 7–6 тыс. лет назад, существуют и по сей день. Здесь систематически происходят естественные возгорания. Однако низовые пожары, как правило, не уничтожают лес полностью. Сосна обыкновенная эволюционировала как вид в условиях пирогенных лесостепных ландшафтов, поэтому классические, высокие, как свечи, сосны в нижней части не имеют ветвей. Это своеобразное приспособление для защиты от огня.



Осоковое болото с багульником и миртом обыкновенным в междюнном понижении Кысыл-Сырского тукулана. Такие оазисы часто встречались в пределах песчаных криопустынь Центральной Якутии во время сартанского и более ранних криохронов, привлекая большое количество крупных млекопитающих и птиц. В подобных ландшафтах происходит «гибридизация» растительных сообществ, возникают исключительно редкие в природе ассоциации из ксерофитных и гидрофильных видов.

Впрочем, около 5 тыс. лет назад на Кысыл-Сырском тукулане все же случился грандиозный верховой пожар. Обширный сосновый лес выгорел дотла. Огонь уничтожил даже верхнюю часть почвенного покрова. Свидетельства этой природной катастрофы сохранились в разрезе в виде выдержанного горизонта со множеством углей и головешек на глубине 2–3 м от поверхности современных дюн. Горизонт подстилается сохранившимися фрагментами почвы, которые в днищах котловин выдувания местами выходят на поверхность в виде охристых пятен ожелезненного песка с большим количеством внутрипочвенных железистых конкреций (ортштейнов). Ветер перекачивает угольки и трубчатые ортштейны, они собираются и скапливаются в понижениях.

Новое похолодание

Со второй половины голоцена во всем мире началось постепенное похолодание климата. Около 4,5 тыс. лет назад наступила так называемая неогляциальная эпоха, вызвавшая увеличение ледни-

ковых покровов и гляциоэвстатическое снижение уровня океана. В этот интервал времени (около 4,5–2,0 тыс. лет назад) на фоне похолодания стало выпадать меньше осадков, увеличивалась сухость климата.

Выгоревшая поверхность Кысыл-Сырского тукулана так и не смогла полностью закрепиться вплоть до настоящего времени, хотя периодически здесь появлялись отдельные деревья, формировались даже островки березово-соснового леса. Тот пожар стал триггером для активизации очередной, современной фазы эоловых процессов. Сначала выгоревшее и лишённое растительности пространство превратилось в эмбриональный дюнный массив. Он стал быстро разрастаться, двигаясь в юго-восточном направлении. Ряды серповидных дюн не спеша поглощали уцелевшие после пожара окружающие леса. Уничтожение почвенно-растительного покрова происходило двумя способами. Первый заключался в засыпании живых деревьев крутым фронтом надвигающейся дюны. Суть второго состоит в выдувании почвогрунта из-под корневой системы растения, что приводит к его иссушению и гибели.

Множество маломощных почвенных горизонтов и деревьев, вертикально погребенных в дюнах, хорошо видно в верхней части берегового обрыва Кысыл-Сырского тукулана, особенно в стенках гравитационных обвалов. Во внутренней части также можно увидеть торчащие из песка макушки высушенных деревьев. Выполненные серии радиоуглеродных датировок показали, что возраст наиболее старых погребенных деревьев не превышает 200–300 лет. Это свидетельствует о том, что наиболее активная фаза развития эоловых процессов практически совпадает с глобальными климатическими событиями малого ледникового периода XI–XIX вв. Как ни парадоксально, но имеющиеся данные вынуждают признать, что каровые ледники хребта Сунтар-Хаята в Восточной Якутии наступали одновременно с расширением тукуланов в нижнем течении р.Виллой. Причем и тот и другой процесс достигли максимума во второй половине XIX в.

Первые рекогносцировочные исследования тукуланов Центральной Якутии начаты всего два-три года назад. Этот природный феномен оказался настолько интересен и многогранен, что к на-



Стенка гравитационного обвала, вскрывающая строение позднеголоценовой части Кысыл-Сырского дюнного массива с погребенными почвенно-растительными горизонтами.

стоящему времени сформировался большой коллектив специалистов, активно принимающих участие в ежегодных полевых работах. Несмотря на немалый объем уже полученных данных, количество уникальных находок и открытий только увеличивается. Вскоре мы продолжим знакомить с ними читателей «Природы». ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 12-05-98507, 14-05-0043514 и 15-45-05129).

Литература

1. Куть А.А., Галанин А.А., Лонгинова А.И. Пустыни на мерзлоте // Наука и техника в Якутии. 2014. №1(26). С.27–30.
2. Галанин А.А., Дьячковский А.П., Лыткин В.М. и др. Результаты определения абсолютного возраста образцов в радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН // Наука и образование. 2015. №4(80). С.45–49.
3. Галанин А.А., Дьячковский А.П., Лыткин В.М. и др. Радиоуглеродная реконструкция истории формирования дюнных отложений (тукуланов) бассейна нижнего течения р.Виллой // Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Иркутск, 2015. С.109–111.
4. Павлова М.Р., Галанин А.А., Рудая Н.А. Палинологическая характеристика четвертичных отложений массива развееваемых песков – тукулан Кысыл-Сырский (Центральная Якутия) // Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Иркутск, 2015. С.352–353.
5. Павлова М.Р., Галанин А.А., Рудая Н.А. Палинологические и радиоуглеродные данные о верхнечетвертичных отложениях дюнного массива - тукулан Кысыл-Сырский (Центральная Якутия) // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2016. Т.7. №1(13). С.100–107.
6. Хопкинс Д.М. История уровня моря в Берингии за последние 250 000 лет // Берингия в кайнозое. Владивосток, 1976. С.9–27.
7. Шофман И.Л., Кинд Н.В., Пахомов М.М. и др. Новые данные о возрасте отложений низких террас в бассейне р.Виллой // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1977. №47. С.100–107.



Вести из экспедиций

Атлантика: обмен вещества на границе вода—воздух

И.А.Немировская,

доктор геолого-минералогических наук

А.Н.Новигатский,

кандидат геолого-минералогических наук

З.Ю.Реджепова

Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН (ИО РАН)
Москва

Весной 2015 г. научно-исследовательское судно (НИС) «Академик Иоффе» после работ в Антарктиде возвращалось на ремонт в г.Гданьск. Мы, три сотрудника ИО РАН, воспользовались возможностью провести исследования по маршруту судна через весь Атлантический океан, от порта Ушуайя до Гданьска (рис.1), не занимая дорогое забортное время. Так возник 47-й рейс, проходивший с 26 марта по 7 мая.

В поверхностных водах океана происходит взаимодействие четырех геосфер: атмосферы, гидросферы, биосферы и криосферы, которые можно охарактеризовать, отбирая пробы на ходу судна. Здесь эоловый (переносимый ветром) материал смешивается с водной взвесью и включается в осадочные процессы в океане, т.е. в вертикальные и горизонтальные потоки. Геохимическая барьерная зона атмосфера—вода представляет собой важную область океанической седиментационной системы. Биогеохимические исследования океана показали, что процессы седиментации определяются работой биоса (взвесеобразующими компонентами), прежде всего биофильтраторами [1]. Идеи о тесном взаимодействии в природе

© Немировская И.А., Новигатский А.Н., Реджепова З.Ю., 2016

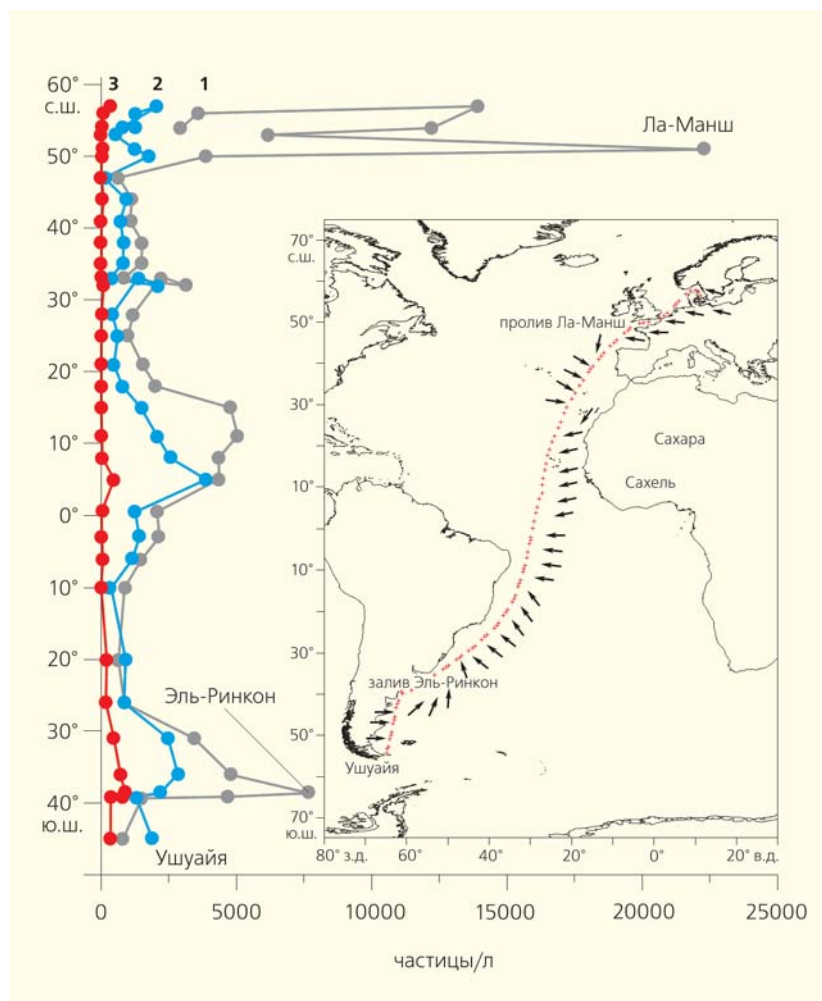


Рис.1. Маршрут 47-го рейса НИС «Академик Иоффе» (справа) и осредненные данные содержания аэрозолей в приводном слое атмосферы по ходу маршрута: 1 — фракция 0.3–1 мкм (количество частиц уменьшено в 10 раз); 2 — 1–5 мкм; 3 — более 5 мкм (количество частиц увеличено в 10 раз). Стрелки показывают основное направление ветра.

живого и неживого вещества были разработаны еще в начале XX в. В.И.Вернадским, который считал, что «живые организмы... являются огромной геологической силой» [2].

Маршрут судна проходил через различные климатические зоны, а также охватывал шельфовые районы Атлантики (включая Северное и Балтийское моря). Задача нашей небольшой экспедиции состояла в изучении аэрозолей и взвеси поверхностных вод на меридиональном разрезе через Атлантический океан, чтобы определить влияние золотого материала на распределение осадочно-го вещества и основных компонентов органических соединений (в том числе загрязняющих) в приповерхностном слое атмосферы и в поверхностных водах.

Атмосферный транспорт вещества и последующее его осаждение — основные пути поступления природных и антропогенных соединений с суши в открытый океан (особенно в аридных областях, характеризующихся высокими температурами воздуха и малым количеством осадков). Важная составляющая аэрозолей — органические соединения. Они могут поглощать (или рассеивать) свет, способствуя потеплению (или похолоданию), влиять на атмосферный радиационный бюджет. Это определяется молекулярным составом органических соединений, поступающих из разных источников.

Особый интерес представляют фронты и фронтальные зоны океана. В них резко возрастают пространственные градиенты основных термодинамических характеристик (температуры, солености, плотности и др.) по сравнению с их фоновыми значениями [3]. Кроме того, здесь происходит концентрирование и загрязняющих веществ [4, 5].

Одновременные исследования аэрозолей и поверхностных вод в Атлантическом океане последний раз проводились 10 лет назад, в экспедиции 2005 г. [6]. Нам же удалось собрать аэрозоли в южных районах Атлантики: впервые были захвачены золотые потоки из Патагонии и выносы р.Рио-Колорадо. Кроме того, судно прошло восточнее ус-

тья р.Ла-Плата и западнее о-вов Зеленого Мыса и Канарских (рис.1). Таким образом, мы получили новую информацию о концентрациях аэрозолей, их вещественном, гранулометрическом и химическом составе в слабоизученных районах Мирового океана.

Золотый материал. Аэрозоли мы изучали с помощью счетчика частиц AeroTrak (США) и сетевым методом (рис.2) с экспозицией около суток, по ходу судна при лобовом и боковом ветре (с отклонением от курса не более чем на $\pm 60^\circ$). Затем капроновые сети промывали бидистиллиро-

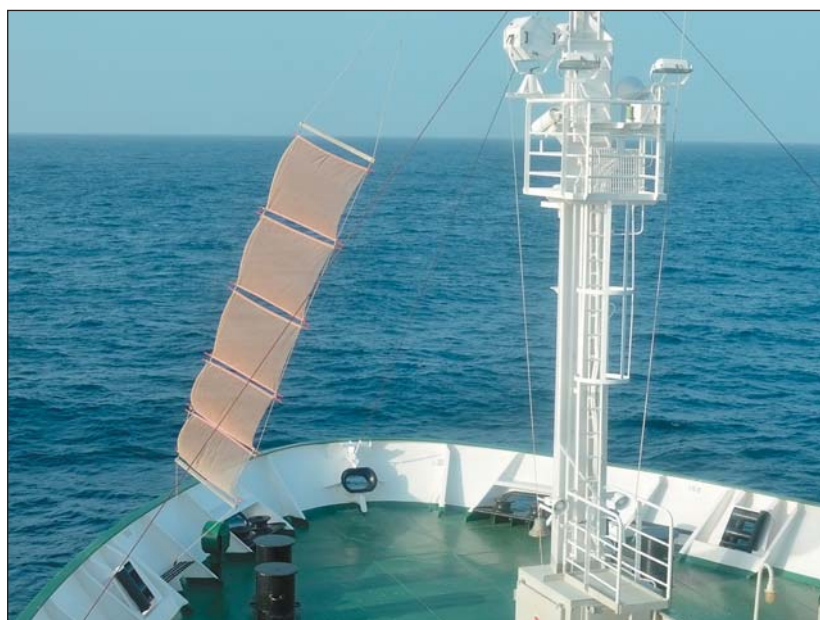


Рис.2. Постановка сетей для отбора проб аэрозолей (вверху) и сети после захвата потоков из африканских пустынь.

Фото З.Ю.Реджеповой

ванной водой, аэрозоли отфильтровывали на предварительно отмытые поликарбонатные ядерные фильтры (0.45 мкм) под вакуумом при 0.4 атм. При отборе проб сетями предполагается изучение только нерастворимой фракции, но при этом накапливается большое количество материала для других аналитических исследований.

По всему маршруту судна отбирали также пробы поверхностной морской воды. Для анализа аэрозолей, взвеси и органических соединений применялась единая схема их выделения и использовались традиционные методы геохимических исследований в океане [1, 4, 7].

На количество частиц в атмосфере немаловажное влияние оказывают скорость и направление ветра. При его усилении преобладают частицы наименьшего размера. Так, при юго-восточном ветре *средние концентрации* приводного аэрозоля последовательно увеличивались с движением судна на север из порта Ушуайя, с максимумом на рейде порта Бая-Бланка в устье р. Рио-Колорадо (залив Эль-Ринкон) (рис. 3). Количество частиц размером 0.3–1 мкм колебалось от 2200 до 44 987 (в среднем 38 313) частиц/л. Столь высокая изменчивость количества аэрозолей обусловлена как изменением скорости ветра (от 4.7 до 15.5 м/с), так и его направлением (от 164.5° до 263°). С выходом из территориальных вод Аргентины и удалением от берега содержание аэрозолей в атмосфере уменьшилось и достигло практически постоянных значений. Минимум частиц был зафиксирован на

14° ю.ш. из-за смены ветрового режима при скорости ветра 5 м/с (рис. 3).

В Северном полушарии увеличение количества частиц происходило в области 4–15° с.ш., находящейся под влиянием переноса аэрозолей из аридных областей Западной Африки (пустынь Сахара и Сахель). В атмосфере Центральной Атлантики наблюдался небольшой рост концентраций, приуроченный к 32° с.ш., который объяснялся, скорее всего, региональным увеличением потоков аэрозолей с Канарских о-вов. При смене направления ветра в этой области количество аэрозолей резко уменьшалось: с 17 761 до 4622 частиц/л, т.е. почти в четыре раза.

Перед проливом Ла-Манш прошел сильный дождь, и в атмосфере содержание аэрозолей снизилось до 3466 частиц/л. Затем их количество начало расти, наиболее резко (в пять раз) оно увеличилось в узком участке пролива Па-де-Кале, где достигло 111 239 частиц/л — максимальной концентрации, установленной для частиц аэрозолей >0.3 мкм на всем разрезе. В западной части Северного моря, несмотря на прошедший дождь, количество частиц в атмосфере также оставалось довольно высоким (в среднем 31 395 частиц/л). В южной части Балтийского моря их содержание уменьшилось в среднем до 15 413 частиц/л. Сравнительно низкие концентрации (28 518 частиц/л) отмечались в прибрежной части Гданьской бухты. Как правило, в гумидных (влажных) областях количество аэрозолей в атмосфере снижается [1].

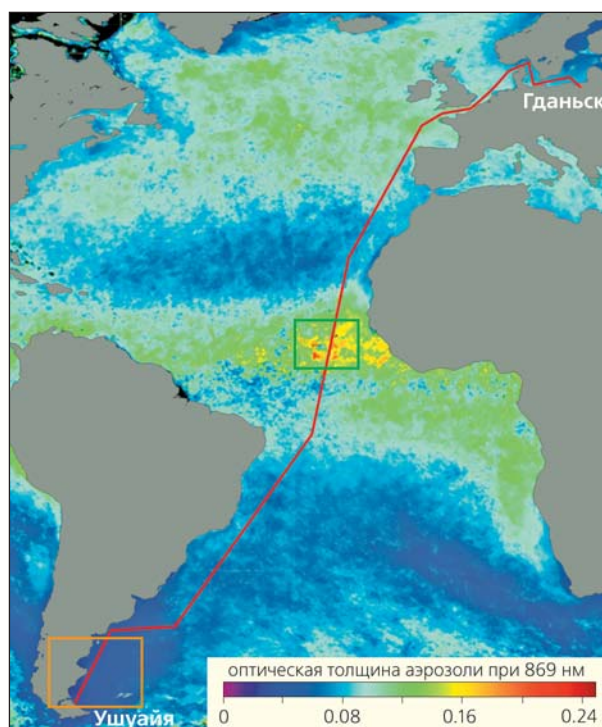
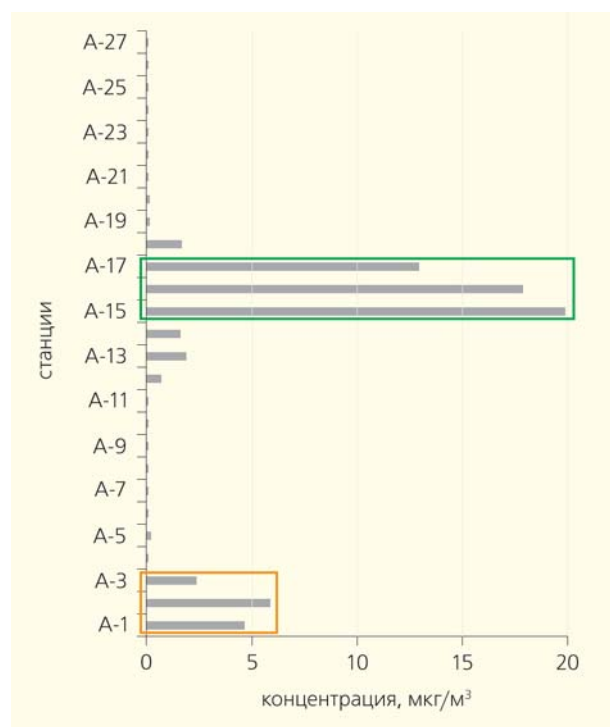


Рис. 3. Концентрации нерастворимой части аэрозолей, собранных сетевым методом в 2015 г. (слева), и средненные данные аэрозольной оптической толщины атмосферы, полученные со спутника MODIS-Aqua за апрель 2002–2015 гг.

Гранулометрический состав аэрозолей изменялся скачкообразно, но во всех пробах доминировала фракция 0,3–1 мкм. В Южном полушарии она составляла 80%. На долю частиц 1–5 мкм приходилось 12,5%, а частицы >5 мкм занимали всего 2,5%. В пробах с высоким количеством аэрозолей, сформированных под влиянием эолового потока из африканских аридных областей, сумма частиц 0,3–1 мкм достигала 92,4%, а в заливе Эль-Ринкон — 96%.

Малый размер частиц в атмосфере обусловлен и тем, что они образуются при конденсации паров или в результате химических реакций. Скорость диффузии таких мельчайших частиц достаточно велика, что создает предпосылку для их коагуляции и конденсации. В отдельных районах, особенно в северном полушарии, частицы, размеры которых превышают 5 мкм, отсутствовали (в частности, в проливе Ла-Манш).

В сетевых пробах повышенные концентрации (до 5,832 мкг/м³) эолового вещества наблюдались в южной части разреза, а максимальные (до 19,890 мкг/м³) — в области влияния потоков из африканских пустынь. Наиболее низкое (0,012 и 0,015 мкг/м³) содержание аэрозолей (синхронное с регистрацией счетчиком частиц) установлено в Южном полушарии при смене направления ветра и после дождя при подходе к Ла-Маншу.

Нерастворимая фракция аэрозолей представлена как минеральным, так и биогенным материалом, который выдувается ветрами с суши, с поверхности почв, содержащих большое количество растительных остатков [8].

Нерастворимая фракция пробы (А-2), отобранной при подходе к заливу Эль-Ринкон, состояла в основном из кремнезема (Si = 12,6%, O₂ = 54%) и биогенных волокон (рис.4). Кроме того, в пробе была обнаружена сфера сгорания, свидетельствующая о загрязнении аэрозолей. В районе экватора, так же как вблизи Европейского континента, в аэрозолях доминировали минеральные частицы, в меньшем количестве встречались волокна и остатки диатомовых водорослей. При подходе к Ла-Маншу неорганическая часть в аэрозолях состояла из пепловых частиц, обогащенными микроэлементами. Доля кремния здесь не превышала 4,4% (рис.4).

Минеральный состав эолового материала в зависимости от района отбора проб сильно различался. В целом в аэрозолях преобладали магматические об-

ломочные породы (39–72%). Количество глинистых минералов колебалось от 18 до 56%. На долю цеолитов и карбонатов приходилось в среднем 1,8 и 1,7% соответственно. Эоловый материал, поступающий из западной части Патагонии (пробы А-1, А-2, А-3), характеризовался присутствием плагиоклазов (до 50 %) и цеолитов (до 10–15%). Кроме того, в образцах в небольших количествах содержались кварц, хлорит, каолинит, монтмориллонит, иллит и др. Пробы, отобранные в центральной части разреза (А-15, А-16, А-17), питание которой связано с поступлением вещества из африканских пустынь, характеризовались высоким содержанием каолинита (до 23%) и появлением кальцита (до 5%). Анализ синоптической ситуации и расчет обратных траекторий подтвердил, что воздушные массы поступали сюда из северных районов Африки. Аэрозоли, отобранные у берегов Европы (проба А-26), содержали широкий спектр литогенных обломочных минералов (кварца, полевых шпатов, пироксенов, мусковита) — до 62%, а также глинистые минералы (хлорит, каолинит, иллит) — до 36% (рис.5).

Распределение счетных концентраций аэрозолей в целом совпадало с их распределением, полученным сетевым методом, и изменялось в большом диапазоне. Связано это с тем, что атмосфера — самая подвижная и переменчивая из геосфер Земли. В атмосфере быстро меняются потоки вещества, обусловлено это движением воздушных масс. Согласно нашим данным, полу-

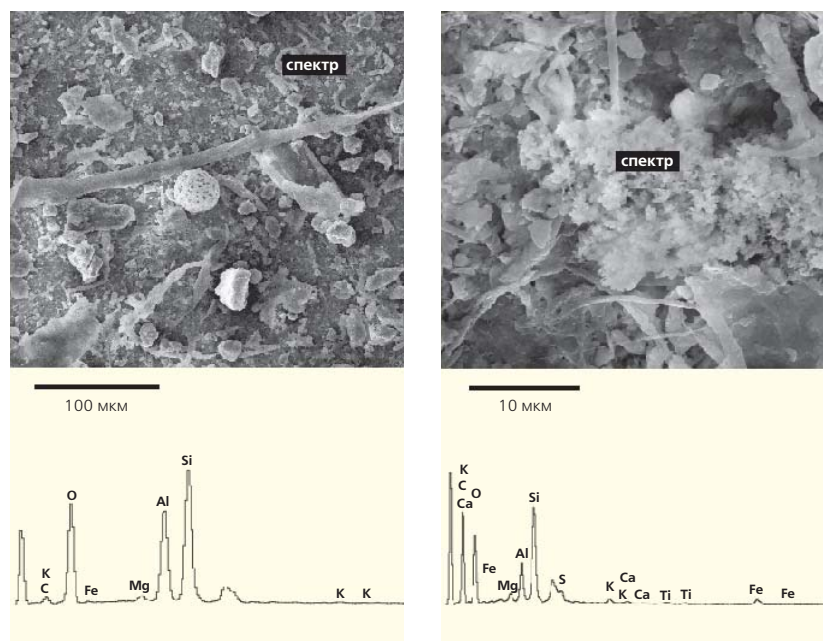


Рис.4. Состав аэрозолей: слева — проба А-2, состоящая из спор и биогенного детрита (в центре фото — сфера сгорания); справа — проба А-27, сложенная волокнами, обломками диатомовых (в центре фото — частица пепла). Элементный анализ минеральных частиц выполнен с помощью приставки-микроанализатора к сканирующему электронному микроскопу.



Рис.5. Сетевые пробы аэрозолей, собранные вблизи Южной Америки (слева) и в Северной Атлантике.

Фото З.Ю.Реджеповой

ченным в южной части Трансатлантического разреза, содержание аэрозолей там сравнительно высокое. А по данным спутника MODIS-Aqua за апрель 2002–2014 гг. в этом районе аэрозольная оптическая толщина атмосферы не превышала 0.04 м^{-1} , что указывает на низкую в ней концентрацию аэрозолей. Несовпадение результатов, скорее всего, связано с несовершенством алго-

ритма расчета космических снимков. В пустыне Патагонии энергично протекает физическое выветривание и дефляция. Повышенные концентрации аэрозолей, по-видимому, связаны с тем, что там находится центр формирования континентального воздуха — Южно-Атлантического антициклона. Здесь большое распространение имеют два типа циркуляции эоловых потоков: экваториальный, с мощной конвекцией воздушных масс, где при конвергенции происходит схождение пассатов, и субэкваториальный, с сезонными сменами экваториальных и тропических воздушных масс (пассатно-муссонный).

Органические соединения в аэрозолях.

Существуют три источника органических соединений аэрозолей: высшие растения суши; морская поверхность и (в меньшей степени) антропогенные соединения. Все они подвержены сезонной изменчивости и зависят от природы воздушных масс и направления ветра.

В наших исследованиях количество аэрозолей хорошо коррелировало с концентрацией в них органического углерода ($C_{\text{орг}}$) и углеводов (УВ): $r(\text{аэрозоль}-C_{\text{орг}}) = 0.92$; $r(\text{аэрозоль}-\text{УВ}) = 0.75$; $r(\text{УВ}-C_{\text{орг}}) = 0.88$. Повышенное содержание органических соединений в аэрозолях наблюдалось в районе, находящемся под влиянием эоловых потоков из Южной Америки и из африканских пустынь (рис.6).

Синхронное изменение концентраций аэрозолей, $C_{\text{орг}}$ и УВ указывают на идентичные источники их формирования. Это подтверждает и состав углеводов, среди которых доминировали высокомолекулярные нечетные алканы — индикаторы терригенного органического вещества.

Содержание хлорофилла «а», характеризующего биогенную часть аэрозолей, в наших пробах очень низкое. Максимальное его количество ($1.06 \cdot 10^{-6} \text{ мкг/м}^3$) было установлено в пробе А-1, однако средняя концентрация составила всего $0.159 \cdot 10^{-6} \text{ мкг/м}^3$. В области аридных потоков содержание хлорофилла «а» (так же, как и других

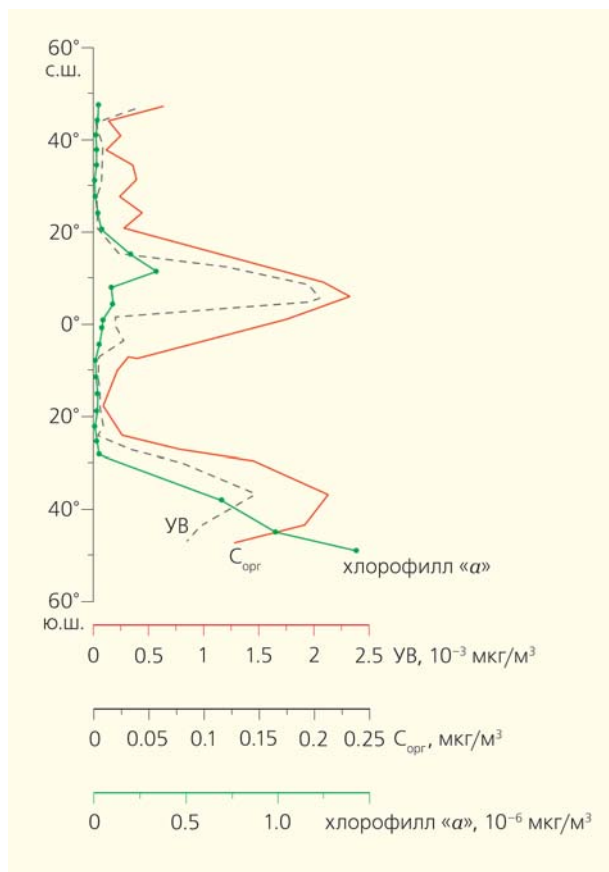


Рис.6. Распределение концентраций органических соединений аэрозоля из сетевых проб.

органических соединений) несколько возросло (до $0.338 \cdot 10^{-6}$ мкг/м³). Наблюдаемое высокое содержание (в среднем 85%) феофитина «а» указывало на значительное преобразование хлорофилла «а». В пробах льда, где разложение хлорофилла замедленно, максимальная доля феофитина «а» не превышала 47% [7].

В широком спектре органических загрязняющих веществ полиароматические циклические углеводороды (ПАУ) занимают особое место из-за их высокой токсичности и канцерогенности, а также большой устойчивости в природе. Но накопление ПАУ в различных геологических объектах — почвах, акваториях, осадочных породах — может быть связано как с антропогенными, так и с природными процессами. В морской среде существуют три главных источника ПАУ — пирогенный (основной), биогенный и петрогенный [8]. Диапазон концентраций ПАУ — 0.0004–0.33 мкг/м³. Повышенные их количества мы зафиксировали в районах, наиболее приближенных к берегу (пробы А-1, А-26 и А-27). В аридной области седиментации содержание ПАУ оказалось сравнительно низким (0.006 мкг/м³), что, видимо, связано с удаленностью от источника эмиссии. Влияние петрогенных (нефтяных) соединений на состав ПАУ (повышенная доля нафталина) характерно для проб, отобранных в районе Южной Америки (А-1), а пирогенных (доминирование флуорантена и пирена) — при приближении к Европейскому континенту (рис.7). Несмотря на прошедший дождь, в пробе А-27 содержание полиаренов оказалось высоким (0.195 мкг/м³). Повышенная концентрация флуорантена по сравнению с пиреном (преимущественно образующимся в процессах горения) может указывать на трансформацию состава ПАУ при эоловом переносе, так как сетча-

тые пробы аэрозолей мы отбирали в значительном удалении от берега.

Накопление полиароматических циклических углеводородов в аэрозолях связано не только с их присутствием в источниках эмиссии, но и с перераспределением между газовой и твердой фазами и разложением при движении воздушных масс. В аэрозолях над океанскими водами содержится минимум ПАУ ($<10-11 \cdot 10^{-6}$ мкг/м³), в то время как другие компоненты идентифицируются в значимых количествах. При сумме 2 мкг/м³ алифатические УВ составили 3%, жирные спирты и жирные эфиры — 22%, соли жирных кислот — 48% [9]. В эстуарных зонах концентрации ПАУ были на порядок выше, чем в других районах [8].

Взвесь поверхностных вод. В Южном полушарии, на разрезе через пролив Дрейка, западную часть моря Скоша и участок Юго-Западной Атлантики, судно пересекло основные антарктические течения, южный полярный и субантарктический фронты. Там сформировались условия для активного развития фитопланктона, что вызвало рост хлорофилла «а» и $C_{орг}$ (рис.8). Однако резкое увеличение содержания взвеси (до 9.7 мг/л) и хлорофилла «а» (до 2.481 мкг/л) произошло в заливе Эль-Ринкон. При подходе к нему и выходе из него количество взвеси уменьшалось в 13.5–18 раз, а хлорофилла «а» в 4–8 раз, что обусловлено влиянием выносов р.Рио-Колорадо. В меньшей степени росли концентрации углеводородов.

Во время движения судна на север содержание взвеси оставалось практически неизменным и в среднем составляло 0.10 мг/л, что соответствовало фоновому уровню в поверхностных водах [1]. Судно прошло в 100 милях от устья р.Ла-Плата, и концентрации взвеси и выделенных из нее соединений в области влияния этой реки увеличились

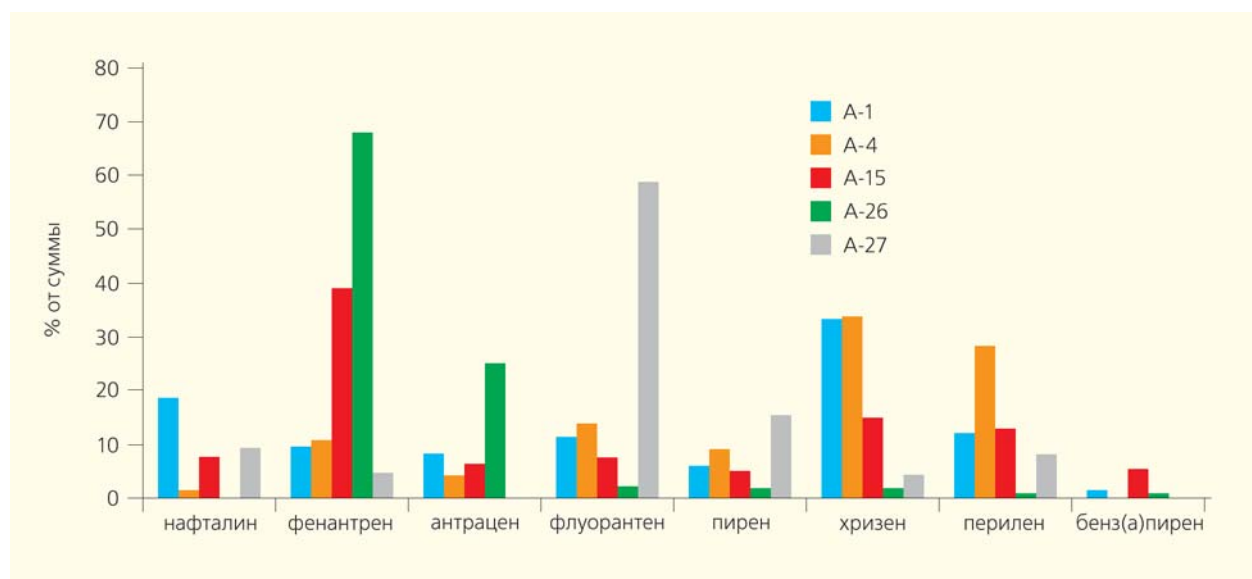


Рис.7. Характерный состав полиароматических циклических углеводородов в пробах аэрозолей.

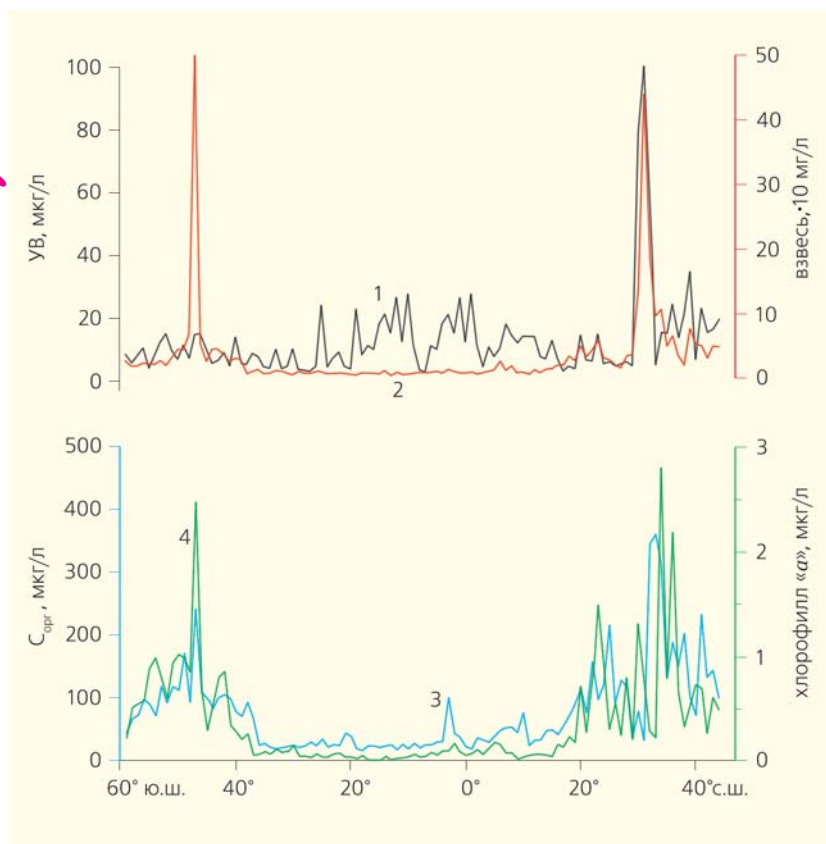


Рис.8. Распределение: углеводов (1), взвеси (2), $C_{орг}$ (3) и хлорофилла «а» (4) во взвеси поверхностных вод на трансатлантическом разрезе.

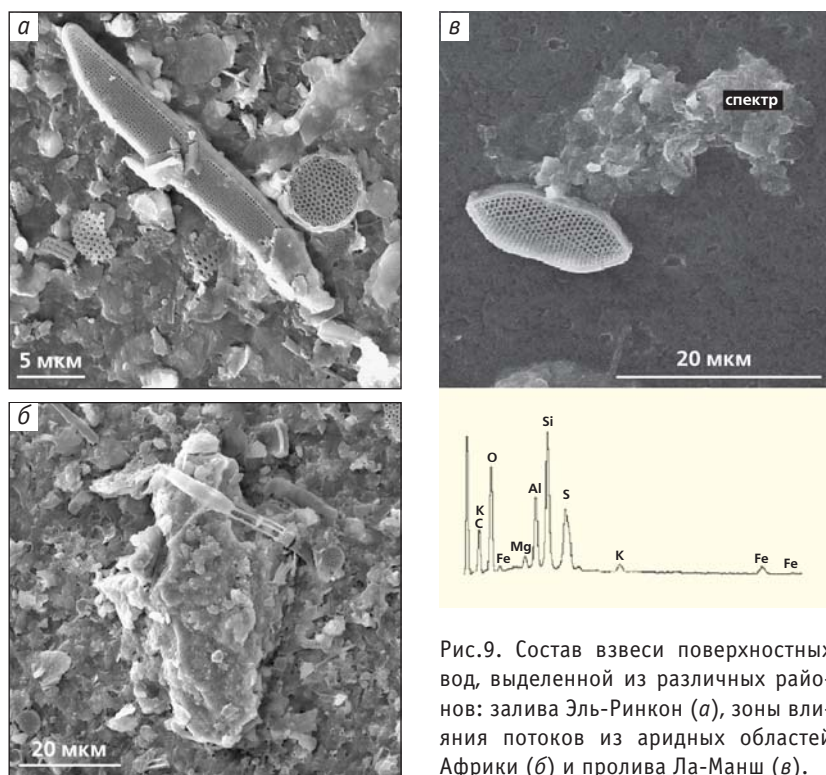


Рис.9. Состав взвеси поверхностных вод, выделенной из различных районов: залива Эль-Ринкон (а), зоны влияния потоков из аридных областей Африки (б) и пролива Ла-Манш (в).

лишь незначительно. В олиготрофных водах Бразильского течения и Южного тропического фронта содержание взвеси и органических соединений были низкими и оказались меньше полученных ранее [7]. Незначительное повышение концентрации взвеси происходило в поверхностных водах в области влияния аридных потоков из африканских пустынь (до 0.19 мг/л), в большей степени росли содержания $C_{орг}$ и хлорофилла «а» (до 100 и 0.18 мкг/л соответственно) (рис.8). Здесь атмосферные аэрозоли становятся единственным терригенным материалом, поступающим в поверхностные воды [1].

В районе Канарского апвеллинга наблюдался рост концентрации взвеси до 0.26 мг/л, а хлорофилла «а» — до 0.189 мкг/л. Экспедиция 2014 г. в мае пересекла эту фронтальную зону на 3° западнее, и содержание взвеси тогда из-за более сильного влияния апвеллинга составило 1 мг/л [7].

На шельфе Западной Европы в поверхностных водах произошло хаотичное увеличение содержания всех изучаемых соединений, особенно при приближении к проливу Ла-Манш (рис.8). В этом районе наблюдался максимальный рост содержания углеводов (до 100 мкг/л), что в два раза превысило предельно допустимую концентрацию для нефтяных органических соединений. При учете всех концентраций углеводов (количество проб $n = 106$) коэффициент корреляции $r_{вз-УВ}$ там составил всего 0.30. Но в центральной части разреза, в открытых водах Атлантики, где формирование взвеси и углеводов обусловлено в основном продуктивностью вод, $r_{вз-УВ}$ уже равнялся 0.68 (при $n = 98$). В Северном и Балтийском морях средняя концентрация взвеси составила 0.54 мг/л, а концентрации $C_{орг}$ и хлорофилла «а» достигли максимальных величин (161 и 0.38 мкг/л соответственно).

Взвесь поверхностных вод, в отличие от аэрозолей, состояла преимущественно из биогенных частиц, представленных радиоляриями, тинтинидами и спорами (рис.9). Минеральные частицы встречались редко, в основном это были обломки кварца и силикатов. В проливе Ла-Манш доля Si составила 7.3%. Ранее было установлено, что от порта Монтевидео до порта Галифакс в южной части Трансатлантического меридионального разреза содержание аморфного кремнезема менялось от значений ниже предела обнаружения до 252 мкг/л в устье р.Ла-Плата [10]. В Северном же полушарии (так же, как и в наших исследованиях открытых вод Атлантики) концентрации взвеси не превышали нескольких десятков микрограммов на литр, так как основным продуцентом кремнезема (главной составляющей взвеси в этом районе) служит кремнесодержащий планктон (в первую очередь диатомовые водоросли), который здесь встречается в незначительных количествах.

* * *

Полученные в нашей экспедиции данные по концентрациям аэрозолей и по их потокам (до 19.9 мкг/м³ и до 34.4 мг/м²·сут) превысили значения, полученные ранее, когда потоки в аридной области достигали всего 20 мг/м²·сут [6]. В апреле 2005 г. максимальное содержание частиц было установлено в районе 5–9°с.ш., а область повышенных концентраций, согласно нашим исследованиям, расширилась до 3–11°с.ш. В открытых районах Атлантики (с удалением от континентов) содержание аэрозолей убывало более чем в 10 раз, при этом изменялся их состав.

Многие годы считалось, что эоловое вещество играет главную роль только в аридных зонах суши [1]. Наши работы показали, что контрастный по своему минеральному составу эоловый материал отражает разнообразие питающих его провинций.

Синхронное изменение содержаний взвеси и углеводов в поверхностных водах происходит только в тех районах, где источник органических соединений близок. Распределение самой взвеси в основном зависит от гидробиологических факторов и речного стока, а углеводов — в значительной степени от нефтяных загрязнений. Так, в устье р.Рио-Колорадо содержание УВ составило всего 1.5 мкг на миллиграмм взвеси, а в проливе Ла-Манш (в котором основной источник УВ — нефтяное загрязнение) — 22.9 мкг/мг. Пролив Ла-Манш можно отнести к району, в котором повышены содержания органических соединений, что объясняется поступлением нефтяных углеводов. Ранее сюда входили и прибрежные районы Европы и Северное и Балтийское моря [4]. Однако в последние годы здесь фиксируются довольно низкие концентрации органических соединений. Кроме того, надо отметить, что и при высоких концентрациях углеводов в их составе во взвеси поверхностных вод доминировали природные биогенные соединения [4]. Связано это с быстрым разложением нефтяных алифатических УВ. Даже при низких температурах микропланктон активно усваивает и перерабатывает как автохтонное (образованное на месте), так и аллохтонное (принесенное) органическое вещество [11].■

Участие в рейсе и обработка материалов осуществлены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-50-00095). Интерпретация данных проведена в рамках Государственного задания Института океанологии имени П.П.Ширшова РАН на 2015–2017 гг. по теме 0149-2014-0038.

Литература

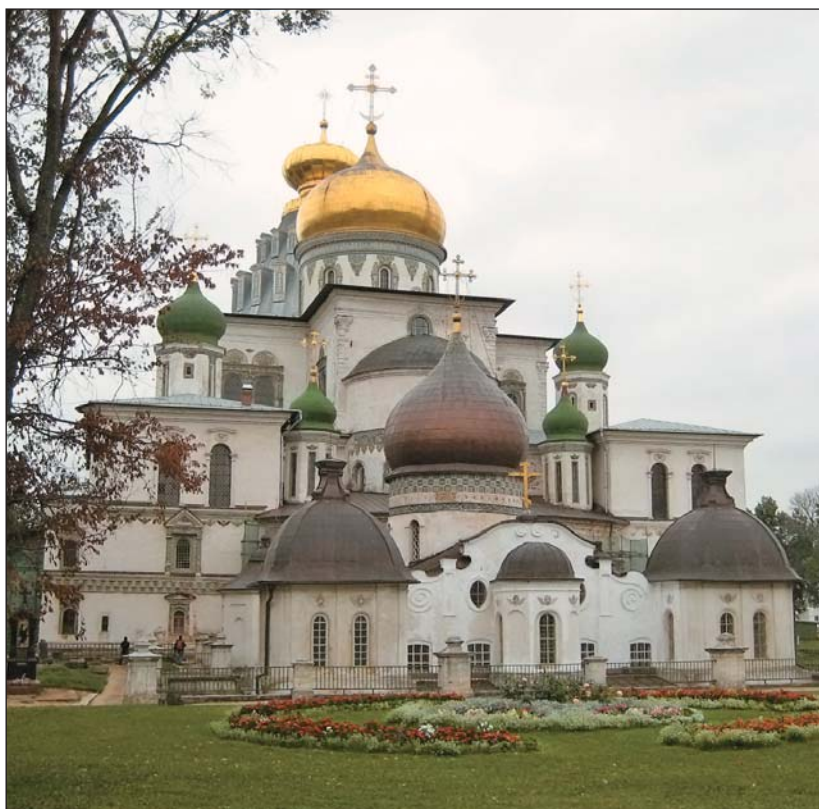
1. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Т.2. Мировой океан / Ред. Л.И.Лобковский. М., 2014. С.331–571.
2. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М., 2001.
3. Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанских фронтов. Л., 1983.
4. Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М., 2013.
5. Lobmann R., Belkin I.M. Organic pollutants and ocean fronts across the Atlantic Ocean: a review // Progress in Oceanography. 2014. №128. P.172–184.
6. Клювиткин А.А. Атмосферные аэрозоли и осадконакопление в аридных зонах Атлантического океана // Докл. АН. 2008. Т.421. №1. С.111–115.
7. Немировская И.А., Кравчишина М.Д. Биогеохимические особенности распределения органических соединений и взвеси в снежно-ледяном покрове Восточной Антарктики // Геохимия. 2015. №5. С.439–449.
8. Saliot A. Sources markers in aerosols, oceanic particles and sediments // Eur. Phys. J. Conferences. 2009. №1. P.189–197.
9. Gagorian R.B., Zafiriou O.C., Peltzer T., Alford J.B. Lipids in aerosols from the Tropical North Pacific: temporal variability // J. Geophysic. Res. 1982. V.87. №13. P.133–144.
10. Политова Н.В., Артемьев В.А., Зернова В.В. Распределение и состав взвеси на меридиональном разрезе в Западной Атлантике // Океанология. 2015. Т.55. №6. С.984–993.
11. Агатова А.И., Латина Н.М., Торгунова Н.И. Органическое вещество Белого моря // Система Белого моря Т.2. / Ред. А.П.Лисицын, И.А.Немировская. М., 2012. С.492–548.

Новый Иерусалим в контексте культуры и истории Московской Руси

Л.А.Беляев,
доктор исторических наук,
О.Н.Глазунова, М.А.Капитонова
Институт археологии РАН
Москва

Воскресенский Ново-Иерусалимский монастырь (основан в 1656 г.) по праву считают жемчужиной в сокровищнице русской культуры. Его построили на р.Истре в 50 км к западу от Москвы стараниями царя Алексея Михайловича Романова (1629–1676) и Патриарха Московского и всея Руси Никона (1605–1681) в небывало короткие для своего времени сроки — за четыре десятилетия. По замыслу Никона монастырь создавался как «икона Святой Земли» с ее Гефсиманским садом, Голгофой и Иорданом, с главным собором Воскресения Христова, подобным храму Гроба Господня в Иерусалиме. На освящении собора в октябре 1657 г. присутствовал Алексей Михайлович. По одной из версий именно он впервые назвал монастырь Новым Иерусалимом.

Патриарх Никон трудился над постройкой любимого детища восемь лет, пока в 1666 г. не был отстранен от патриаршего служения. С тех пор в истории Воскресенского Ново-Иерусалимского монастыря было много славных, но и трагических страниц: обрушения, пожары, переделки интерьера в соответствии с архитектурными вкусами эпохи. Обитель особенно пострадала в годы Великой Отечественной войны. В декабре 1941 г. отступавшие немцы взорвали Воскресенский собор, колокольню и другие постройки. В огне пожара были уничтожены храмовые иконы. Разрушение Ново-Иерусалимского монастыря фигурировало в обвинительном заключе-



Воскресения Христова Ново-Иерусалимский монастырь. Вид собора с юго-востока.

нии Нюрнбергского процесса как одно из вопиющих преступлений против культуры.

Восстановительные работы растянулись на десятилетия, но особенно активизировались в последние годы, что связано с подписанием в 2008 г. указа о воссоздании исторического облика Ново-Иерусалимского монастыря. С 2009 г. на его территории идут археологические работы, в ходе которых сложилась постоянно действующая экспедиция Института археологии РАН, которая нацелена на исчерпывающее изучение объектов архитектуры, производственных комплексов и других скры-

тых в земле материалов и образцов, рассматриваемых как исторические источники [1].

Сейчас исследования вступили в заключительную стадию, что позволяет говорить о выдающихся результатах, выдвинувших Новый Иерусалим в первый ряд археологических проектов России. В ходе работ раскрыты десятки новых, ранее неизвестных объектов, собраны сотни находок (некоторые древнее, чем сам монастырь [2]) и учтены тысячи изразцов, произведенных в 1650–1690-х годах. На основе этих источников удалось понять размах и своеобразие замысла Никона. Обычно проект патриарха интерпретируют как попытку построить новый центр духовного тяготения и круто изменить Россию. В Новом Иерусалиме потенциал России соединился с достижениями западноевропейской технической мысли, искусства и даже традиций почитания Святой Земли. Иными словами, начинание Никона предстает как яркая попытка вестернизации в Московии. Она носила церковный характер, но осуществлялась теми же методами, какие потом в светской жизни применил Петр I [3].

2016 г. снова принес ряд неожиданных находок. В ходе работ по прокладке сетей и воссозданию Южного Братского корпуса были обнаружены склеп рубежа XVII–XVIII вв., изразец с изображением слона и прикладная печать конца XVII в. Все артефакты, как и прежние находки, рассказывают о культуре переходного периода от Средних веков к Новому времени, т.е. о связях Московии с Европой.

В Новом Иерусалиме погребения, довольно многочисленные, но собранные в компактные зоны, без технической необходимости не вскрывали, их старались обходить. Тем не менее при прокладке коммуникаций время от времени повреждались участки кладбищ. На этот раз в ходе земельных работ в углу между юго-восточной стеной притвора и южным краем переходов к Подземной церкви открылся склеп с сохранившимися остатками погребения. Но не само погребение привлекло наше внимание, а рельефные терракотовые (не поливные) изразцы с румпой (коробчатым выступом, предназначенным для закрепления в кладке печи или стены), которыми был выложен склеп. Сохранились южная стенка, части восточной и западной стен склепа, а также ряд изразцов, аккуратно упавших со свода камеры. Пола у склепа, напротив, не было, он даже не предусматривался. Кладку осуществляли на глине, вероятно, без опалубки: судя по всему, изразцами обклады-



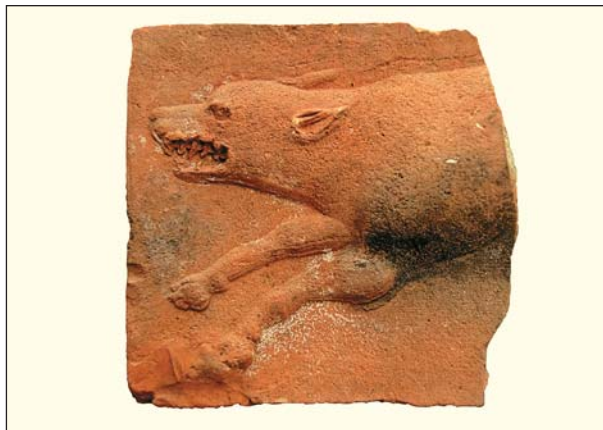
Склеп рубежа XVII–XVIII вв., облицованный изразцами.

вали, как кирпичами, стенки вырытой могильной ямы. Нам известны лишь два погребения с изразцами (красноглиняный подголовник из Троице-Сергиевой лавры и поливные плиты-черепицы из Сретенского монастыря), но выкладка из них самого склепа до сих пор не встречалась.

В обнаруженном склепе изразцы применяли как обычный кирпич или, имея в виду их пустотелость, как сосуды-голосники, обращенные отверстиями наружу, а лицевыми пластинами внутрь.



Горн для обжига изразцов с остатками изделий. 1690 г.



Изразцы с изображением антилопы, волка, слона, верблюда и единорога (конец XVII в. — XVIII в.).

Несомненно, этот прием использовался сознательно, с целью украсить внутреннее пространство склепа, сделать его эстетически привлекательным и, возможно, представить на стенах образ Райского сада. В пользу этой версии говорит факт отбора изразцов с растительным орнаментом трех типов: сплетения ветвей и листьев (так называемый боскетный тип, наиболее многочисленный), циркулярная композиция с центральным медальоном, увенчанным короной (с цветком тюльпана?), ковровые картуши простого, даже грубоватого рисунка с ярко выраженным рельефом. Орнаментика, несомненно, европейского происхождения. Хронологически склеп должен относиться к последнему этапу достройки монастыря при учениках патриарха Никона — к 1690–1700-м годам (в погребении обнаружен прямоконечный крест-тельник, который, судя по гравировке и надписям, можно датировать концом XVII — началом XVIII в.) или к первой четверти XVIII в.

Среди огромного комплекса изразцов, найденных в Новом Иерусалиме, обращала на себя внимание серия с изображениями животных, прорисованных чрезвычайно реалистично и в классической манере. Она явно возникла как керамическая версия одного из bestiaries — иллюстрированных «энциклопедий о животных» с аллегорическим описанием их внешнего вида, свойств и повадок, которые были весьма распространены в средневековой Европе. Подчеркнем, речь идет именно о bestiarii, поскольку среди многих живых существ — экзотических (антилопа, верблюды) и привычных нам (волк) — бодро «скачет» мифический единорог. В 2016 г. серия пополнилась прекрасным образцом с изображением слона или, учитывая пропорции, скорее слоненка, который был обнаружен в заполнении одного из крылец Южного Братского корпуса. Не входя в детали символического значения слона, отметим художественное качество, реализм и тщательность исполнения рельефа.

Там же, в Южном Братском корпусе монастырской территории, в культурном слое найдена печать — дисковидный металлический кружок медного сплава диаметром около 1 см с выступающим округло-граненым ушком для подвески. Одна из ее сторон гладкая, на другой глубокими ровными бороздами врезаны три ряда букв, образующих при оттискивании четко читающиеся слова: Печать старца Павла.

Личная печать с надписью — не частая находка в слоях московского периода, а печати монастырских старцев среди них вообще не встречались. Обращает внимание строгость ее оформления: только надпись, но не символическое изображение, довольно типичное для печатей позднего Средневековья.

Поскольку Новый Иерусалим хорошо обеспечивался письменными источниками, удалось идентифицировать личность владельца печати. Павел назван в Описи Воскресенского монастыря 1679 г. среди рядовых монахов и старцев. В духовной грамоте архимандрита монастыря Германа I (1682), одного из первых русских поэтов, человека особенно близкого к патриарху Никону, упомянуты его келейники («келейные чада») Иоанн, Петр, Павел и Андрей. Павлу завещаны «образ Иосифов, Псалтирь в полдесть да подрясок суконной синей, да Алементар полской киевския печати». В конце этой записи речь идет об элементаре, т.е. о букваре, в данном случае — польском, издания Киево-Печерской лавры. Вряд ли его завещали бы человеку, не владевшему языком (монах Павел как минимум учил польский). Спустя три года в Описи Воскресенского монастыря, в перечне служебных старцев, встречается указание на единственного Павла — хлебодара (должность не очень высокая, но в любом общежитии важная). Менее чем через десятилетие (1693) в приходно-расходных книгах монастыря «монах Павел» (необязательно тот самый) указан несущим послушание «у моря» на Понойском промысле (Терский



Прикладная печать конца XVII в. (прямое и обратное изображение).

берег Белого моря, р.Поной). Таким образом, возможно, печать принадлежала монаху, способному читать по-польски, или выходцу из Украины, Беларуси, менее вероятно — из Литвы или Польши. По лестнице монастырского служения он не поднялся до высших должностей (его карьеру могла затормозить смерть Германа), но занимал ответственные в практическом отношении посты. Поскольку в обязанности хлебодара входило получение, хранение, отпуск муки и всего необходимого для печения хлеба, он, видимо, должен был опечатывать лари, мешки и кладовые.

Новый сфрагистический образец — прикладная печать старца — не только находит место в обширном мире поствизантийской монастырской дипломатики (вспомним о замечательных печатях Афона), но и странным образом проливает свет на личность архимандрита Германа — выходца из семьи клириков и выдающегося гимнографа, вероятно, попавшего в Новый Иерусалим в юном возрасте (в XVII в. в монастыре не было писей о пострижениях). Можно предположить, что и четыре келейника отца Германа были людьми юными и его учениками. А факт нахождения среди них человека, читающего по-польски, подчеркивает творческие связи новоиерусалимского гимнографического кружка (они все еще составляют загадку) с польской традицией. ■

Литература

1. *Беляев Л.А.* Воскресенский Ново-Иерусалимский монастырь как памятник археологии начала Нового времени // *Российская археология*. 2013. №1. С.30–41.
2. *Беляев Л.А., Ершов И.Н., Зеленцова О.В., Кузьминых С.В.* Древнейшие находки на территории Ново-Иерусалимского монастыря: материалы работ 2009–2014 гг. // *Российская археология*. 2014. №1. С.85–98.
3. *Беляев Л.А., Глазунова О.Н.* Маркеры Запада: новые элементы европейской художественной и технологической традиции в археологических материалах Ново-Иерусалимского монастыря // *Традиции и инновации в истории и культуре* / Под ред. А.П.Деревянко, В.А.Тишкова. М., 2015. С.147–154.

А.Н.Рябинин — первый в России исследователь динозавров

Времена и люди

И.А.Ермацанс,

кандидат философских наук

Палеонтологический музей Амурского научного центра Дальневосточного отделения РАН

И.Ю.Болотский,

Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН

Благовещенск

В 2016 г. исполняется 100 лет со времени первой палеонтологической экспедиции в Приамурье, инициатором которой был А.Н.Рябинин. Он находился в ряду тех, кто сделал многое для института [Геолкома — ЦНИГРИ — ВСЕГЕИ*] и русской науки... О нем самом написано до обидного мало — всего лишь два кратких очерка, опубликованных в послевоенное время, спустя три года после его смерти, — написал в 1982 г. известный геолог Л.И.Боровиков, автор биографического очерка о Рябинине [1, с.79–80]. Прошло 34 года, его имя не забыто, и мы вспоминаем труды его и его коллег, которые приняли участие или способствовали исследованиям 1916–1917 гг.

Анатолий Николаевич Рябинин (1874–1942) — выдающийся геолог и палеонтолог, крупный специалист в области ископаемых позвоночных. Именно он начал систематически изучать ископаемые остатки динозавров в России. Сегодня это направление палеонтологии успешно реализуется отечественными исследователями [2–4 и др.]. Для того чтобы понять, насколько далеко мы ушли в его развитии, стоит вспомнить слова известного американского палеонтолога О.Ч.Марша, сказанные им в конце XIX в.: *динозавры России, подобно змеям Ирландии, известны только тем, что они отсутствуют* [5, с.134].

* Геологический комитет (Геолком) — первое государственное геологическое учреждение России — был создан в 1882 г. В 1929 г. Геолком преобразован в Главное геологическое управление при Президиуме Высшего совета народного хозяйства (ВСНХ) СССР, а на базе его научных отделов созданы геологоразведочные институты по отраслям горной промышленности, организован Геофизический институт, в 1930 г. создан Институт геологической карты. В 1931 г. произошло объединение отраслевых геологоразведочных институтов, выделившихся из Геолкома, в Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт — ЦНИГРИ, который в 1939 г. был переименован во Всесоюзный научно-исследовательский институт — ВСЕГЕИ (с 1992 г. — Всероссийский). В 1982 г. институту присвоено имя академика А.П.Карпинского.



А.Н.Рябинин. Начало 1920-х годов.

Фото из фондов Центрального научно-исследовательского геологоразведочного музея имени академика Ф.Н.Чернышева

Ископаемые остатки динозавров были встречены в России еще в конце XIX в. Так, горный инженер Г.Д.Романовский описал в 1882 г. отпечатки следов динозавров (в долине р.Ягноб, прорезающей Зеравшанский хребет, напротив пос. Рават, ныне — Айнинский р-н Согдийской обл. Таджикистана), уничтоженные впоследствии в ходе работ по расширению дороги. В.А.Киприянов, инженер путей сообщения, описал в 1883 г. материал из местонахождения Тускарь (располагалось на берегу р.Ту-

скарь, вблизи пос. Мешково Курской обл.) — фрагменты ребер и кость, принятую им за плечевую. Эти остатки, по его предположению, могли принадлежать плотоядным динозаврам, мегалозаврам. Тем не менее описанный новый вид *Poekilopleuron schmidti* он отнес к крокодилам. Позже палеонтолог А.К.Рождественский переопределил [6, с.91] данную кость как большую берцовую мегалозавра (*Megalosaurus*). Затем Л.А.Несов исключил саму возможность принадлежности ребер динозавру и выразил сомнение в правомерности отнесения берцовой кости к тероподам (но не исключил принадлежность к динозаврам), в целом же он считал целесообразным повторно изучить и ревизовать материалы Г.Д.Киприянова [7, с.91–92].

Уверенно опроверг утверждение Марша именно А.Н.Рябинин. В 1912 г. геолог и палеонтолог И.П.Толмачев* через горного инженера К.Ф.Егорова передал ископаемую кость из Забайкалья. Рябинин определил и описал ее как часть задней конечности плотоядного динозавра [5]. Она стала первой достоверной находкой наземной рептилии мела в континентальных отложениях нашей страны [6, с.93].

Впоследствии Анатолий Николаевич, подобно своему известному американскому коллеге Д.Лейди, который описал в 1858 г. гадрозавра (*Hadrosaurus foulkii*), обрабатывал ископаемый материал. Образцы поступали к нему от геологов, проводивших исследование в разных частях страны. В руки же Лейди попадали преимущественно случайные находки неравнодушных людей, так как он не имел средств на проведение собственных палеонтологических раскопок.

Изучение динозавров Приамурья (1915–1923)

В 1915 г. Рябинин изучал образец, который привез адъюнкту-геологу Геолкома А.Н.Криштофович, впоследствии известный палеоботаник. Эта кость, переданная дальневосточным археологом-любителем А.Я.Гуровым, была обнаружена на правом берегу р.Амур (местонахождение Белые Кручи, китайское название Лунгушань, ныне — уезд Цзяинь провинции Хэйлунцзян Китая). Находка чрезвычайно заинтересовала Анатолия Николаевича, так как ничего подобного в России и на сопредельной с ней территории Китая еще не встречалось. Он определил ее как большую берцовую кость динозавра. По его представлению Геолком поручил В.П.Ренгартену исследовать место обнаружения остатков динозавров на р.Амур. Зимой 1915–1916 гг. он осмотрел, составил разрез обнажения и собрал коллекцию ископаемой флоры из местонахождения на сопке Сагибовский Богучан.

* Котылов В.Е. И.П.Толмачев — первооткрыватель нефтяного нордвика на Таймыре // Сибирская старина. 1993. №3. С.7–10.

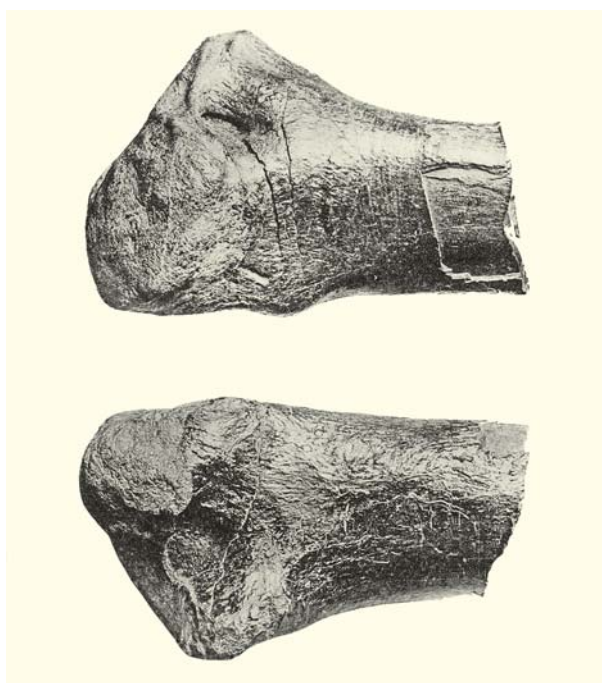


Рисунок из статьи Рябинина «Заметка о динозавре из Забайкалья» [5, табл.9].

По результатам той экспедиции Рябинин обратился в Геолком с предложением командировать штатного препаратора Н.П.Степанова для проведения палеонтологических раскопок летом 1916 г. на Амуре [8]. Всего 10 дней раскопочных работ дали значительный материал. Анатолий Николаевич, изучивший доставленные в Петроград ископаемые кости, сделал вывод о принадлежности их различным таксонам динозавров. Тогда же, в 1916 г., ему удалось *поставить вопрос о желательности монтировки этих остатков в Музее при Геологическом Комитете* [9, с.21].

13 января 1917 г. с докладом «Динозавры с р.Амур», проиллюстрированным демонстрацией костей, он выступил на годовом заседании Русского палеонтологического общества, где впервые высказал мысль, подтвержденную дальнейшими исследованиями: *...возраст свиты конгломератов, песков и песчаников с динозаврами — верхнемеловой, причем остатки динозавров весьма сходны с остатками динозавров (Trachodontidae) соответственного возраста из Сев. Америки* [10, с.129]. Его выступление вызвало живой интерес, в обсуждении приняли участие А.П.Карпинский, Н.Н.Яковлев, М.Д.Залесский, В.П.Ренгартен, А.Н.Криштофович. Было высказано единодушное мнение о продолжении раскопок с целью установления строения скелетов динозавров. Анатолий Николаевич обратился в присутствие Геолкома с предложением внести в проект работ 1917 г. раскопки на р.Амур, рассчитанные на два-три месяца. Его просьба была поддержана, и палеонтологические работы продолжались летом 1917 г.

Итогом раскопок 1916–1917 гг. стало извлечение нескольких десятков пудов костей динозавров [11, с.5]. Предварительные выводы по итогам работы с этими материалами Рябинин представил в 1918 г.: *Из группы Tberoroda найдено несколько новых образцов зубов; наибольшее же количество остатков пришлось на долю группы Praedentata, как-то: позвонков, частей верхней и нижней челюстей и костей переднего и заднего пояса конечностей. При этом с достаточной долей вероятности выяснилась принадлежность остатков ящерам из сем. Trachodontidae (гигантские утконосые динозавры североамериканского типа). Таким образом, возраст слоев конгломерата с остатками динозавров следует считать меловым и, быть может, — верхнемеловым. Среди находок второго года исследований были кости конечностей динозавров, систематическое положение которых остается еще невыясненным, и щиток карапакса и кости сухопутной черепахи одного и того же возраста, как и динозавры из семейства Trachodontidae. Несмотря на разрозненность костей скелета, затруднявшую исследование, он отметил громадное их скопление и высказал предположение о существовании поблизости слоев, отложившихся в более спокойных условиях и содержащих остатки динозавров, если не в целом виде, то по крайней мере в менее нарушенном состоянии частей скелета**. К сожалению, раскопки второго года экспедиции не решили проблему составления полного скелета динозавра, так как не хватало передней части челюстей и мозговой коробки черепа и части грудного пояса, а также мелких костей конечностей [12, с.385–386].

Продолжение раскопок для получения недостающих костей скелета динозавра оказалось невозможным из-за целого ряда событий 1917–1922 гг. (октябрьских событий 1917 г., Гражданской войны в 1918–1920 гг., образования Дальневосточной республики в 1920–1922 гг.). Соответственно, и реставрация скелета в музее Геолкома, о чем так мечтал Рябинин, пока была неосуществима. В 1918–1921 гг. геологические работы в основном сосредоточились в центральных районах России. Любые передвижения в более отдаленные места, зачастую связанные с пересечением линии фронтов, были сопряжены с рисками: для жизни, для собранных коллекций, не считая затрат по времени (в 1918 г. только из Петрограда на Алтай приходилось добираться три месяца). Дальневосточные территории оказались недоступны для исследований. Из запланированных 68 экспедиций в 1918 г. состоялась лишь четвертая часть. 1919 год был еще сложнее. Сотрудники Геолкома в эти годы участвовали в разведке угля, железных руд, и других полезных ископаемых, в составлении детальных геологических карт окрестностей Петрограда и Москвы,

не прекращалась и обработка собранных коллекций [13, с. 72–73].

Анатолий Николаевич в качестве геолога Геолкома (1913–1924) проводил *поисково-разведочные работы на нефть и серебросвинцовые руды Кавказа (1903, 1916, 1918), железные руды Владимирской губернии (1917), месторождения меди и свинца в Киргизии (1917)...* детальное изучение геологии Соликамского района Пермской губернии и дал прогноз на перспективность этого региона (1919, 1920)**. Кроме занятий научной работой он преподавал на Высших курсах Лесгафта (1914–1917), в Московской горной академии (1919–1922) и в Горном институте в Петрограде (1921–1942). С 1918 г. был вице-директором Геолкома, а в 1921–1923 гг. — его директором. Будучи членом Всероссийского палеонтологического общества (с 1916 г.), он выполнял обязанности редактора издания «Ежегодник Русского (затем Всесоюзного) палеонтологического общества». Даже в самые трудные годы, когда не хватало средств, он, по словам Н.Н.Яковлева, «изощрялся» выпускать журнал в лучшем оформлении, с таблицами рисунков, лучше исполненными, чем у многих других изданий, имеющих большие средства [14, с.5–6].

И конечно, все это время Анатолий Николаевич не оставлял занятий палеонтологией, продолжая изучение коллекции с р.Амур. За 1918–1923 гг. костный материал был отпрепарирован. Но задачи, которые он поставил перед собой: *...изучить остатки животного или животных, восстановить их скелет из разрозненных частей в возможно полном виде и выставить его в Музее Геологического комитета* [15, с.3], — так и оставались недосягаемыми.

Заграничная командировка (1924)

Обобщение результатов изучения обильной амурской коллекции требовало сравнения с остатками динозавров, описанными европейскими и североамериканскими учеными. Остро возникла необходимость знакомства с материалами, хранящимися в зарубежных музеях. Это стало одной из главных причин командировки Рябинина в 1924 г. в Германию, Бельгию, Англию. Средства на поездку выделили Научно-технический отдел ВСНХ и Геолком. Отправляясь в эту поездку, он прежде всего предполагал изучить позднемеловых динозавров, а кроме того, ознакомиться с успехами европейских ученых и методикой их преподавания палеонтологии [16].

Во время поездки (которая продлилась три месяца, с 4 октября 1924 г. по 8 января 1925 г. [17]) Анатолий Николаевич вел дневник, полный впе-

* Это предположение, высказанное в 1918 г., подтвердилось палеонтологическими раскопками китайских ученых в 1975 г.

** Малахова ИГ. Рябинин Анатолий Николаевич (<http://с-heritage.ru/ras/view/person/>).

чатлений об изменившемся мире стран, так хорошо знакомых ему по прежним посещениям в 1907 и 1910 гг. Относилось это и к научному сообществу. Неизменными, пожалуй, остались личные отношения с теми, с кем был знаком раньше. Он встретился со многими крупными палеонтологами, известными своими исследованиями в области ископаемых позвоночных, такими как Ф.Древерман, Ф.фон Хюне, Ф.Бройли, Э.Штромер, Л.Долло, Д.Уотсон. Все они, за исключением Древермана и Штромера, в период между 1925 и 1932 гг. стали иностранными членами АН СССР. Ему удалось поработать с лучшими палеонтологическими коллекциями самых известных европейских музеев естественной истории — в Берлине, Франкфурте-на-Майне, Штутгарте, Тюбингене, Мюнхене, Брюсселе и Лондоне.

Во Франкфурте-на-Майне Рябинин изучал коллекции музея Зенкенбергского общества (ныне — Зенкенбергский музей природы) при любезном содействии А.Борна и Ф.Древермана; в Тюбингене — коллекции Минералогического института, с ним сотрудничали Ф. фон Хюне, Э. фон Хениг, К.Улих; в Мюнхене — коллекции музея Академии наук, ему оказывали всяческую помощь Ф.Бройли и Э.Штромер.

При осмотре музея Зенкенбергского общества его сотрудники были очень внимательны и показали все, что только могло заинтересовать русского ученого. Его поразила их высокая культура и широта взглядов, особенно это касалось Древермана. Внимание Рябинина привлек *великолепный экземпляр Trachodon* с остатками кожи, в совершенстве отпрепарированный... лучший в мире по сохранности, даже в сравнении с Северо-Американскими образцами* [17, л.144].

Следует пояснить, что и в Зенкенбергском музее, и в Американском музее естественной истории (Нью-Йорк, США) хранятся экземпляры динозавров из семейства гадрозавриды (Hadrosauridae), раннее относимых к семейству траходонтиды (Trachodontidae). Оба экспоната имеют прекрасную сохранность, оба в разные годы были куплены у американского палеонтолога Ч.Штернберга, который вел поиски окаменелостей вместе со своими сыновьями и сотрудничал со многими музеями США и Европы. Обе находки (1908 и 1910 гг.) — из раскопок в штате Вайоминг (США).

Экземпляр 1908 г. известен как «мумия траходона», он хранится в Американском музее естественной истории (номер AMNH 5060), в настоящее время классифицируется как представитель вида *Edmontosaurus annectens*, описанного американским палеонтологом Г.Осборном в 1912 г. [18]. Если с этой находкой Рябинин был знаком лишь по пуб-

ликациям, то экспонат 1910 г. из Зенкенбергского музея (номер SM 4036) он осмотрел лично. У этого динозавра сохранилось содержимое желудка, изученное в 1921 г. Р.Крэйзелем [15, с.8]. И поныне обе находки Штернбергов остаются уникальными.

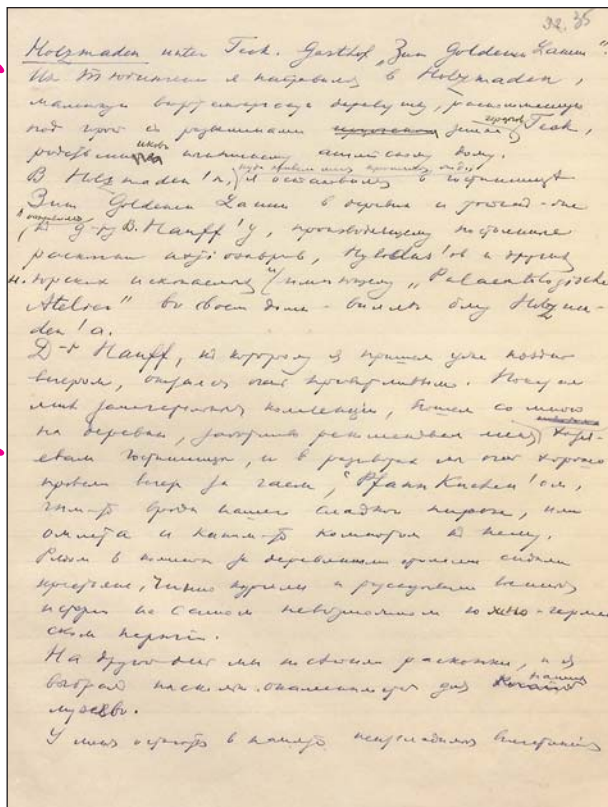
В Штутгарте Рябинин осмотрел Естественно-историческое собрание Вюртемберга (ныне — Государственный музей естествознания Штутгарта), где изучил триасовых ящеротазовых динозавров (платеозавров) прекрасной сохранности.

В Тюбингене Рябинин возобновил знакомство с Хюне — профессором университета, одним из самых известных немецких палеонтологов, с которым познакомился во время первых поездок в Германию. Рекомендацию, по-видимому, составил оказывавший ему всяческое содействие профессор Яковлев, знавший Хюне с 1900 г. Ко времени первой поездки Рябинина немецкий ученый уже имел работы по ископаемым рептилиям. Он продемонстрировал гостю еще не подвергшиеся обработке богатые коллекции парейазавров и дицинодонтов, привезенные им из Южной Африки. Из Тюбингена Рябинин направился в Хольцмаден, *маленькую вюртембергскую деревушку, расположенную под горой с развалинами замка герцогов Теск, родственников нынешнему английскому дому* [17, л.149] (ныне — коммуна в земле Баден-Вюртемберг, административного округа Штутгарта, район Эслингена). Хольцмаден прославился прекрасными находками ископаемых ихтиозавров из сланцевых разработок. Там он встретился с доктором Б.Гауффом, производившим постоянные раскопки раннеюрских ихтиозавров, акул и других ископаемых, и осмотрел палеонтологическую мастерскую, находившуюся в его доме-вилле недалеко от Хольцмадена. *Доктор Гауфф, к которому я пришел уже поздно вечером, оказался очень приветливым. Показал мне замечательные коллекции, пошел со мною на деревню, заботливо рекомендовал меня хозяевам гостиницы, и в разговоре мы очень хорошо провели вечер за чаем с Pfannkuchen, чем-то вроде нашего сладкого пирога или омлета с каким-то компотом к нему,* — записал в своем дневнике Рябинин [17, л.149].

На следующий день он посетил раскопки и даже выбрал окаменелости для российских музеев. О докторе Гауффе, этом известном поставщике окаменелостей для всех музеев Европы, австрийский палеонтолог О.Абель упоминал как о профессионале, опытной рукой которого был препарирован не один ихтиозавр с кожей [19, с.27–28, 32].

О коллекциях музея Баварской академии наук при Мюнхенском университете Рябинин отзывался как о лучших *на Европейском континенте, кроме Британского музея* [17, л.152]. Глубокое уважение чувствуется в кратких строках дневника, посвященных ученым, с которыми он встречался: *И Stromer, и Broili любезно показывают их* [коллекции. — И.Е., И.Б.], *расспрашиваят о России, да-*

* Trachodon (название от греч. τραχὺς — грубый, шершавый и δόντι — зуб) — растительноядный утконосый динозавр, описан в 1856 г. Лейди по одному зубу, представитель семейства Trachodontidae, установленного тем же ученым.



Страница из дневника Рябинина с записями о посещении Б.Гауффа в Хольцмадене (СПФ АРАН. Ф.732. Оп.1. Д.82. Л.350). Публикуется впервые.

рят свои работы. Еще живы и работают, словно священнодействуют, и Max Schlosser, и K.Kayser, и даже старый-престарый знаменитый зоолог Hertwig [17, л.152].

Из Мюнхена Рябинин поехал в Берлин, а затем в Брюссель. Особенное, очень доброе, глубоко личное отношение чувствуется в строках, посвященных Долло: *Mon vénérable maître et collègue, M.*[месье? — Примеч. ред.] *Louis Dollo, Conservateur du Musée et Membre de l'Académie de Science de Belgique** сильно постарел, поседел и сгорбился. Маленькая фиолетовая бутоньерка скромно выделялась у него в петлице. Он был весьма любезен.

Я передал ему поклоны от профессора Н.Н.Яковлева и профессора F.Vroili, а вместе с тем и благодарность последнего за хорошие отношения Dollo к немцам. Dollo был первым из иностранцев воюющих держав, возобновившим научные сношения с Баварской академией наук и Vroili.

Я лично и в свое время профессор Н.Н.Яковлев обязаны ему своим въездом в Бельгию. И я не думаю, чтобы бельгийские власти не ставили ему на вид, что он постоянно хлопочет то о немцах, то о русских из Советской России. Он сообщил

* Мой почтенный мэтр и коллега, Луи Долло, хранитель музея и член Академии наук Бельгии.

мне, что он теперь уже не французский подданный, а бельгиец, и, мне кажется, в этом я услышал нотку сожаления. Я осмотрел игуанодонов и зал ископаемых позвоночных, получивши прекрасный путеводитель Dollo, и изучал то, что мне было нужно.

В помощь мне был откомандирован для осмотра и изучения способов монтировки ископаемых старый профессор M.Menskaert, фламандец, толстый и отличный человек, прослуживший в Музее 40 лет, еще более, чем сам Dollo.

Итак, Musée, игуанодоны, Dollo, Menskaert, отличная коллекция по сравнительной анатомии в верхнем зале, обширная препараторская и целый громадный склад для муляжей [17, л.156–157].

Действительно, советского палеонтолога профессора Яковлева и ученого с мировой славой Долло связывали давние дружеские отношения. Яковлев познакомился с ним еще во время первой поездки за границу в 1900 г. Тогда он посетил европейские музеи, причем в Брюссель приехал именно для знакомства с Долло. Известный ученый благожелательно принимал молодого российского коллегу, помогал, правил статьи, поощрял исследования ископаемых позвоночных. В своем письме к Яковлеву от 17 сентября 1901 г. он писал: *Я счастлив, что родина Вольдемара Ковалевского**, на мой взгляд, самого крупного палеонтолога второй половины девятнадцатого столетия, приобретает в вашем лице специалиста по ископаемым позвоночным* [20, с.40]. У Яковлева в это время вышел ряд работ по ископаемым позвоночным. Тем не менее основным направлением его научной деятельности стало изучение беспозвоночных животных. Своими впечатлениями о встрече он, по-видимому, поделился с Хюне, с которым познакомился незадолго до этого в Тюбингене, и уже в следующем 1901 г. Долло, всегда с особенным вниманием относившийся к молодым исследователям, согласился принять немецкого ученого. Спустя шесть лет, в 1907 г., он принял Рябинина. В то время Анатолий Николаевич работал над описанием двух плезиозавров, один из которых был обнаружен на р.Унже (недалеко от д.Градулево Кологривского уезда Костромской губернии), другой — у г.Изюма Харьковской губернии [21]. Прошло 17 лет, они встретились, и Долло вновь оказал посильную помощь и содействие соотечественнику так высоко ценимого им В.О.Ковалевского.

В Англии Рябинин ознакомился с коллекциями Лондонского музея естественной истории. В первый приезд ему помогал хранитель геологического отделения профессор А.С.Будворд, мировой

** Владимир Онуфриевич Ковалевский (1842–1883) — выдающийся российский ученый-палеонтолог, основоположник эволюционной палеонтологии, муж Софьи Ковалевской (первой в мире женщины — профессора математики) и брат зоолога Александра Ковалевского.

эксперт по ископаемым рыбам, автор каталогов их находок. В 1924 г. он ушел в отставку, получив за свои научные заслуги титул баронета. Заменивший его доктор Ф.А.Батер отлично принял Рябинина и предоставил все возможности для работы. Только здесь Анатолий Николаевич смог изучить новейшую английскую, канадскую и сев.-американскую литературу [16, с.215] по палеонтологии динозавров, так как изоляция в отношении России и Германии со стороны мирового научного сообщества, продлившаяся до начала 1920-х годов, сказалась и на обмене литературой. В дневнике он сделал краткую запись по этому поводу: *Осмотр палеонтологической части Музея оставил во мне глубокое удовлетворение: в нем сосредоточены такие богатства. Траходона оказалась немного, и я насел на библиотеку Музея, в которой уже были получены все интересовавшие меня американские новинки* [17, л.179–180].

В Лондоне ему удалось встретиться с известным профессором зоологии и палеонтологии Лондонского университета Уотсоном, который щедро представил советскому ученому свои коллекции.

Отметим, что костный материал, связанный с интересовавшими его гадрозавридами, Рябинин нашел лишь в музее Зенкенбергского общества и немного в Британском музее. Массовым материалом (скелеты игуанодонов) располагал музей в Брюсселе, там он изучал способы монтировки скелетов. Позже, спустя пять лет, ученый отметит особенную для себя пользу посещения музеев Берлина, Мюнхена, Франкфурта-на-Майне, Брюсселя, Лондона [12, с.6, 10], возможно, имея в виду не только наличие интересующего его сравнительного материала, но и обмен литературой, а также живое неформальное общение.

Реконструкция амурского динозавра

В январе 1925 г., по возвращении из командировки, Рябинин совместно с Н.П.Степановым и скульптором Я.М.Эглоном приступил к реставрации скелета динозавра из костных остатков, собранных из береговых обрывов Амура. Также из гипса была выполнена реконструкция внешнего вида животного примерно в 1/5 его величины. На открытом годовом заседании 1 февраля 1925 г. Анатолий Николаевич выступил с докладом, а затем представил в музее Геолкома* реконструкцию скелета динозавра, предварительно названного *Trachodon amurense* nov. sp. [15]. Позже динозавр был описан как *Mandschurosaurus amurensis* [11].

Воссоздавая амурского манджурозавра, отечественные авторы во многом оказались под влиянием работ Долло (он первым из европейцев

в 1883 г. поставил динозавра на две задние конечности), считавшего бипедализм характерным для игуанодона. В работе нашли отражение утвердившиеся к тому времени взгляды о взаимосвязи между образом жизни, поведением и морфологией животного, согласно которым гадрозавриды считались способными к мобильному передвижению по суше и к быстрому погружению в воду. Изображали их стоящими на задних конечностях, «с приподнятым, не касающимся земли хвостом», свободными передними, согнутыми (по реконструкции Марша 1892 г.) или «прямо опущенными» (по реконструкции Абея) [15]. Именно так выглядит воспроизведенный Рябининим и Степановым скелет динозавра. Они использовали разрозненный костный материал, весьма плохой сохранности, окатанный, утраченные фрагменты дополняли гипсом. Предусматривалась возможность демонтировать кости скелета в случае появления необходимости внести изменения. Так, после обнаружения Е.В.Ивановым и В.Д.Принадой меловых динозавров в Туркестане в 1921–1924 гг. были



Реконструированный скелет манджурозавра в экспозиции ЦНИГР музея имени Ф.А.Чернышева.

Фото И.Ю.Болотского

* Ныне — Центральный научно-исследовательский геологический музей имени академика Ф.Н.Чернышева в Санкт-Петербурге.

внесены изменения в строение таза. В целом даже через пять лет после создания реконструкции Рябинин считал ее не завершенной, а лишь более или менее законченной [11, с.6].

Восстановление в 1925 г. облика *Mandschurosaurus amurensis*, одного из первых описанных гадрозавров Азиатского континента, стало важным опытом подобного воссоздания и отразило существовавший на тот момент объем знаний российских ученых об ископаемом животном. К сожалению, материал по манджурозавру позднее был пересмотрен и признан *nomen dubium**, так как он фрагментарен и представлен костями особей не одного вида, а разных подсемейств: плечо и, вероятно, фрагмент челюсти с прямым вентральным краем принадлежали плоскоголовому гадрозавру (завролофину), остальное — шлемоголовому гадрозавру (ламбеозаврину). Тем не менее, это не умаляет значимости выполненной работы, поскольку она была проведена впервые в России и означала прорыв в знаниях о давно вымерших животных, когда-то царивших на Земле.

* *Nomen dubium*, лат. — сомнительное название. Номенклатурный термин, означающий, что данное название имеет неопределенное применение либо из-за неудовлетворительной типификации, либо из-за невозможности установить, к какому таксону должен быть отнесен номенклатурный тип данного названия.

* * *

Исследования, начатые Рябининым, послужили толчком для более поздних палеозоологических открытий, как в Советском Союзе, так и за его пределами [1, с.95]. В последующие годы меловые динозавры были обнаружены в Туркестане (1921–1924) и Казахстане (1923). За пределами СССР успешные раскопки были произведены в центральной части Индии (1917–1920), в Монголии (1922–1925) и Китае (1923).

Знакомство Рябинина с достижениями мировой палеонтологии в 1924 г. позволило ему сравнить и выявить сходство и различие динозавровых фаун Северной Америки и Азии. Ископаемых рептилий местонахождения Белые Кручи он соотнес с такими из канадской позднемеловой формации Эдмонтон. А так как фауны формаций Эдмонтон и Ланс (США) близки, Анатолий Николаевич сделал вывод, отчасти подтвердившийся в настоящее время, о возможности таких находок на Амуре, которые являются общими со слоям Эдмонтон и Ланс, а именно: *Ornithomimus*, *Thespesius*, *Ankylosaurus* и *Thescelosaurus*, родов, являющихся типичными для слоев Ланс [22, с.49].

Позднее, в 1975 г., на правом берегу Амура, в местонахождении Лунгушань китайские палеонтологи провели раскопки и нашли обильные кост-



Панорама палеонтологического лагеря. Благовещенск, Амурская обл., 2004 г.

Фото Ю.Л.Болотского



Амурозавры. Картина А.А.Атучина.

ные остатки. По этим материалам бельгийский ученый П.Годфруа совместно с китайскими коллегами описал новый род и вид ламбеозаврин *Charonosaurus jiyinensis* [23].

В 1980–2000 гг. на левом берегу Амура, в Амурской обл., было открыто пять местонахождений позднемеловых динозавров: Благовещенское, Кундурское, Гильчинское, Асташихинское и Димское. Первый описанный в 1991 г. динозавр (из Благовещенского местонахождения) получил название в честь Анатолия Николаевича — амурозавр Рябинина (*Amurosaurus riabini*)*. Кундурское местонахождение** (верхний мел, маастрихтский ярус), расположенное примерно в 30 км от местонахождения Белые Кручи (Цзяинь), на водоразделе рек Мутная и Удурчакан, исследовалось в 1990–2004 гг. Там найдены остатки утконосых гадрозаврид — представителей подсемейств ламбеозаврин (*Lambeosaurinae*) и завролофин (*Saurolorphinae*), плотоядных динозавров из семейств тираннозаврид (*Tyrannosauridae*), дромеозаврид (*Dromaeosauridae*) и троодонтид (*Troodontidae*), панцирных динозавров анкилозавров (*Ankylosauria*), завроподного динозавра *Arkharavia heterocoelica* из семейства титанозаврид (*Titanosauridae*), черепах *Trionyx* sp. и *Amuremys planicostata*. Последнюю форму ныне относят к семейству линдхолмемидид (*Lindholme-myddidae*), тогда как Рябинин определял ее как *Aspideretes planicostatus* из семейства трионихид (*Trionychidae*).

* С февраля 2015 г. 12-метровая скульптура амурозавра украшает вход в Дарвиновский музей в Москве.

** См.: Курочкин Е.Н. Гадрозавры на Амуре // Сборник научно-популярных статей — победителей конкурса РФФИ 2007 г. Вып.11. М., 2008. С.179–186.



Скелет амурозавра Рябинина. Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск.

Фото А.А.Атучина

В.И.Вернадский писал: *История научных идей никогда не может быть окончательно написана,*

так как она всегда будет являться отражением современного состояния научного знания в былом человечества. Каждое поколение пишет ее вновь. <...> Человечество не только открывает новое, неизвестное, непонятное в окружающей его природе — оно одновременно открывает в своей истории многочисленные забытые проблески понимания отдельными личностями этих, казалось, новых явлений. Движение вперед обуславливается

долгой, незаметной и неосознанной подготовительной работой поколений. Достигнув нового и неизвестного, мы всегда с удивлением находим в прошлом предшественников [24, с.56].

Трудно сказать более точно о непрерывности и преемственности получения знания, а также о том, что история каждой последующей научной идеи в определенной степени открывает присутствие предыдущей. ■

Авторы искренне благодарны А.П.Сорокину, председателю Амурского научного центра ДВО РАН, и Ю.Л.Болотскому, заведующему палеонтологической лабораторией Института геологии и природопользования ДВО РАН, за содействие исследованию, Л.Р.Колбанцеву, заместителю директора ЦНИГР музея имени академика Ф.А.Чернышева, за предоставленные материалы, А.В.Телюку, генеральному директору ОАО «Амурская ярмарка» (Благовещенск), за оказание финансовой поддержки, В.С.Маркевич и Е.В.Бугдаевой, сотрудникам Биолого-почвенного института ДВО РАН (Владивосток), за ценные замечания и доброжелательное внимание к нашей работе.

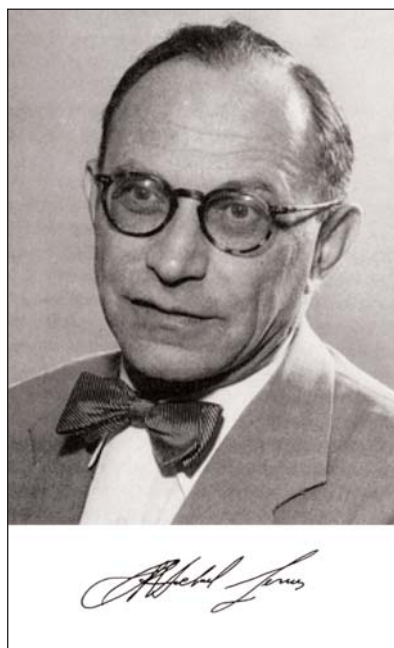
Литература

1. Боровиков Л.И. Анатолий Николаевич Рябинин (1874–1942) // Выдающиеся ученые Геологического комитета — ВСЕГЕИ: Сб. статей / Отв. ред. А.П.Марковский. Л., 1982. С.79–108.
2. Болотский Ю.Л., Курзанов С.М. Гадрозавры Амурского региона // Геология тихоокеанской границы. Благовещенск, 1991. С.94–103.
3. Godefroit P., Bolotsky Y.L., Bolotsky I.Y. Osteology and relationships of *Olorotitan arborensis*, a hollow-crested hadrosaurid dinosaur from the latest Cretaceous of Far Eastern Russia // Acta Palaeontologica Polonica. 2012. V.57. №3. P.527–560.
4. Bolotsky Y.L., Godefroit P., Bolotsky I.Y., Atuchin A. Hadrosaurus from the Far East: historical perspective and new Amurosaurus material from Blagoveschensk (Amur region, Russia) // Hadrosaurs / Eds.: D.A.Eberth, D.C.Evans. Indiana, 2014. P.315–331.
5. Рябинин А.Н. Заметка о динозавре из Забайкалья // Тр. Геол. музея им.Петра Великого ИАН. 1914. Т.8. Вып.5. С.133–140.
6. Рождественский А.К. Изучение меловых рептилий в России // Палеонтологический журнал. 1973. №2. С.90–98.
7. Несов Л.А. Динозавры Северной Евразии: новые данные о составе комплексов, экологии и палеобиогеографии. СПб., 1995.
8. Известия Геологического комитета. 1916. Т.35. №6. С.225–226.
9. Известия Геологического комитета. 1926 (за 1917 г.). Т.36. С.21–22.
10. Ежегодник Русского палеонтологического общества. Т.П. Петроград, 1918 (за 1917 г.). С.126–130.
11. Рябинин А.Н. *Mandschurosaurus amurensis* nov. gen. nov. sp., верхнемеловой динозавр с р.Амура. Л., 1930.
12. Известия Геологического комитета. 1919. Т.37. №1. С.385–386.
13. Клеопов И.Л. Геологический комитет. 1882–1929. История геологии в России. М., 1964.
14. Яковлев Н.Н. А.Н.Рябинин // Ежегодник Всероссийского палеонтологического общества. Т.ХII (1936–1939). М.; Л., 1945. С.3–10.
15. Рябинин А.Н. Реставрированный скелет исполинского ящера *Trachodon amurensis* nov. sp. // Изв. Геол. ком. 1925. Т.44. №1. С.1–12.
16. Изв. Геол. ком. 1925. Т.44. №1. С.214–215.
17. Санкт-Петербургский филиал Архива РАН (СПФ АРАН). Ф.732. Оп.1. Д.82.
18. Osborn H.F. Integument of the iguanodont dinosaur *Trachodon* // Mem. Amer. Museum Nat. History. 1912. V.1. P.33–54.
19. Абель О. Основы палеонтологии. М.; Л., 1926.
20. Габуня Л.К. Луи Долло (1857–1931). М., 1974.
21. Рябинин А.Н. Два плезиозавра из юры и мела Европейской России // Тр. Геол. ком. 1909. Нов. Серия. Вып.43. С.1–2.
22. Рябинин А.Н. К вопросу о фауне и возрасте динозавровых слоев на р.Амур // Зап. Рус. минерал. об-ва. 1930. Вып.50. №1. С.41–51.
23. Godefroit P., Zan S.B., Jin L. *Charonosaurus jiyinensis* n.g., n.sp., a lambeosaurine dinosaur from the Late Maastrichtian of northeastern China // Comptes Rendus Acad. Sci. Paris: Sci. Terre et Planets. 2000. №330. P.875–882.
24. Вернадский В.И. Памяти М.В.Ломоносова // Вернадский В.И. Труды по истории науки в России. М., 1988. С.55–58.

«Дорогой Михаил Михайлович!» Письма советских генетиков И.М.Лернеру

За последние 30 лет опубликовано много работ об отечественных ученых XX в., оказавшихся в эмиграции¹. Имена некоторых попали в центр внимания, другие, хотя и названные, остались на периферии, а третьих вовсе пропустили. Среди последних оказался И.М.Лернер (1910–1977) — один из двух наиболее известных американских генетиков русского происхождения². Если Ф.Г.Добржанский (1900–1975), живший в России до 28 лет, ученым стал в Киеве и Петрограде-Ленинграде, то Лернер даже высшее образование получил уже за рубежом. Тем не менее его, безусловно, можно считать русским ученым, поскольку, как и для Добржанского, именно «русские корни» сыграли основополагающую роль в его становлении как человека и ученого.

Исидор (Михаил) Михайлович Лернер (в английской транскрипции Isadore Michael Lerner) родился 15 мая 1910 г. в Харбине — по меркам того времени большом городе на севере Маньчжурии. Его родители, Михаил и Сесилия (Суджа) Лер-



И.М.Лернер.

нер, до Харбина жили в Иркутске. Мальчик рос в атмосфере почитания и понимания культуры и искусства, с детства любил оперу, увлекался историей, очень много читал, причем не только на русском, но и на нескольких иностранных языках. Еще в юности Лернер стал универсально образованным человеком, и его феноменальная память хранила массу сведений об артистах, композиторах, писателях, ученых и исторических деятелях, что сослужило ему хорошую службу в будущем, особенно при написании статей и книг общетеоретического и методологического характера.

Без превосходного владения русским языком, который остался его родным до конца жизни (как и для большинства российских эмигрантов первой волны), Лернер вряд ли смог бы так блестяще освоить английский. Вместе с Добржанским и другим своим коллегой и добрым другом, К.Штерном³, которым также пришлось овладеть в совершенстве чужим для них языком, Лернер установил высокий стандарт написания учебников и других книг по генетике, например известного учебника «Наследственность, эволюция и общество»⁴.

К тем же «русским корням» следует, несомненно, отнести личностные качества Лернера и его ценности. Он был скромным, но настойчивым, упорным в достижении поставленной цели, трудолюбивым и требовательным к себе. Веселый и сердечный человек, с дружелюбным характером.

¹ См., например: Российские ученые и инженеры в эмиграции. М., 1993; Русское зарубежье. Золотая книга эмиграции. Первая треть XX века: Энциклопедический биографический словарь. М., 1997; *Татоли Т.В.* Научная жизнь русского зарубежья // Русская литература XX века в контексте мировой культуры. VI Крымские международные Шмелевские чтения: Материалы науч. конф. Алушта, 1997. С.306–309.

² См. подробнее: *Конашев М.В.* Из плесяды американских ученых русского происхождения: И.М.Лернер // Деятели русской науки XIX–XX веков. СПб., 2000. Вып.2. С.109–123; *Glass B.* I.Michael Lerner // The American Philosophical Society. Philadelphia, 1985. P.130–135; *Glass B.* I.Michael Lerner Papers // A Guide to the Genetics Collections of the American Philosophical Society Library (APSL). Philadelphia, 1988. P.54–57.

³ Курт Штерн (Curt Stern, 1902–1981), американский и немецкий зоолог и генетик. Изучал мутации генов и кроссинговер у дрозофилы, цитогенетику человека, сформулировал понятие о дозовой компенсации генов половых хромосом.

⁴ *Lerner I.M.* Heredity, Evolution and Society. San Francisco, 1968. Doi:10.1002/ajpa.1330340322.

ром, которого все его друзья называли просто Майк, он обладал высококритичным и оригинальным мышлением, свободным от слепого поклонения даже заслуженным авторитетам. Наконец, на протяжении всей своей жизни он придерживался строгих личных этических норм, был скрупулезным и даже дотошным в отношении к достоверности и доказательности выполненной им исследовательской работы. Лернер всегда оставался сторонником слабых и гонимых, искренним и откровенным защитником справедливости, этических и правовых демократических норм и основ.

В 1927 г. изменившаяся ситуация в Харбине (там уже управляли японцы) не позволяла получать университетское образование, и Лернер эмигрировал в Америку. Примечательно, что в декабре того же года уехал в Америку и Добржанский. Вскоре пути обоих эмигрантов пересеклись, и завязавшаяся дружба и научные контакты продолжались до самой кончины Добржанского¹. К счастью для Лернера, во время Великой депрессии он нашел работу — копать канавы и поить цыплят на птицеферме Университета Британской Колумбии.

Так, несколько необычно и неожиданно, Лернер ступил на тернистую тропу науки. Получив степень бакалавра при одобрении и поддержке Добржанского, чей энтузиазм, советы и дружеская помощь оказали огромное влияние на его становление как ученого, он решает продолжить свое обучение. В 1936 г., после защиты докторской диссертации (Ph.D.) в Калифорнийском университете в Беркли, Лернера назначают там инструктором по птицеводству. Началось его неуклонное восхождение по академической лестнице до ранга профессора. В 1958 г. он перешел на кафедру генетики в Университете Беркли и возглавлял ее до 1963 г., после чего оставил заведование кафедрой, всецело посвятив себя исследовательской работе, а 10 лет спустя ушел в отставку, став почетным профессором (professor emeritus).

У Лернера было несколько почетных наград². В 1959 г. его избрали в национальную Академию наук США; в 1963-м — в Американскую академию искусств и наук, в 1969 г. — в Американское философское общество. Он также стал иностранным членом Сельскохозяйственной экономической академии во Флоренции и получил почетные научные степени от Университета Британской Колумбии и Университета Эдинбурга. Много сил и времени отдавал организации и совершенствованию науки: помимо многочисленных административно-научных обязанностей в университете редактировал журнал *Evolution* (1959–1961); был вице-президентом Общества по изучению эволюции (1962),

а затем и его президентом (1964); вице-президентом Американского общества натуралистов (1957); секретарем Международного комитета генетических конгрессов (1953–1958) и представителем США в этом комитете (1958–1963).

Лернера по праву причисляют к тем выдающимся генетикам, которые создали «синтетическую теорию эволюции»³. В 1930–1940-х годах он наряду с Ф.Добржанским, М.Квейлом, Б.Спасским, А.Стёртевантом и др. изучал генетику природных популяций различных видов дрозофилы: направление отбора, роль изоляции, генетический полиморфизм вида, хромосомную изменчивость разных видов. Такие исследования послужили одной из эмпирических основ последующего эволюционного синтеза, в котором важную роль сыграли многие отечественные ученые.

Лернер, изучая фенотипический параллелизм и неполную гомологию у кур, пришел к важным выводам:

— основные гены массовых фенотипических изменений связаны в своем действии с уязвимыми пунктами онтогенеза;

— от генов, обуславливающих тератологические изменения, они отличаются тем, что проявляются на конечных стадиях развития, не столь резко изменяют фенотип и потому нелетальны.

Благодаря исследованиям Лернера, а также Ю.М.Оленова, К.Гордона с соавторами и Р.Милкмана на дрозофиле было показано важное эволюционное значение ложной и неполной гомологии; установлено чрезвычайно широкое распространение этого явления в природе (от микроорганизмов до человека) и его едва ли не более значительная роль, чем гомологии истинной.

Работы ленинградской школы генетиков конца 1930-х годов по изучению мутационного процесса в природных популяциях дрозофилы, вероятно, были использованы Лернером и Добржанским в середине 1950-х при разработке балансовой концепции генетической структуры популяций. Так, Г.Д.Муретов обратил внимание на широкое распространение в популяциях так называемых малых мутаций, образующих хотя и более редкую, но регулярно встречающуюся категорию мутаций, лишь слегка понижающих или, напротив, повышающих жизнеспособность своих носителей. Физиологическим малым мутациям принадлежит особенно важная эволюционная роль в качестве материала для действия отбора. Р.Л.Берг обнаружила насыщенность популяций *Drosophila melanogaster* мутациями стерильности, затрагивающими или оба пола, или один из них (особенно часто — самок). Парадоксальный факт адаптивного преимущества гетерозигот по ряду летальных мутаций, выделенных из природы, установила Р.А.Мазинг. Перечисленные работы стали одним из первых свидетельств существования моногенного гетерозиса, которому

¹ См.: APSL I. Michael Lerner Papers. Dobzhansky Th.; APSL Th. Dobzhansky Papers. Lerner I.M.

² The Poultry Science Research Prize, 1937; the Belling Prize, 1940; the Borden Award and Medal, 1951; the Weldon Memorial Prize and Medal of Oxford University, 1969.

³ Развитие эволюционной теории в СССР. Л., 1983. С.33.

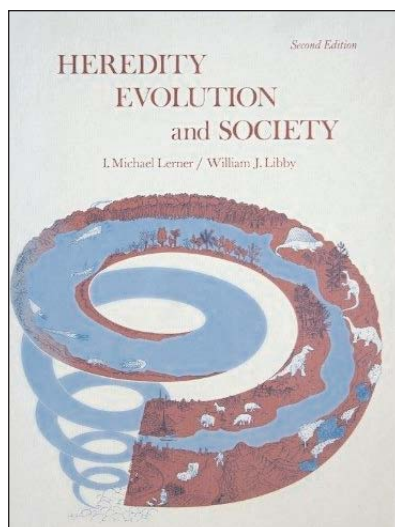
впоследствии Лернер и Добржанский отвели важную роль в поддержании генетической структуры популяций.

Среди исследований, положивших начало изучению взаимодействия межвидовой и внутривидовой конкуренции в процессе эволюции, обычно также называются работы Лернера с сотрудниками, выполненные на жуках рода *Tribolium*¹.

Новые возможности в изучении взаимодействий мутагенеза и отбора появились после бурного развития в 1940–1950-х годах генетики количественных признаков. Современную трактовку этого вопроса тоже связывают с именем Лернера. Он, как и многие другие представители экологической генетики и эволюционной экологии (Е.Демпстер, с которым сотрудничал И.М.Лернер, Г.А.Викторов, И.Дарлингтон, Д.Пайментель и др.), пришел к предложенному еще И.И.Шмальгаузену в конце 1930-х годов пониманию механизмов микроэволюции.

Наибольшую известность и признание получила концепция генетического гомеостаза Лернера². Согласно ей, наиболее адаптирован не тот индивид, который соответствует определенной фенотипической норме, а скорее тот, чье развитие и репродуктивные потенции приспособлены к изменяющимся условиям среды так, что в целом сохраняется его высокая пригодность. Самая успешная популяция та, которая от поколения к поколению может встретить вызов изменений среды. Другими словами, гомеостатические средства стабилизируют собственное репродуктивное совершенство индивида, имеют высокую селективную ценность, а гетерогенный генетический баланс при сходном или одинаковом фенотипе в пределах одного поколения может быть преимуществом для популяции. Эти постулаты, подкрепленные накопленными доказательствами, показали важность таких концепций, как буферные и балансовые генотипы, интегрированные генные пулы и коадаптация для эволюционной теории и эволюционных исследований.

Научные интересы Лернера в генетике распадаются на три существенно перекрывающиеся области. На начальном этапе своей научной деятельности он изучал генетику домашней птицы: первым занялся генетикой относительного роста



Обложка книги И.М.Лернера «Наследственность, эволюция и общество».

и сопротивляемости болезням; затем — генетическими компонентами кладки яиц, различными эффектами отбора в сочетании с инбридингом; эмпирически проверял теоретические предсказания, полученные на основе отбора нескольких генетических характеристик одновременно. В результате этих работ он вывел «индекс оптимального отбора», получивший широкое признание и использование, благодаря чему в течение всего нескольких лет удалось удвоить производство яиц на птицефермах. Исследования этого периода подытожены в двух монографиях, получивших высокую оценку коллег: «Популяционная генетика и улучшение животных»³ и «Генетических основах отбора»⁴. Обе книги широко использовались и были переведены на несколько иностранных языков.

Второй период генетических исследований Лернера начался с подготовки «Генетического гомеостаза». Теоретическая часть этих работ тесно соприкасалась и практически слилась во времени с третьей областью его научных поисков: устойчивым и все возрастающим интересом к социальным и поведенческим аспектам генетики. Эта тенденция с очевидностью просматривается уже в подзаголовке его книги «Современные достижения в разведении животных: исследование их генетических и социальных аспектов»⁵, написанной совместно с Г.П.Дональдом, английским генетиком из Эдинбурга. Результаты исследований в этой области обобщались и анализировались в специальном курсе, который Лернер читал в Беркли.

Последней книгой Лернера стал его перевод опальной рукописи советского биолога Ж.А.Медведева «История биологической дискуссии в СССР (1929–1966)» о лысенкоизме и его последствиях для науки в СССР. Когда Медведев понял, что опубликовать книгу в Советском Союзе не удастся, за помощью он обратился к Лернеру⁶. Так в результате почти двух лет совместного труда появилась книга, получившая название «Взлет и падение Т.Д.Лысенко»⁷, добавившая славы (безусловно,

¹ Lerner I.M., Ho F. Genotype and competitive ability of *Tribolium* species. // Amer. Natur. 1961. V.95. №885. P.329–343; Lerner I.M., Dempster E. Indeterminism in interspecific competition // Proc. Nat. Acad. Sci. 1962. V.48. №5. P.821–826.

² Lerner I.M. Genetic Homeostasis. N.Y., 1954.

³ Lerner I.M. Population Genetics and Animal Improvement. Cambridge, 1950.

⁴ Lerner I.M. The Genetic Basis of Selection. N.Y., 1958.

⁵ Lerner I.M., Donald H.P. Modern Developments in Animal Breeding: A Study of Their Genetic and Social Aspects. L., 1966.

⁶ См. переписку Ж.А.Медведева с И.М.Лернером, хранящуюся в Рукописном отделе Американского философского общества: APSL. I.Michael Lerner Papers.

⁷ Medvedev Zh. The Rise and Fall of T.D.Lysenko. N.Y.; L., 1969.

в немалой степени политически скандальной) и ее автору, и редактору-переводчику. В Советском Союзе она попала в спецхран¹.

Даже рецензии на книгу Медведева тоже помещались в спецхран. Именно из-за одной из них попал туда, например, №3887 журнала «Science» за 1969 г. Нелегально по рукам ходил главным образом русский оригинал книги в машинописных копиях. На русском языке книга была опубликована лишь в 1993 г.

После смерти Лернера в 1977 г. его архив, как важный источник по истории генетики, был подарен библиотеке Американского философского общества. Значительную часть этой коллекции составляет переписка И.М.Лернера с советскими би-

ологами: Б.Л.Астауровым, Д.К.Беляевым, Ю.Ю.Керкисом, Ж.А.Медведевым, Н.В.Тимофеевым-Рессовским и другими. Предлагаемая подборка писем к нему невелика, но дает представление о разнообразии и характере переписки в целом. Все публикуемые здесь впервые письма находятся в архиве Лернера в Библиотеке Американского философского общества

Публикация осуществлена по правилам современной орфографии и пунктуации. Сокращенные слова приведены в тексте полностью, дописанная часть слова дана в квадратных скобках, как и слова, вставленные в текст составителем. Слова или их часть, которые не удалось точно прочитать, заключены в угловые скобки, а неразборчиво написанные отмечены знаком <...>. Зачеркнутые авторами слова и фразы заменены знаком «xxxx», авторское подчеркивание сохранено.

© Публикация, перевод и комментарии
Конашева М.Б., 2016

¹ См. *Конашев М.Б.* Лысенкоизм под охраной спецхрана // Ре-
прессированная наука. СПб., 1994. С.101.

С.И.Алиханян¹ – И.М.Лернеру²

9-IX-[19]66 г.

Дорогой профессор Лернер!

На длительный срок выезжает в США мой молодой друг Сергей Шестаков³. Был бы очень Вам признателен за максимальное содействие, которое Вы ему могли бы оказать для того, чтобы он смог полностью выполнить намеченный план.

Живо вспоминаю наши беседы в Праге. Встретимся ли еще раз? Жизнь у нас в генетике превос-

ходная. Теперь только бы работать. Мы ведь здорово отстали и количественно, и качественно. Хорошо было бы, если Вы могли бы организовать приглашение группы советских генетиков посетить американские генетические лаборатории. Такое групповое приглашение Вы могли бы направить в наше новое общество генетиков, Президентом которого избран Б.Л.Астауров, а Вице-президентом я. Группу генетиков можно было бы представить в таком составе: Астауров Борис Львович, Дубинин Николай Петрович, Алиханян



С.И.Алиханян (стоит, крайний слева) с сотрудниками и студентами кафедры генетики биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. 1948 г.

Сос Исаакович, Лобашев Михаил Ефимович, Хаджинов Михаил Иванович (очень хороший специалист по генетике растений), Гершензон С.М.

Пишите, буду рад Вашему письму.

Уважающий Вас *С.Алиханян* (С.И.Алиханян)

«13» ноября 1967 г.

Дорогой Михаил Михайлович!

Теперь Вы и Ваши коллеги — наши хорошие воспоминания. Рассказываю своим сотрудникам о Вас, о Вашем Университете⁴. О гостеприимстве и о добрых чувствах к нам, которые мы неизменно встречали у Вас.

Большое спасибо за время, которое Вы уделили нам, большое спасибо за все.

Приветы Вам, Вашей супруге <...>, а также <...> Демпстеру⁵.

С наилучшими приветами Ваш

С.Алиханян (С.И.Алиханян)

Проф. С.И.Алиханян
Курчатовский институт атомной энергии
Москва, СССР
Prof. S.I.Alikhanian
Kurchatov's Institute
of Atomic Energy
USSR, Moscow

¹ Сос Исаакович Алиханян (1906–1985), генетик, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. В 1958–1968 гг. работал в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова, в 1968 г. организовал Всесоюзный научно-исследовательский институт генетики и селекции промышленных микроорганизмов, директором которого был до 1975 г. Автор работ, посвященных генетической рекомбинации у актиномицетов, генетическому взаимодействию актиномицетной клетки и актинофага, генетическому контролю синтеза ДНК у бактерий и фагов, а также молекулярным механизмам мутагенеза у бактериофагов и генетическому аппарату тиминового метаболизма фага.

² APSL. B: L563. Michael (Isadore Michael) Lerner papers, ca. 1930s–1970s. Alikhanyan, S.I.

³ Сергей Васильевич Шестаков (р.1934) — генетик, академик РАН (2000); в 1966 г. — старший научный сотрудник кафедры генетики Московского государственного университета, заведующий кафедрой в 1980–2009 гг.

⁴ Калифорнийский университет (University of California).

⁵ Эверет Р.Демпстер (Everett R.Dempster, 1903–1992), американский генетик, профессор Калифорнийского университета. Вместе с Лернером изучал наследование ряда компонентов яйценоскости кур.

Б.Л.Астауров¹ — И.М.Лернеру²

Москва, 14.IX.[19]67.

Многоуважаемый Михаил Михайлович!³

Я обещал Вам справиться относительно первого цитирования термина «евфеника» в статьях Н.К.Кольцова. Я оказался совершенно прав в том, что термин этот имеет по крайней мере 40-летнюю давность: в «Большой медицинской энциклопедии» (Издание Акционерного общества «Совет-

ская энциклопедия», Москва. 1929) в томе 9 (дефект — желток) Вы найдете статьи 1) «Евгеника», написана Т.Юдиным, стр. 663–670 и 2) «Евфеника»⁴, написана Н.К.Кольцовым, стр. 689–692. Но, вероятно, можно было бы найти и более раннее применение этого слова в наших русских журналах: «Известиях Бюро по генетике и евгенике», которые начали издаваться в Ленинграде в 1922 г.⁵ и, еще вероятнее, в кольцовском журнале «Русский евгенический журнал», который начал издаваться в том же 1922 году в Москве⁶. Я просто не имел времени порыться в кольцовских статьях, там опубликованных. Буду рад, если Вы сообщите об этих моих изысканиях Lederberg'у⁷, а также L.C.Dunn'у⁸, который этим тоже заинтересовался, т.к. был знаком с Кольцовым. Впрочем, я напишу им и сам.

Здесь я обменивался с некоторыми товарищами, а также с двумя-тремя руководящими лицами в Академии наук по поводу «целесообразности» проведения XIII Межд[ународного] генетического конгресса у нас. Хотя сейчас трудно высказаться вполне определенно, но общее настроение примерно таково: устроить конгресс у нас очень заманчиво (все этому симпатизируют), но, вероятно, разумнее было бы провести у нас не XIII, а XIV конгресс⁹, тем более что цифра «13» настораживает.

Конечно, это ни в коем случае нельзя рассматривать как официальное и окончательное решение. Однако настроение это симптоматично, и что касается до меня самого, то я настроен подобным же образом. Я думаю, что даже считаясь с тем, что это пока лишь общая тенденция, о ней все же полезно будет знать американским коллегам.

Несколько человек просили меня о возможности приобрести научно-популярный фильм, который я показывал: «В глубины живого»¹⁰. Я не помню, были ли Вы среди этих спрашивающих, но на всякий случай сообщаю, что фильм, вероятно, приобрести нетрудно, и для этого надо письменно обратиться к Л.И.Рудницкому, представителю Комитета по кинематографии при Совете министров СССР. Его теперешний адрес: Монреаль, Экспо-67, Советский павильон, отдел кинофильмов. Сколько времени он там проживет, не знаю, но он просил писать ему туда. Я написал по поводу конгресса и фильма помимо Вас также E.V.Lewis'у¹¹.

С большим удовольствием вспоминаю нашу встречу и только сожалею, что мне пришлось общаться с Вами так кратковременно, чтобы не сказать мимолетно¹².

Пожалуйста, передайте мой самый сердечный привет и добрые пожелания Вашей супруге. Я всегда буду помнить ее радушие.

Искренне Ваш

Б.Астауров

Коломбо, 14.XII.[19]69.

Дорогой Иван Михайлович,
случай занес меня на Цейлон на годичную сессию здешней Ассоциации по развитию наук. Се-



Б.Л.Астауров.

годня я здесь первый день и должен буду возвращаться в Москву 23 декабря. Я не уверен, что мои письма до Вас доходили, и мне хочется послать Вам отсюда привет от себя и от Д.К.Беляева и поздравить Вас с выздоровлением. Мы знали, что Вы перенесли тяжелую операцию (мне об этом говорил С. Stern на XII I.G.C.), и мы очень тревожились за Вас. Я хотел Вас очень поблагодарить за Вашу книгу *Genetics, Evolution and Society*, которую я в конце концов по домашнему адресу получил. <D. Ebert>, с которым я встречался в августе этого года на IX Embryological Conference в Москве¹³, хотел мне послать Ваш второй opus (<переводной>), и, должно быть, уже с месяц, если не более, как послал мне его, но он до меня пока не дошел. Я видел книгу в руках у автора и убедился из Вашего предисловия¹⁴, что Вы, по-видимому, несколько превратно представляете себе, как разворачивались события с изданием книги в конце 1967 г. после возвращения нашего домой. Во всяком случае никто из нас не осложнял жизнь автора¹⁵, напротив, была сделана очень энергичная попытка помочь ему путем издания книги у нас, и она почти удалась. Но потом все-таки не осуществилась, и тогда автор сам осложнил свою жизнь¹⁶, да и нашу тоже, особенно Н.В.Тимофеева-Ресовского (однако пока в терпимых пределах). Почта ходит медленно и плохо, и понятно, что взаимная информация <отпадает.> Я, например, не получил ни одного подтверждения (впрочем, кажется, одно от <...>) о получении разосланного мною моего опубликованного в «Природе» перевода лекции А.Стёртеванта¹⁷ о «Т.Г.Моргане¹⁸» (он читал эту лекцию на морской биологической станц[ии] в Woods Hole). Правда, это не такой приметный оттиск, чтобы его получение стоило подтверждать (к тому же написанный порусски и потому иностранцами в общем не читаемый). Однако один человек по крайней мере должен бы был подтвердить получение нескольких копий этого оттиска — это сам А.Стёртевант,

с разрешения которого <я его ...> перевел и опубликовал. Мне очень неприятно думать, что он не получил моей посылки и считает, м[ожет] б[ыть], меня свиньей. Мне это тем более неприятно, что в маленьком предисловии к этой лекции я постарался, придравшись к случаю, сказать несколько теплых слов благодарности в адрес американских коллег, так дружески <принимавших нашу четверку> у себя осенью 1967 (правда, не всех я смог помянуть). Пожалуйста, поглядите №8 нашего научно-популярного журнала «Природа» за 1968 год, у меня уже не осталось экземпляров, чтобы послать, и уведомите А.Стёртеванта (если он не знает) о <публикации> русского перевода его «воспоминаний» и о том, что я, конечно, посылал ему оттиски.

Я надеялся о многом <подробно> поговорить с Максом Дельбрюком¹⁹, который как раз сегодня должен прибыть в Москву и собирался побывать в нашем институте²⁰ и повидать меня. Однако случилось так, что я должен был уехать на Цейлон, и разминулся с ним.

В 1971 г. наше Всесоюзное Общество Генетиков и Селекционеров имени Вавилова собирается устроить национальный (Всесоюзный) съезд по генетике и селекции (1 после 1929 года!)²¹. Мы начинаем сейчас деятельно к тому готовиться. Мне приходится быть председателем Оргкомитета. Мы, конечно, очень хотели бы видеть у себя многих наших зарубежных коллег и, прежде всего, всех тех, кто так дружески принимал нас в 1967 году. Мы <хлопочем> о том, чтобы иметь возможность широко пригласить зарубежных гостей. Однако несколько наших предыдущих (менее xxxx широких) попыток натолкнулись на непреодолимые бюрократические трудности. Я не убежден, что этого не случится и в этот раз и мы [не] будем опять чувствовать себя без вины виноватыми. А так хотелось бы видеть всех уважаемых наших коллег у себя!

Не надо, вероятно, говорить, что это письмо носит доверительный <частный> характер.

Передайте, пожалуйста, мой большой привет Вашей жене.

Искренне Ваш

Б.Астауров

¹ Борис Львович Астауров (1904–1974), цитогенетик, эмбриолог-экспериментатор, член-корреспондент АН СССР (1958), академик АН СССР (1966). С 1966 по 1972 г. — президент Всесоюзного общества генетиков и селекционеров (ВОГиС) имени Н.И.Вавилова. Основные работы посвящены наследственности и развитию дрозофилы и тутового шелкопряда. Разработал метод искусственного партеногенеза и открыл способ получения полного межвидового андрогенеза, доказав определяющую роль клеточного ядра.

² APSL. B: L563 I. Michael (Isadore Michael) Lerner papers, ca. 1930s–1970s. Astaurov, Boris L. 1961–1973.

³ В письмах Лернеру из СССР отечественные корреспонденты обращались к нему «Многоуважаемый (или: дорогой) Михаил

Михайлович!»; иногда (видимо, из-за инициалов И.М.Лернер) встречается Иван (причем не только Иван, но и Дж.)

⁴ Слово «Евфеника» подчеркнуто двойной красной чертой, и над ним стоят два тоже красных восклицательных знака.

⁵ Первоначально — «Известия Бюро по евгенике»; «Известия Бюро по генетике и евгенике» — с 4-го номера, «Известия Бюро по генетике» — с 6-го номера; «Труды Лаборатории генетики» — с 9-го номера. Основателем и редактором «Известий» был Ю.А.Филиппенко.

⁶ «Русский евгенический журнал» выходил в 1922–1930 гг. Н.К.Кольцов был ответственным редактором.

⁷ Джошуа Ледерберг (Joshua Lederberg, 1925–2008) — американский генетик и биохимик. В 1947–1958 гг. работал в Висконсинском университете; с 1959 г. — в Стэнфордском, с 1962 г. — профессор Калифорнийского университета. Исследовал генетику микроорганизмов, в 1947 г. открыл механизм генетической рекомбинации у бактерий.

⁸ Лесли К.Данн (Leslie Clarence Dunn, 1893–1974) — американский генетик. В 1920–1928 гг. работал генетиком на экспериментальной станции в штате Коннектикут, в 1928–1962 гг. — профессор зоологии Колумбийского университета. Исследовал распределения генов в популяциях человека и млекопитающих, мутации у млекопитающих.

⁹ XIII Международный генетический конгресс прошел 20–29 августа 1973 г. в г.Беркли (США), XIV Международный генетический конгресс — 21–30 августа 1978 г. в Москве (СССР).

¹⁰ «В глубины живого», 1966 г., Леннаучфильм, режиссер М.М.Клигман, оператор Б.В.Лебедев.

¹¹ Эдвард Льюис (Edward V.Lewis, 1918–2004), американский генетик, лауреат Нобелевской премии по физиологии или медицине 1995 г. Исследовал генетику развития дрозофилы. Заложил основание современного понимания универсальных эволюционно закрепленных правил, контролирующих развитие животного.

¹² Б.Л.Астауров посетил И.М.Лернера и Калифорнийский университет в ходе визита группы советских генетиков в США в 1967 г.

¹³ IX международная эмбриологическая конференция проходила в Москве, в помещениях биолого-почвенного факультета МГУ, с 25 по 29 августа 1969 г.

¹⁴ Lerner I.M. Foreword // Medvedev Zh. A. The rise and fall of T.D.Lysenko. Translated by I.Michael Lerner, with the editorial assistance of Lucy G.Lawrence. N.Y., 1969. PV–IX.

¹⁵ В связи с выходом книги Ж.А.Медведева в США (Medvedev Zh. A. The Rise and Fall of T.D.Lysenko / Translated by I. Michael Lerner, with the editorial assistance of Lucy G.Lawrence. N.Y., 1969) он в 1969 г. был уволен из Института медицинской радиологии АМН СССР (Обнинск).

¹⁶ Б.Л.Астауров, видимо, имел в виду то, что Медведев решился на перевод и публикацию своей книги за рубежом.

¹⁷ Альфред Г.Стёртевант (Alfred Henry Sturtevant, 1891–1970), американский зоолог, генетик. В 1915–1928 гг. работал в Институте Карнеги (Вашингтон), в 1926–1962 гг. — профессор Калифорнийского технологического института (Пасадина, США). Открыл эффект позиции гена, провел анализ генетических «групп связи», выдвинул в 1913 г. гипотезу линейного расположения генов в хромосомах. Также показал, что ген для любой определенной черты находится в фиксированном положении в хромосоме.

¹⁸ Стёртевант А. Воспоминания о Томасе Генте Моргане // Природа. 1968. №8. С.91–97.

¹⁹ Макс Людвиг Хеннинг Дельбрюк (Max Ludwig Henning Delbrück, 1906–1981) — американский биофизик немецкого происхождения, лауреат Нобелевской премии по физиологии или медицине 1969 г.

²⁰ Институт биологии развития АН СССР.

²¹ Второй съезд Всесоюзного общества генетиков и селекционеров имени Н.И.Вавилова проходил в Москве с 31 января по 5 февраля 1972 г.; первый Всесоюзный съезд по генетике прошел с 10 по 16 января 1929 г. в Ленинграде.

Х.Ф.Кушнер¹ — И.М.Лернеру²

«3» января 1958 г.

№215

Дорогой коллега!

В октябре 1957 года при Институте генетики Академии наук СССР состоялась конференция по наследственности и изменчивости растений, животных и микроорганизмов³.

Тезисы докладов, заслушанных на конференции, посылаю в отдельном пакете.

Сердечный привет и наилучшие пожелания в Новом году!

Уважающий Вас,

Профессор *Кушнер* (Х.Ф.Кушнер)

Зав. лаб. генетики животных
Института генетики АН СССР
Москва, В-71

Б. Калужская, 33.

Москва, 11 апреля 1958 г.

Глубокоуважаемый профессор Лернер!

Большое спасибо Вам за оттиски Ваших весьма интересных работ. Недавно я Вам тоже послал некоторые свои и моих сотрудников оттиски.

А сейчас я обращаюсь к Вам с совсем другой просьбой. В Poultry Science том 29, №5, за 1950 год, на стр.769 имеется очень небольшая заметка Ваших земляков (и, вероятно, близких соседей) Лоренца, Кавуласа и Карсона относительно накопления Р³² в сперме петухов⁴. Но никаких более подробных публикаций этих авторов по данному вопросу мы больше не встречали.

Между тем одна моя сотрудница, И.Е.Новик (оттиск ее работы⁵ я Вам послал), как раз работает в этой области, и нам хотелось бы знать о работе Лоренца и др. более подробно.

Просьба моя к Вам заключается вот в чем: помогите мне получить оттиск более полной работы Лоренца и др., если это уже невозможно, то сообщите, пожалуйста, где об этом можно прочитать.

Заранее Вас благодарю.

Кушнер

С глубоким к Вам уважением,
(Х.Ф.Кушнер)

H.F.Kushner
Institute of Genetics of the Acad[emy]
of Sciences [of the] USSR
Lenin Prospect 33
Moscow USSR

Москва, 3-е июля 1958.

Дорогой профессор Лернер!

Большое Вам спасибо за сообщение о дальнейшей судьбе исследований Вашего земляка доктора Лоренца и его коллег в области применения <P>³² для изучения сперматогенеза у петухов и полового процесса у кур вообще. Отрадно, что этим вопросом интересуются сейчас многие ученые, так как загадок здесь еще немало.

Еще раз сердечное спасибо. Я тоже не теряю надежды увидеться с Вами на предстоящем генетическом конгрессе в Монреале⁶ (кстати, я до сих пор не получал уведомления, включен ли мой доклад в программу Конгресса⁷).

С искренним приветом,
Уважающий Вас *Кушнер*.

29/X-[19]58.

Глубокоуважаемый Михаил Михайлович!

Большое Вам спасибо за любезно присланную книгу «Генетические основы селекции»⁸. Читаю ее с большим удовольствием. Пользуюсь случаем послать Вам наше фото⁹ — в память о встрече на X конгрессе в Канаде.

С сердечным приветом,
Уважающий Вас *Кушнер*.

30/IV-[19]63.

Дорогой Михаил Михайлович!

Я благополучно вернулся на Родину и был, конечно, безмерно счастлив, найдя свою семью, родных и близких в полном здравии и благополучии. Сын меня сразу узнал, хотя он и изменился за это время очень сильно. Сразу же после возвращения я с головой окунулся в работу, которой за 6 месяцев накопилось очень много. Часто вспоминаю дни, проведенные в Калифорнии, и Ваше близкое расположение ко мне и помощь. Передавайте большой привет жене и сотрудникам Вашего департамента.

Погоды в Москве стоят переменчивые, как в мое пребывание в Беркли. Надеюсь, что сейчас погоды стоят у Вас лучше. Сейчас я собираюсь с семьей в отпуск на Черное море, где собираемся хорошо погулять и погреться на солнце.

Желаю всего хорошего,
Ваш <X.Кушнер>

¹ Хилия Файфелович Кушнер (1910–1975) — генетик, доктор биологических наук, с 1937 г. сотрудник Института генетики АН СССР.

² APSL. B. L563. Michael (Isadore Michael) Lerner papers, ca. 1930s–1970s. Kushner, H.F.

³ Конференция по наследственности и изменчивости растений, животных и микроорганизмов, посвященная 40-летию Великой Октябрьской социалистической революции, прошла 8–14 октября 1957 г. в Москве в Институте генетики АН СССР.

⁴ Abstracts of Papers Presented at the 39th Annual Meeting of the Poultry Science Association // Poultry Science. 1950. V.29. №5. P.769.

⁵ В архиве И.М.Лернера такого оттиска нет.

⁶ X Международный генетический конгресс проходил в Монреале (Канада) 20–27 августа 1958 г.

⁷ X.Ф.Кушнер значится в списке членов конгресса. См.: Members of the Congress // Proceedings of the X International Congress of Genetics. Toronto, 1959. P.519.

⁸ Lerner I.Michael. The Genetic Basis of Selection. Westport, 1958.

⁹ В архиве И.М.Лернера в Библиотеке Американского философского общества такой фотографии нет.

Д.К.Беляев¹ — И.М.Лернеру²

16.2.[19]66.

Профессор Дж.М.Лернер,
Калифорнийский университет,
Кафедра генетики
345 Малфорд Холл
Беркли 4, Калифорния,
США

Доктор Д.К.Беляев,
Институт цитологии и генетики
Сибирское отделение Академии наук
Новосибирск 90,
СССР

Дорогой проф[ессор] Лернер!

Спасибо за Ваше дружеское письмо от 12-го января 1966.

Я понимаю очень хорошо Ваше благоразумие в оценке перспектив Вашего визита в СССР; тем не менее, я надеюсь, что события будут развиваться благоприятно и сделают Вашу поездку возможной. Я полагаю, что если этот вопрос будет решен положительно в официальных инстанциях, то Ваш визит в Ленинград, Киев и Обнинск не представит каких-либо трудностей. Что касается Одессы, Крыма и Кавказа, трудно сказать что-либо определенное по этому вопросу теперь, хотя я надеюсь, что даже здесь удовлетворительное решение вероятно.

Выбор тем лекций для студентов нашего университета за Вами. Я думаю, что было бы очень интересно, если бы Вы прочитали несколько лекций по экологической генетике и по теории отбора. У наших студентов есть курс общей генетики и серия других интересных специальных предметов, и, таким образом, я полагаю, их общий уровень вполне достаточный. В нашем Институте есть несколько лабораторий, работа которых может представлять некоторый интерес для Вас. Мы могли [бы] устроить там несколько семинаров и обсуждений.

Вы, несомненно, понимаете, что официальное приглашение вне моей компетенции и является прерогативой нашей Академии. Но, чтобы не напрасно тратить время, которое медленно ползет в таких случаях, я попытаюсь поднять этот вопрос официальным путем.

Что касается моего здоровья, теперь оно в относительном порядке. Никакое хирургическое вмешательство до сих пор не потребовалось, но я обязан соблюдать режим.

Я желаю Вам всего самого наилучшего.

С сердечными поздравлениями,
D.Belyaev

Профессор Дж.М.Лернер,
Калифорнийский университет,
Кафедра генетики
345 Малфорд Холл
Беркли 4, Калифорния,
США

15.7.[19]66.

Доктор Д.К.Беляев,
Институт цитологии и генетики
Сибирское отделение Академии наук
Новосибирск 90,
СССР

Дорогой профессор Лернер,

Я надеюсь, что Вы извините меня за то, что я не поблагодарил Вас за Ваше любезное и подробное письмо и за книгу «Современные разработки в животноводстве»³, которые получены мной очень давно. На самом деле в настоящее время я должен довольно часто и иногда в течение долгого времени отсутствовать в Новосибирске. Это приводит к некоторым неудобствам, в частности к задержкам с ответами на письма.

Я очень сожалею, что Вы не можете приехать в СССР в 1966–[19]67 гг. Было бы очень хорошо встретить Вас здесь, и я надеюсь, что в будущем обстоятельства будут более благоприятными, так что у Вас будет возможность посетить нас. Еще раз, большое спасибо за книгу. Мне она очень нравится, и я полагаю, что читатель из любой страны найдет ее, несомненно, интересной. Я думаю, что особенно первые главы «Животноводства» и «Войны с голодом» очень полезны. Они учат генетика и селекционера учитывать важность своей работы с новой точки зрения. Мне было очень приятно обнаружить ссылки на мою работу с результатами отбора лис по особенностям поведения⁴. Эта работа продолжается, и некоторые новые результаты были получены. Как только статья будет опубликована, я пошлю Вам ее оттиски.



Д.К.Беляев со своими питомцами.

Что касается состояния моего здоровья. Теперь оно относительно хорошее, хотя я должен принять некоторые меры предосторожности.

С искренними поздравлениями и наилучшими пожеланиями,
Искренне Ваш,
D.Belyaev

24.II.[19]67.

Дорогой Михаил Михайлович!

Спасибо Вам большое за письмо. Теперь мы с Вами коллеги не только по науке, но и по состоянию наших желудков: мне тоже удалили 2/3 его, и я только что начинаю входить в нормальную жизнь после больницы. Будьте здоровы.

Крепко жму руку
Ваш Д.Беляев (Д.К.Беляев)

<1967>

Дорогой Михаил Михайлович!

Несколько дней назад получил Ваше письмо. Посылаю фотографии Сергея Сергеевича Четверикова — лучшие из того, что у меня есть. Я постепенно вхожу в норму и уже начал работать.

Передайте, пожалуйста, мои приветы Вашей супруге и всем Вашим коллегам.

Жму руку. С сердечным приветом
Д.Беляев

P.S. Я надеюсь, Вы не будете в претензии на то, что я пишу Вам по-русски. Мне это много легче, чем по-английски, а Вам, мне кажется, безразлично.

¹ Дмитрий Константинович Беляев (1917–1985) — генетик, академик АН СССР (1972). С 1959 по 1985 г. — директор Института цитологии и генетики Сибирского отделения АН СССР. Основные труды по генетике и селекции животных, по воздействию физических факторов и одомашнивания на их репродуктивную функцию.

² APSL. V. 1563. Michael (Isadore Michael) Lerner papers, ca. 1930s–1970s. Belyaev, Dmitri K.

³ Lerner IM, Donald HP. Modern Developments in Animal Breeding. L., 1966. (Русский перевод Лернер И.М., Дональд Х.П. Современные достижения в разведении животных / Сокр. пер. с англ. [и предисл.] Я.Л.Глембоцкого. М., 1970.)

⁴ На основе экспериментальных исследований селекции лисиц и других пушных зверей Д.К.Беляевым была создана концепция дестабилизирующего отбора. За эти многолетние исследования он был награжден премией АН СССР имени Н.И.Вавилова.

И.М.Лернер — Ю.М.Оленову¹

16 декабря 1966 г.

Профессор Ю.М.Оленов
Институт цитологии
Академии наук СССР
Проспект Маклина, 32
Ленинград, Ф-121
СССР

Уважаемый профессор Оленов!

Я нахожу довольно трудным ответить на Ваше письмо. Вообще говоря, есть два способа издания

перевода с русского здесь: а) через коммерческое издательство, или б) через некоторое финансируемое государством агентство. При взаимодействии с коммерческими издателями в подобной связи я обнаружил, что они очень неохотно занимают таким предпринимательством, в основном из-за отсутствия соглашений об авторском праве с СССР. Это означает, что другие издатели, неизвестные Вам или им, могут издать конкурирующие переводы, если книга имеет успех. Так как рынок вряд ли поддержит больше одного перевода, коммерческие риски для первоначального издателя были бы несоизмеримы с возможной прибылью. Следовательно, я подозреваю (но не знаю наверняка), что только исключительный перевод мог бы быть выполнен таким образом в США.

Второй путь состоит в том, чтобы убедить такое агентство, как Национальный научный фонд, обеспечить работу. С одной стороны, это означало бы, что никакого авторского гонорара не было бы, но с другой, это гарантировало бы высококачественный перевод. Они имеют необходимый опыт и находятся в контакте с опытными переводчиками. Если Вы примете решение следовать этим путем, я предлагаю Вам послать копию книги доктору Херману В.Льюису, директору Программы Генетической Биологии, Национального научного фонда, Вашингтон D.C., 20550. Я пишу ему сам сегодня и посылаю перевод объявления².

Ситуация с публикацией в Великобритании проще. Из-за ряда причин, включая более дешевые затраты и возможности долларовой прибыли (американские книги обычно слишком дороги для европейцев, чтобы давать много продаж), британские издатели намного больше идут на риск. Как Вы знаете, и у Дубинина, и Ж.А.Медведева были английские переводы их книг³. Я настоятельно рекомендовал бы Вам выяснить, каким процедурам они следовали. В обоих случаях Оливер и Бойд — издатели. Исполнительный директор, так случилось, мой друг (они издали одну из моих книг), и я буду рад написать им, если Вы пожелаете. Я подозреваю, однако, что инициатива нахождения переводчика в Великобритании должна будет лежать на Вас.

Относительно возможности моего редактирования перевода, хотя я взволнован от Вашего предложения, я сожалею, что не в состоянии это сделать. Мало того, что мое время отдано другим проектам в ближайшем будущем, но, что более значительно, я не чувствую себя достаточно компетентным в этой области, чтобы редактировать перевод. Кроме того, я фактически не знаю никого, кто был бы в состоянии взяться за задачу. Возможное исключение — одна из наших аспиранток, которая хочет сделать этот вид работы. Однако она только читает, а не говорит по-русски, и я не уверен, что она сможет соответствовать требованию того уровня знаний языка, которым Вы располагаете. Тем не менее, я буду рад поговорить

с нею, если издатель может быть найден. Возможно, если Вы напишете доктору Льюису, он сможет предложить Вам компетентного переводчика.

Как Вы сами указываете, никакие твердые решения невозможны до тех пор, пока компетентный читающий по-русски биолог не увидит книгу. Одна из имеющихся возможностей, конечно, профессор Г.Х.Биль из Института генетики животных в Эдинбургском университете (он перевел [книгу] Дубинина). Может быть, стоит написать ему в этой связи.

Я надеюсь, что я не создал впечатления того, как будто все это будет чрезмерно трудным. Я — твердый сторонник той точки зрения, что двухсторонний информационный обмен между США и СССР должен быть ускорен, и рад сделать все, что в моей власти, чтобы помочь этому. Если у Вас есть дальнейшие предложения о том, каким конкретным образом я мог бы быть полезным в данной ситуации, пожалуйста, напишите мне обратной почтой.

С наилучшими пожеланиями и поздравлениями с Рождеством и Новым годом,

Искренне Ваш
И.Майкл Лернер

10 февраля 1967 г.

Профессор Ю.М.Оленов
Институт цитологии
Академии наук СССР
Проспект Маклина, 32
Ленинград, Ф-121
СССР

Дорогой Юрий Михайлович:

Я очень доволен, что мог написать от Вашего имени в «Пергамон Пресс», чтобы привлечь их внимание к Вашей новой книге⁴. Я прилагаю копию своего письма в их Оксфордский главный офис и надеюсь, что что-то выйдет из моего предложения. Удачи!

Искренне Ваш
И.Майкл Лернер

¹ Юрий Михайлович Оленов (1910–1977), генетик, заведующий лабораторией в Институте цитологии АН СССР в 1957–1977 гг. Исследовал клеточную наследственность и ряд проблем эволюционной генетики.

² Имеется в виду бланк заказа на книгу: *Оленов Ю.М.* Клеточная наследственность, дифференцировка клеток и канцерогенез как проблемы эволюционной генетики. Л., 1967. Также И.М.Лернером была послана Х.Льюису машинописная копия данного письма.

³ *Dubinina N.P.* Problems of Radiation Genetics / Translated by G.H.Beale. Edinburgh, [1964] (перевод: *Дубинин Н.П.* Проблемы радиационной генетики. М., 1961); *Medvedev Zh.A.* Protein Biosynthesis and Problems of Heredity, Development, and Ageing / Translated by Ann Synge. N.Y., 1966 (перевод: *Медведев Ж.А.* Биосинтез белков и проблемы онтогенеза. М., 1963).

⁴ *Оленов Ю.М.* Клеточная наследственность, дифференцировка клеток и канцерогенез как проблемы эволюционной генетики. Л., 1967. Вместе с письмом в архиве Лернера хранится бланк заказа на книгу Ленинградского отделения издательства «Наука».

Н.В.Тимофеев-Рессовский¹ — И.М.Лернеру²**14 июля 1974 г.**

Дорогой Лернер,

Некоторое время назад я получил от Вас очень, очень ценную посылку — восемнадцать детективных романов, ни один из которых я не читал прежде. Для меня и моих друзей — профессора Блюменфельда³ и доктора Иванова⁴ — эти детективные романы обеспечат основу удовольствия и спокойствия в течение значительного промежутка приходящего времени. Большое спасибо!

Извините за задержку с моим ответом: за несколько дней до того, как я получил пакет от Вас, я заболел, и теперь я нахожусь в клинике, где я, вероятно, проведу целый июль и, может быть, первые дни августа (что-то не так с моей печенью).

Еще раз мое и моих друзей спасибо за Вашу доброту! Я желаю Вам хорошего здоровья и успешного развития Вашей работы, которая в пределах нашей группы уже становится классической.

С наилучшими пожеланиями и поздравлениями, искренне Ваш

Н.В.Тимофеев-Рессовский

(Н.В.Тимофеев-Рессовский)

¹ Николай Владимирович Тимофеев-Рессовский (1900–1981) — российский биолог, генетик, один из основоположников популяционной и радиационной генетики.

² APSL. B: L563. Michael (Isadore Michael) Lerner papers, ca. 1930s–1970s. Timofeeff-Ressovsky, N.W.

³ Лев Александрович Блюменфельд (1921–2002) — физик, основатель крупнейшей биофизической школы, участник Великой Отечественной войны, Работы в области современных проблем биофизики (решаемых и нерешаемых), а также применение электронного парамагнитного резонанса в химии.

⁴ Владимир Ильич Иванов (1932–2010) — генетик, академик РАН, директор Медико-генетического научного центра РАН (1990–2004). Работы в области микробиологии, радиобиологии, генетики, истории науки, биоэтики.

И.И.Шмальгаузен¹ — И.М.Лернеру²**30-IX-1931.**

Многоуважаемый коллега!

Только сегодня, после возвращения из длительной поездки, я <застал> Ваше письмо. Я охотно высылаю Вам те оттиски моих работ, которые у меня еще сохранились. Обращаю Ваше внимание в особенности на последнюю, т.к. метод наименьших квадратов дает возможность вычисления и средней ошибки полученных средних величин (среднее уклонение <отдельной> параболы). Метод применим в первую очередь для эмбрионального³ роста. В применении к постэмбриональному росту главное затруднение лежит в определении границ между отдельными периодами роста — в <этом всегда> будут элементы произвольности.



Н.В.Тимофеев-Рессовский с женой. 1966 г.

Может быть, для начала будет целесообразно сравнивать темп роста просто для первых трех месяцев роста цыпленка (это <попадает> во всяком случае в <пределы> первого периода постэмбрионального роста). Метод наименьших квадратов кропотлив, и для первой ориентировки я бы рекомендовал формулу $\kappa = \log v_1 - \log v / \log t_1 - \log t$ — определение по средним величинам (v) за одинаковые промежутки времени ($t_1 - t$) (неделя, пятидневка!).

Ваше задание и меня очень интересует, так как и моя работа была предпринята только для нахождения возможно <точного> индекса, характериз[ующего] рост (гл[авным] обр[азом] эмбриональный) для целей сравнения. Я был бы Вам очень признателен за информацию о результатах Ваших вычислений. Со своей стороны, я всегда готов помочь Вам советом. Лично я <подхожу> со своими методами к вопросу о факторах (не генетических) роста, обуславливающих величину тела, и имею уже кое-какие результаты — все это, если и не относится непосредственно к генетике, <но> все же касается ее достаточно близко.

С пожеланием всяческих успехов

<готовый> к услугам

И.Шмальгаузен

¹ Иван Иванович Шмальгаузен (1884–1963) — советский биолог. Всемирно известный теоретик эволюционного учения XX в.

² APSL. B: L563. Michael (Isadore Michael) Lerner papers, ca. 1930s–1970s. Schmalhausen, I.I.

³ Здесь и далее в письме подчеркнуто волнообразной линией И.И.Шмальгаузенем.

Новости науки

Физика

Сверхпроводящий вигглер с новой системой охлаждения

В Институте ядерной физики (ИЯФ) имени Г.И.Будкера СО РАН (Новосибирск) разработали и изготовили для Технологического института Карлсруэ (Германия) и ЦЕРНа (Швейцария) сверхпроводящий вигглер (от англ. wiggle — вихлять, изгибаться) — многополюсный магнит, который устанавливают в прямолинейные промежутки накопителей электронов для повышения интенсивности синхротронного излучения. ИЯФ практически стал мировым монополистом по созданию таких сложных устройств. При этом новосибирские физики и инженеры обеспечивают весь цикл его производства — от разработки до тестирования и сборки на месте. Сегодня по всему миру — от Австралии до Америки — работают свыше 20 вигглеров из ИЯФ. Но созданный недавно сверхпроводящий магнит отличается от существующих аналогов: в нем впервые использован криостат с косвенным охлаждением магнитной системы, обеспечивающий надежность, экономичность и простоту криогенного обслуживания.

Вигглеры формируют знакопеременное магнитное поле, которое искривляет поток электронов, заставляя их двигаться «змейкой». В качестве сверхпроводящего материала при его создании используют ниобий-титановый сплав, который при охлаждении до криогенных температур — около 4 К (–269°C) — переходит в сверхпроводящее состояние. За счет сверхпроводимости можно получать более высокие магнитные поля по сравнению с обычными магнитными системами, а значит, и более мощное синхротронное излучение, необходимое для исследований в области материаловедения, химии, биологии и других дисциплин.

Главная трудность при создании таких устройств заключается в системе охлаждения сверхпроводящих магнитов. Как правило, для получения и поддержания необходимой температуры их помещают в герметичные сосуды — криостаты с жидким гелием. Процесс этот весьма дорогостоящий. Кроме того, в случае каких-либо аномалий или поломок для извлечения магнита приходится демонтировать сосуд, разрезать его и только после этого проводить ремонтные работы.

В последней разработке задействован криостат нового типа, который не требует погружения магнита в жидкий гелий. Для охлаждения магнит соединили с криорефрижераторами системой тепловых контактов. Чтобы запустить процесс, нужно нажать соответствующую клавишу на пульте, и через несколько дней магнит, охладившись до нужной температуры, начнет работать в заданном режиме.

Сверхпроводящий вигглер с косвенным охлаждением магнитной системы уже установлен на источнике синхротронного излучения ANKA в Германии. Он обеспечивает яркие жесткие рентгеновские лучи для микроскопа MiQA, применяемого в материаловедении и биологии. Эти исследования позволят раскрыть потенциал устройства и учесть особенности его функционирования перед использованием в качестве одного из компонентов (затухательных колец) линейного коллайдера CLIC, создаваемого в ЦЕРНе. Подобных вигглеров в проектируемом ускорительном комплексе должно быть около сотни. Делать их по обычной схеме было бы ненадежно, а новая конструкция криостата обеспечит возможность быстрого доступа к элементам магнитной системы, позволит сократить время ремонтных работ и технического обслуживания. Кроме того, ЦЕРН планирует испытать в криостате другие варианты магнитных систем.

По материалам пресс-службы Института ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН

Космические исследования

Обнаружена одна из самых далеких нейтронных звезд в нашей Галактике

Группа исследователей из России, ЮАР, Финляндии и США, в число которых входят сотрудники Института космических исследований РАН и Московского физико-технического института, измерила расстояние до рентгеновского пульсара 2S 1553-542. Система находится примерно в 20 килопарсеках (кпк)* от Земли, на дальней окраине Галактики, предположительно в рукаве Стрельца, и состоит из быстровращающейся нейтронной звезды (скорость ее вращения вокруг собственной оси составляет около 9,3 с) и горячей звезды класса B1-2V, окруженной диском вращающегося вещества.

* 1 парсек (пк) — более 30 трлн км. — *Примеч. ред.*

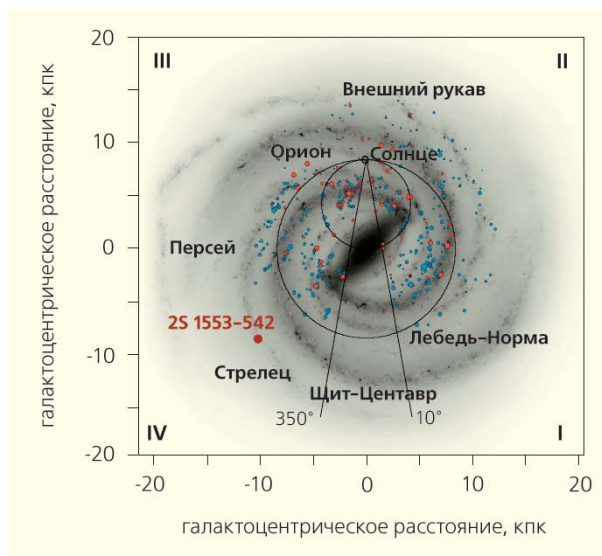
Исследования проводились с помощью рентгеновских космических обсерваторий «Chandra», «Swift», «Fermi» и «NuSTAR» (НАСА), наземного оптического Большого Южно-Африканского телескопа SALT (Southern African Large Telescope), расположенного в 370 км к северо-востоку от Кейптауна (ЮАР), и инфракрасного обзора неба VVV (VISTA Variables in the Via Lactea), выполняемого телескопом VISTA Европейской южной обсерватории (ESO) в Чили. Результаты исследований опубликованы в журнале «Monthly Notes of Royal Astronomical Society»*.

Рентгеновский источник 2S 1553-542 известен с 1975 г. За 40 лет наблюдений он лишь трижды вспыхивал на небе на непродолжительное время. Вообще, если яркость такого объекта резко растет, это означает, что нейтронная звезда в какой-то момент времени аккрецирует больше вещества со звезды-компаньона. И хотя самой звезды-компаньона до последнего времени обнаружить не удалось, на основании особенностей вспышечного поведения ее предварительно классифицировали как оптическую звезду класса Ве. Последняя вспышка произошла в начале 2015 г., за ней в режиме мониторинга наблюдали с помощью обсерваторий «Fermi» и «Swift», работающих в жестком рентгеновском диапазоне энергий. Одновременно, по заявкам российских ученых, были проведены высокоточные наблюдения с помощью рентгеновских обсерваторий «Chandra» и «NuSTAR».

Благодаря полученным данным удалось впервые измерить величину магнитного поля нейтронной звезды ($3 \cdot 10^{12}$ Гаусс) и определить темп ускорения ее вращения, а по особенностям рентгеновского излучения — оценить расстояние до системы в 20 ± 4 кпк (т.е. она расположена практически на противоположном краю Галактики).

Кроме того, наблюдения с помощью обсерватории «Chandra» позволили впервые точно определить координаты источника. Они стали предпосылкой ко второму этапу исследований — к поиску оптической звезды-компаньона пульсара в двойной системе и независимо определению расстояния до нее. Чтобы найти звезду-компаньон, к рентгеновским данным подключили инициированные российскими учеными и их южноафриканскими коллегами оптические наблюдения этого участка неба с помощью телескопа SALT и данные VVV — обзора неба в инфракрасном диапазоне длин волн. Первый результат оказался неожиданным: в непосредственной близости от рентгеновского источника удалось обнаружить сразу пять звезд, при этом некоторые из них не регистрировались в оптике, а другие, наоборот, — в инфракрасных лучах.

* *Tsygankov S., Lutovinov A., Krivonos R. et al. NuSTAR discovery of a cyclotron absorption line in the transient X-ray pulsar 2S 1553-542 // MNRAS. 2016. V.457. P.258–266; Lutovinov A., Buckley D., Townsend L. et al. 2S 1553-542: a Be/X-ray binary pulsar on the far side of the Galaxy // MNRAS. 2016. V.462. P.3823–3829.*



Предполагаемое расположение двойной системы в рукаве Стрельца. Карта Галактики из работы Urquhart J.S. et al. (MNRAS. 2016. V.437. P.1971).

Дальнейший тщательный анализ показал, что спектр одной из звезд очень похож на спектры уже известных бело-голубых звезд класса Ве. Более того, как выяснилось, эту звезду окружает диск из быстровращающегося вещества, характерного для таких объектов. Именно она и оказалась компаньоном рентгеновского пульсара 2S 1553-542. Интересно отметить и другое: звезду не видно на оптических картах, полученных с помощью телескопа SALT, но она прекрасно регистрируется в инфракрасных лучах. Причина в том, что звезда находится на достаточно большом расстоянии, и ее оптическое излучение практически полностью поглощается межзвездным газом и пылью. В ходе сравнения с подобными объектами удалось точнее определить класс звезды — B1-2V, а это в свою очередь позволило независимо оценить расстояние до двойной системы — более 15 кпк. Полученный результат прекрасно согласуется с рентгеновскими наблюдениями — 20 кпк. На основании проведенного анализа был сделан вывод: двойная система 2S 1553-542 расположена на противоположном краю Млечного пути, как минимум в рукаве Щита-Центавра, а скорее всего дальше — в рукаве Стрельца.

Таким образом, ученым удалось установить самую далекую из известных на сегодняшний день нейтронных звезд в нашей Галактике. Более того, комплексное исследование с использованием данных в разных областях электромагнитного спектра, а также примененные методы и подходы открывают новые возможности для поиска и изучения далеких объектов Галактики.

© **Лутовинов А.А.**,

доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН
Москва

Диффузионный спектрометр аэрозоля: особенности и применение

Как показывают результаты исследований научных коллективов России, Австрии, Германии, США, Финляндии и многих других стран, в городах с высоким содержанием в воздухе аэрозоля (особенно в виде наночастиц) отмечается повышенный уровень заболеваний дыхательной и сердечно-сосудистой систем, а также злокачественных образований. Эти статистические данные актуализировали вопросы, связанные с поиском источников наноаэрозолей в городах, изучением механизмов их образования и влиянием на здоровье человека.

В чем опасность наноаэрозоля? В чрезвычайно простом проникновении частиц размером до 200 нм в альвеолярные участки легких, а отсюда — непосредственно в кровь. При этом скорость их попадания в кровотока эквивалентна инъекционному введению лекарственных средств. Такие частицы могут продуцировать автомобили, ТЭЦ, промышленные объекты и даже копировальные устройства, установленные в современных офисах. Важно отметить, что наночастицы не видны невооруженным глазом, поэтому для мониторинга их содержания и оценки потенциальной опасности необходимо соответствующее оборудование. В Институте химической кинетики и горения имени В.В.Воеводского СО РАН созданы по идеям А.Н.Анкилова и сотрудников его группы диффузионный спектрометр аэрозоля (ДСА), который способен в течение одной минуты измерить концентрацию и размер аэрозольных частиц в диапазоне от 3 до 200 нм.

Прибор, внесенный в российский Государственный реестр средств измерения, состоит из трех основных функциональных блоков: диффу-

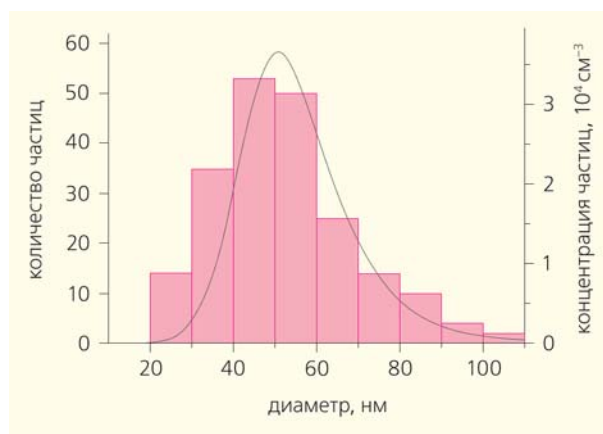
зионной батареи, конденсационного укрупнителя аэрозольных частиц и оптического счетчика. В диффузионной батарее в качестве пористой среды используется набор сеток, установленный перпендикулярно двухфазному потоку газа с частицами. Прошедшие «фильтр» частицы направляются в конденсационную камеру, где укрупняются до оптически регистрируемого размера. Далее в работу вступает оптический счетчик, измеряющий концентрацию аэрозоля. Для этих процессов разработана математическая модель и компьютерный код осаждения наночастиц, что позволяет восстанавливать их распределение по размерам. Управление прибором, обработка, отображение и хранение данных измерения выполняются с помощью персонального компьютера.

ДСА применяют для решения широкого круга задач в области физики и химии аэродисперсных систем, охраны окружающей среды, медицины, а также для контроля технологических сред и чистоты рабочих помещений. Причем прибор можно использовать как в лабораторных, так и в полевых условиях. И это отличает его от электронной микроскопии, которую применяют для определения размеров и концентрации аэрозольных наночастиц только в лабораторных исследованиях.

Сравнение спектрометра с современными западными аналогами показало, что по техническим характеристикам (измеряемому диаметру частиц, диапазону их концентрации и времени одного измерения) он не уступает, а зачастую превосходит (на полтора порядка по нижнему пределу концентрации) характеристики лучших зарубежных образцов, в частности компаний «TSI Inc.» (США) или «Grimm-Aerosols» (Германия). В отличие от аэрозольных спектрометров названных марок, ДСА не содержит радиоактивных источников, ртути и иных опасных или высокотоксичных материалов.



Общий вид диффузионного спектрометра аэрозоля.



Сравнение распределений наночастиц, полученных с помощью спектрометра (за 4 мин), с гистограммой (обозначена красным цветом), полученной путем обработки электронно-микроскопических снимков (за 16 ч).

Прибор успешно используют научные и коммерческие организации Новосибирска, Москвы, Томска, Барнаула, Омска и Улан-Удэ. Недавно сотрудник Государственного океанографического института имени Н.Н.Зубова (Москва) А.А.Палей и его коллеги провели работу по оценке уровня концентрации аэрозольных частиц вблизи высоковольтных линий электропередачи и сделали вывод, что ЛЭП, идущие вдоль оживленных автомагистралей, — потенциальные источники высокотоксичного аэрозоля*. Во время возникновения коронного разряда на поверхности провода лавинообразно увеличивается число электронов и ионов, которые взаимодействуют с газовыми примесями в атмосфере, что и приводит к образованию аэрозольных наночастиц, выявленных с помощью нашего спектрометра.

Сотрудники Института химической кинетики и горения имени В.В.Воеводского СО РАН исследовали образование аэрозоля в угольных шахтах Кузбасса**. При работе выемочного комбайна его фреза раскаляется докрасна. В точке соприкосновения с ней порода, сильно нагреваясь, начинает выделять органические соединения, содержащиеся в каменном угле, которые затем конденсируются с образованием аэрозольных частиц. С помощью диффузионного спектрометра были измерены размер и концентрация этих частиц. Большая их часть (90%) — нанометрового размера (менее 200 нм). Лабораторные эксперименты показали, что их скопление столь же опасно, как и концентрация метана. Сейчас специалисты разрабатывают для угледобывающих компаний практические рекомендации по обеспечению безопасности и сохранению здоровья работников шахт.

© **Валиулин С.В., Дубцов С.Н.**,
кандидаты химических наук

Институт химической кинетики и горения имени
В.В.Воеводского СО РАН
г.Новосибирск

Археология

«Боспорские ворота» на Узунларском валу

Узунларский (Аккосов, Киммерейский, Турецкий) вал — вероятно, древнейшее и наиболее впечатляющее земляное погранично-оборонительное сооружение на юге России, которое ого-

* *Васильева М.А., Дубцов С.Н., Жохов Н.В. и др.* Оценка уровня концентрации аэрозольных частиц у автомобильной дороги и ЛЭП в сравнении с фоновыми показателями субмикронных частиц естественной атмосферы // Труды главной геофизической обсерватории имени А.И.Воейкова. 2016. №580. С.99–109.

** *Валиулин С.В., Бакланов А.М., Дубцов С.Н. и др.* Влияние наноаэрозольной фракции техногенной угольной пыли на горение метановоздушных смесей // Физика горения и взрыва. 2016. Вып.4. С.36–50.



Основание античной каменной башни.

раживает восточную часть Керченского полуострова и простирается примерно на 32–33 км с севера на юг от Азовского до Черного моря. Более двух столетий ученые изучали памятник, однако вопрос о времени его возведения до сих пор окончательно не решен. Археологи полагают, что этот вал соорудили на рубеже IV–III вв. до н.э., а затем в середине I в. до н.э., во времена правления Боспорского царя Асандра, дополнительно усилили сторожевыми башнями, о чем известно по сообщениям античного географа и историка Страбона. Тогда вал мог служить границей между основанным древними греками Боспорским царством со столицей в Пантикапее (Керчь) и скифами — хозяевами основной части Крыма. Эти положения в начале 2000-х годов были отчасти подтверждены исследованиями Института археологии РАН***.

В этом году сотрудники экспедиции отдела сохранения археологического наследия института под руководством автора при участии представителей Восточно-Крымского историко-культурного музея-заповедника вновь развернули масштабные работы на Узунларском валу в районе с.Горностаевки — в месте, где к востоку от линии вала находится грандиозный курган, рядом с которым в ближайшее время пройдет магистральный газопровод «Краснодарский край—Крым».

В первый же месяц работы экспедиция обнаружила на вершине кургана античную каменную башню хорошей сохранности. К востоку от нее располагался хозяйственный двор с ямами, к западу (за валом) — большой оборонительный ров шириной и глубиной до нескольких метров. На одном из его участков открыты остатки грандиозного архитектурного сооружения — «Боспорских ворот», которые оформляли с обеих сторон древний проезд через линии рва и вала.

*** *Масленников А.А.* Древние земляные погранично-оборонительные сооружения Восточного Крыма. Тула, 2003.



Остатки «Боспорских ворот» (внизу — вид сверху).

Фото автора, Н.Ю.Требухина и К.М.Морозова

Ширина исследованных кладок, состоящих из обработанных известковых блоков, достигла 3 м при пятиметровой высоте. Выявленная конструкция уникальна для сельской фортификации Боспора. По масштабам она превосходит все известные в Северном Причерноморье сооружения подобного рода.

Обнаруженное под курганной насыпью погребение внутри кольцевой каменной конструкции, увы, оказалось разграбленным — в нем находились только разрозненные кости и фрагменты лепных сосудов. Однако среди нескольких других погребений, впущенных в линию рва, выявлена женская могила античного времени, содержащая древние кувшин и тарелку, бронзовое зеркало, бусы и серьги.

В ходе раскопок собрана внушительная коллекция артефактов, которые в настоящий момент находятся в обработке, а позднее пополняют собрание Восточно-Крымского историко-культурного музея-заповедника. Научный анализ найденных предметов позволит уточнить время сооружения Узунларского вала и раскрыть одну из удивительных загадок в истории Восточного Крыма.

© Супренков А.А.

Институт археологии РАН
г.Москва

Физика

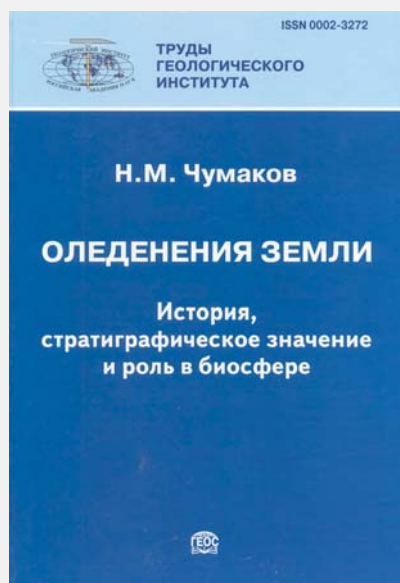
А.А.Балакин, Г.М.Фрайман. ОСНОВЫ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН. ДИНАМИКА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ. Нижний Новгород: ФИЦ «Институт прикладной физики РАН», 2016. 232 с.

В книге представлен курс лекций по теории колебаний и волн, который авторы читают более 30 лет студентам факультета «Высшая школа общей и прикладной физики» Нижегородского государственного университета (базового факультета Института прикладной физики РАН). Данный курс — один из основных в рамках базового образования для студентов-физиков, так как огромное многообразие физических явлений описывается схожими, а зачастую и одинаковыми математическими моделями. Умение выполнять качественный анализ таких явлений без трудоемкого точного решения сложных уравнений позволяет предсказать долговременную динамику интерпретируемой физической системы. Основной акцент в лекциях сделан на нелинейных колебаниях и волнах. Представленный материал можно условно разбить на две части: теорию колебаний в сосредоточенных системах (главы 1–6) и теорию колебаний и волн в распределенных системах (главы 7–14). В каждой части изложение построено от простого (линейные системы) к сложному (нелинейные системы). Пособие содержит довольно много современного материала из активно развивающихся нелинейной оптики и физики плазмы, в частности из задач генерации гармоник и компрессии лазерных импульсов. В поддержку лекционного курса приведено большое количество задач с решениями для развития навыков работы с нелинейными системами.



Геология. Палеогляциogeология

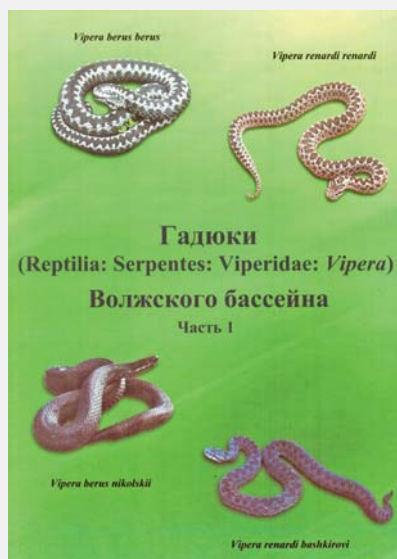
Н.М.Чумаков. ОЛЕДЕНЕНИЯ ЗЕМЛИ: ИСТОРИЯ, СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ И РОЛЬ В БИОСФЕРЕ. М.: ГЕОС, 2015. 160 с. (Труды Геологического института РАН. Вып.611)



Монография посвящена доплейстоценовым оледенениям Земли. Установлены пять гляциоэры: позднearerхейская каапвальская (2950–2900 млн лет назад), раннепротерозойская гуронская (2400–2200 млн), неопротерозойская африканская (750–540 млн), палеозойская гондванская (450–260 млн) и незавершенная антарктическая, начавшаяся 34 млн лет назад. В каждой эре было от трех до шести дискретных ледниковых периодов, которые, в свою очередь, распадались на ледниковые эпохи и более мелкие ледниковые эпизоды, связанные с вариациями земной орбиты, наклона оси и прецессии. Сходство между гляциоэрами проявляется как в длительности и иерархической структуре, так и в их динамике. Гляциоэры начинались с кратковременных региональных оледенений, которые, увеличиваясь в масштабах и интенсивности, достигали максимальных межконтинентальных масштабов во второй их половине, а затем быстро деградировали. Между докембрийскими и фанерозойскими оледенениями есть различия. Отдельные докембрийские оледенения имели существенно более широкое распространение. С оледенениями связаны противоположные по знаку аномалии $d^{13}C_{карб}$ (отрицательные в докембрии и положительные в фанерозое). Многие неопротерозойские оледенения завершались отложениями характерных пачек венчающих карбонатов. Главную роль в возникновении крупных климатических колебаний играли, судя по всему, геодинамические процессы и характер вулканизма.

Зоология

Бакиев А.Г., Гаранин В.И., Гелашвили Д.Б., Горелов Р.А., Доронин И.В., Зайцева О.В., Зиненко А.И., Клёнина А.А., Макарова Т.Н., Маленёв А.Л., Павлов А.В., Петрова И.В., Ратников В.Ю., Старков В.Г., Ширяева И.В., Юсупов Р.Х., Яковлева Т.И. Гадюки (Reptilia: Serpentes: Viperida: Vipera) Волжского бассейна. Часть 1. Тольятти: Кассандра, 2015. 234 с.



В этой коллективной монографии дан обзор литературных и оригинальных сведений о гадюковых змеях рода *Vipera*, обитающих в речном бассейне Волги, площадь которого оценивается в 1360 тыс. км².

Книга состоит из пяти глав. Первая знакомит читателей с историей изучения фауны гадюк региона, а вторая — с историей ее формирования. Третья глава представляет собой очерки о двух видах: гадюки обыкновенной (*V.berus*), ее подвида — гадюки Никольского (*V.b.nikolskii*) — и восточной степной (*V.renardi*). В очерках сведены всевозможные данные об этих рептилиях: морфологии, систематике, распространении, стадиях и обилии, сезонной и суточной активности, размножении, линьке, продолжительности жизни и питании. Четвертая глава посвящена системе крови, пятая — токсинологической характеристике ядовитого секрета этих змей. Особенно интересна попытка авторов совместить палеонтологические и молекулярно-генетические данные при построении сценариев эволюции гадюк, слабо разработанной области отечественной герпетологии. Издание хорошо иллюстрировано: оно включает 94 разноплановых рисунка. В их число входят портреты исследователей животного мира (от Лепехина и Палласа до недавно ушедших из жизни герпетологов), карты ареалов, фотографии самих гадюк и их биотопов, микрофотографии клеток крови змей, электрофореграмма образцов ядовитого секрета и многое другое.

Зоология

Храбрый В. Птицы Петербурга: Иллюстрированный справочник. СПб.: ООО Торгово-издательский дом «Амфора», 2015. 463 с.

Изучение птиц, населяющих города в России, имеет более чем 200-летнюю историю. Уже в начале 18 столетия появляются первые публикации с описанием животного мира, в том числе и орнитофауны, Москвы, Санкт-Петербурга, Казани. Эти сведения носили, в основном, фрагментарный характер.

Данная книга представляет собой справочное издание о птицах, зарегистрированных в современных административных границах Санкт-Петербурга за всю историю наблюдений (266 видов). Приводятся данные о птицах, гнездящихся на территории города, а также о тех, которые встречаются в Санкт-Петербурге во время сезонных миграций. В книге даются сведения о местах города, особо интересных в орнитологическом отношении. Издание обильно иллюстрировано цветными фотографиями, представленными замечательными фотографами-анималистами, а также членами Санкт-Петербургского общества фотоохотников.

Книга может служить прекрасным справочным пособием для биологов, экологов и специалистов в области охраны природы, а также для всех любителей природы. Эта работа продолжает исследования автора, под редакцией которого в 2012 году вышла коллективная монография «Птицы городов России».



А.П.Протогенов. ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ПОРЯДОК В ЭНИОННЫХ ЖИДКОСТЯХ. Нижний Новгород: ФИЦ «Институт прикладной физики РАН», 2016. 188 с.

Основное содержание книги — теория топологически упорядоченных фазовых состояний в квантовых спиновых и зарядовых жидкостях. При сверхнизкой температуре в сверхсильном (более 10 Тл) поперечном магнитном поле электронный газ приобретает свойства несжимаемой жидкости, в которой возникают квантовые вихревые возбуждения — квазичастицы энионы с дробным электрическим зарядом. В книге рассмотрены физические модели, которые объединяет существование в них фазовых состояний с топологическим порядком. На перечень обсуждаемых автором проблем в значительной степени повлияло современное состояние в интенсивно развивающейся области исследований — низкоразмерные сильно коррелированные электронные системы. Одна из целей исследований связана с разработкой детальных принципов квантовых вычислений, которые были бы устойчивы к декогерентности и лишены систематических ошибок благодаря использованию квазичастиц с топологическими особенностями фазы их состояний. Топологическая защищенность таких электронных состояний обеспечивает защиту от воздействий, приводящих к сбою фазы волновой функции системы квазичастиц. Полное описание проблем теории энионов в настоящее время основывается на теории тензорных категорий.

Книгу можно условно разбить на две части. Первая часть, до шестой главы, содержит изложение основных точно решаемых низкоразмерных квантовых моделей. В первой главе разбираются фундаментальные аспекты фазовых переходов и иллюстрирующий их пример точно решаемой модели Изинга в поперечном магнитном поле. Во второй и третьей главах основное внимание сосредоточено на моделях Китаева торического кода и анизотропно взаимодействующих спинов на гексагональной решетке. Анализу модели Вэна под тем же углом зрения посвящена четвертая глава. Теория топологических диэлектриков составляет содержание пятой главы. Во второй части книги (две заключительные главы) использованы точные результаты из первых глав. Изложена теория энионов на решетке и в непрерывном пределе. Подробно описана структура гамильтонианов и пространств квантовых состояний. Даны основные результаты теории сильно взаимодействующих энионных мод. В приложения вынесены частные, но важные вопросы, связанные с алгебраическими свойствами технических средств, использованных при описании динамики энионов.



Информация для авторов

Журнал «Природа» публикует работы по всем разделам естествознания: результаты оригинальных экспериментальных исследований; проблемные и обзорные статьи; научные сообщения и краткие рефераты наиболее примечательных статей из научных журналов мира; рецензии; персоналии; материалы и документы по истории естественных наук. Авторами могут быть специалисты, работающие в том направлении, тема которого раскрывается в статье. Суть проблемы необходимо излагать ясно и просто, избегая узкопрофессиональных терминов и математически сложных выражений. Статьи рецензируются и проходят редакционную подготовку.

Допустимый объем статьи — до 30 тыс. знаков (с пробелами). В редакцию материалы можно

прислать по электронной почте. Текст статьи, аннотация (на русском и английском языках), таблицы, список литературы и подписи к иллюстрациям оформляются одним файлом в формате doc, txt или rtf. Иллюстрации предоставляются отдельными файлами. Принимаются векторные и растровые изображения в форматах EPS или TIFF (без LZW-компрессии). Цветные и полутоновые изображения должны иметь разрешение не ниже 300 dpi, черно-белые (Bitmap) — не менее 800 dpi. Векторные изображения должны быть выполнены в программе CorelDRAW или Adobe Illustrator.

Поступление статьи в редакцию подтверждает полное согласие автора с правилами журнала. См.: www.ras.ru/publishing/nature.aspx; www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/

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
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 20.10.2016

Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная. Офсетная печать

Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2

Тираж 301 экз.

Заказ 793

Цена свободная

Отпечатано ФГУП «Издательство «Наука»,

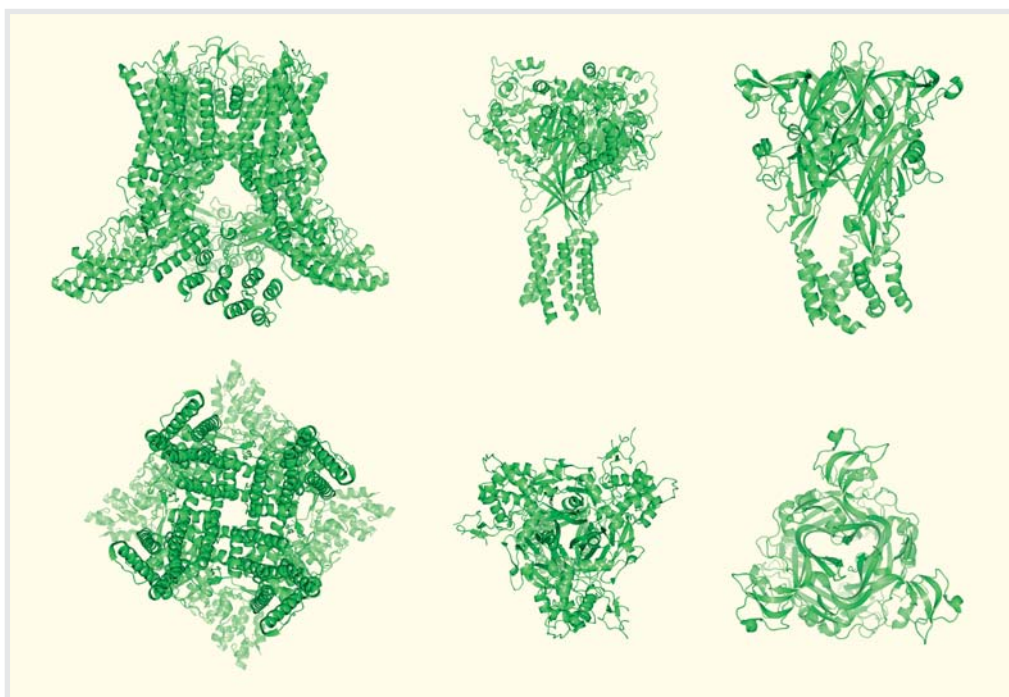
(типография «Наука»)

121099, Москва, Шубинский пер., 6

www.ras.ru/publishing/nature.aspx

При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.

в следующем номере



Хотя боль часто связана со страданием, не стоит забывать, что она предупреждает нас об опасности — сигнализирует о нарушениях в организме. Однако бывает и так, что реального повода нет, а человек испытывает аномально интенсивную и нередко хроническую боль.

В настоящее время для обезболивания применяется множество лекарственных препаратов различных фармакологических групп: нестероидные противовоспалительные и спазмолитические средства, наркотические анальгетики (морфин и другие опиоиды), а также антиконвульсанты и антидепрессанты. Однако некоторые типы болевых состояний (например, невралгии) почти нечувствительны к этим препаратам, которые к тому же вызывают нежелательные побочные эффекты.

Поиск новых средств, специфично действующих на молекулярные механизмы генерации боли с минимальными побочными эффектами, привел ученых к открытию полипептидов направленного действия, «выключающих» определенные рецепторы и ионные каналы, участвующие в процессах болевой чувствительности. Найдены эти пептиды в ядах различных животных — пауков, морских анемонов и др.

Андреев Я.А., Логашина Ю.А., Лубова К.И., Василевский А.А., Козлов С.А.
БОЛЬ, ВОСПАЛЕНИЕ И ДРУГИЕ НЕПРИЯТНОСТИ: ОБРАТНАЯ СТОРОНА ОЩУЩЕНИЙ

