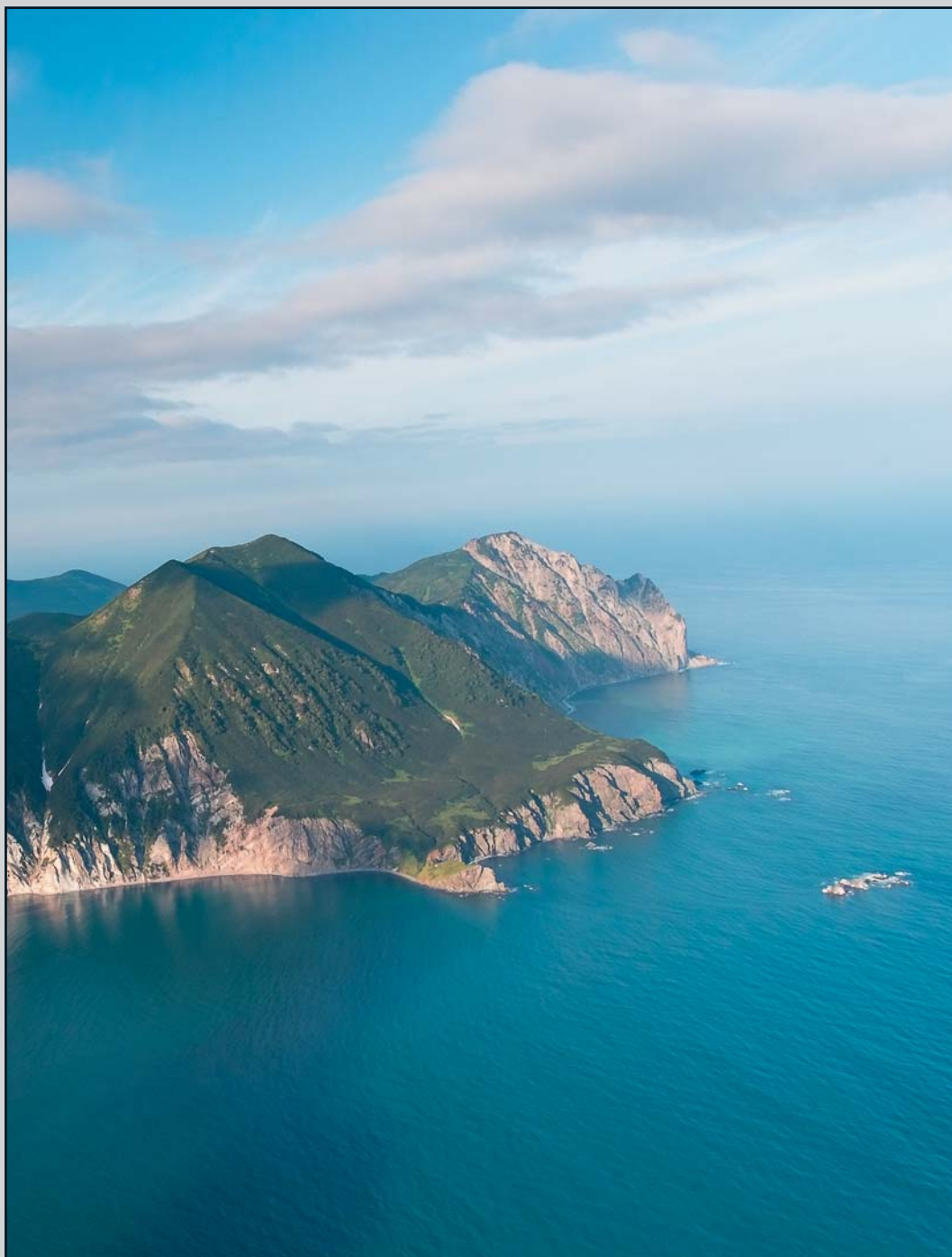


ПРИРОДА

6 14



В НОМЕРЕ:**3 Маров М.Я., Шевченко И.И.****Экзопланеты**

Число открытых экзопланет за последние годы растет лавинообразно и уже приближается к двум тысячам. Среди них есть и гиганты, подобные Юпитеру, и планеты, схожие с Землей. Среди последних особое внимание приковано к тем, которые попадают в потенциальную «зону жизни».

16 Гоглева А.А., Артамонова И.И.**CRISPR-системы: структура и гипотетические функции**

Чтобы выжить, прокариоты должны размножаться как можно быстрее. Казалось бы, избыточность генетического материала для них непозволительна, так как основные ограничения на скорость деления накладывает размер генома, однако недавно в нем обнаружены загадочные структуры — CRISPR. Зачем они нужны прокариотической клетке?

22 Борисов Б.А., Дьяков Ю.Т.**Как паразиты манипулируют своими хозяевами**

Изучение паразитов из самых разных таксономических групп показало, что многие из них обладают порой некой «разумностью», т.е. способностью в собственных интересах управлять поведением своих хозяев. Сегодня таких примеров накопилось достаточно много.

32 Пинегина Т.К.**Колебания уровня моря в голоцене: взгляд с Камчатки**

Изменения уровня океана на любом побережье мира — результат наложения глобальных колебаний уровня (связанных с оледенениями и межледниковьями) и локальных тектонических движений.

38 Андреева И.В.**Паратуризм в заповедниках России**

В последние годы природный туризм становится все более популярным среди инвалидов. Но людям с ограниченными возможностями требуются специальные маршруты. Для их разработки паратуристы-волонтеры организовали несколько тестовых походов в сибирских заповедниках. В статье приведены результаты этих походов, описаны конкретные маршруты и показаны перспективы развития паратуризма в России.

48 Кренке А.Н., Кренке Н.А.**О славянской колонизации Подмосковья**

Кто жил на Москве-реке в XII в.? Кто создал найденные в подмосковных курганах украшения (перстни, семилопастные височные кольца и др.)? Для ответа на эти вопросы проведен сравнительный анализ материальной культуры и пространственного расположения памятников XII—XIII вв. с использованием геоинформационных технологий.

53 Наугольных С.В.**Палеонтологические музейные коллоквиумы**

Новая форма взаимодействия науки и музеев

58 Сафарова С.А.**Спорово-пыльцевой анализ: история становления****63 ВСПОМИНАЯ Я.Б.**

К 100-летию академика Зельдовича

Герштейн С.С.**Человек универсальных результатов (65)****Халатников И.М.****Человек осведомленный (68)****Комберг Б.В.****Наставник молодежи (74)****Бисноватый-Коган Г.С.****Гамма-мониторинг космоса (80)****85 Ильяшенко Ю.С.****Лауреат премии Абея 2014 г. — Я.Г.Синай****Рецензии****90 Фандо Р.А.****Поиски потомков Великого монгола (на кн.: И.А.Захаров-Гезехус. По следам Чингиз-хана. Генетик в центре Азии)****92****Новые книги****В конце номера****94 Кузнецов В.Г.****Нептунизм и плутонизм — истоки учений**

CONTENTS:**3 Marov M.Ya., Shevchenko I.I.**
Exoplanets

The number of discovered exoplanets has been growing exponentially in recent years and now approaches two thousand. Among them there are Jupiter-like giants and planets resembling the Earth. The special attention among the latter is paid to those which are situated in potential «life zone».

16 Gogleva A.A., Artamonova I.I.
CRISPR-systems: Structure and Hypothetical Functions

In order to survive prokaryotes need to reproduce as fast as possible. It seems that an excess of genetic material is unaffordable for them, since the main restrictions on the rate of cell division are imposed by the genome size. But recently some mysterious structures have been discovered in prokaryotic genomes: CRISPR. What are they needed for?

22 Borisov B.A., D'yakov Yu.T.
How Parasites Manipulate Their Hosts

Studies of parasites from very different taxonomic groups showed that many of them sometimes possess some «intelligence», that is an ability to control the behavior of their hosts to their own advantage. Today lots of examples of this ability are known.

32 Pinegina T.K.
Oscillations of Ocean Level in Holocene: A Look from Kamchatka

Oscillations of the ocean level at every coastal region of the Earth is the result of superposition of the global ocean level oscillations (associated with glaciations and interglacial intervals) and of local tectonic movements.

38 Andreeva I.V.
Paratourism in Russian Natural Reserves

Recently tourism in natural landscapes became increasingly popular among invalids. But people with limited abilities need special tracks. To develop these volunteer paratourists have organized several test hikes in Siberian natural reserves. The article presents the results of these hikes. Specific tracks are described and perspectives of development of paratourism in Russia are shown.

48 Krenke A.N., Krenke N.A.
On Slavic Colonization of Moscow Region

Who lived on the shores of Moscow River in 12 century? Who created ornaments found in burial mounds in Moscow region (finger-rings, seven-lacinate temporal rings and so on)? To answer this questions a comparative analysis of material culture and spatial distribution of archaeological sites dated 12–13 centuries was performed. Modern computer technology using geoinformational systems turned helpful in this task.

53 Naugolnykh S.V.
Paleontological Museum Colloquia
A New Form of Interaction between Science and Museums**58 Safarova S.A.**
Spore-pollen Analysis: History of Formation**63 REMEMBERING YA.B.**
To Centenary of Academician Zeldovich**Gershtein S.S.**
A Man of Universal Results (65)**Khalatnikov I.M.**
A Knowledgeable Man (68)**Komberg B.V.**
Mentor of Young People (74)**Bisnovatyi-Kogan G.S.**
Gamma-monitoring of Universe (80)**85 Il'yashenko Yu.S.**
The Abel Prize Laureate 2014 – Ya.G.Sinai**Book Reviews****90 Fando R.A.**
Search for Descendants of the Great Mongol
(on book: I.A.Zakharov-Gezekhus. In the footsteps of Genghis Khan. Geneticist in the center of Asia)**92** **New Books****End of the Issue****94 Kuznetsov V.G.**
Neptunism and Plutonism – Origins Exercises

Экзопланеты

Теперь их просто захлестывал поток новых фактов: куда бы они ни обернулись — к большим ли солнцам Центавра или к Красному Карлику, — всюду сияли неисследованные планеты. С.Лем. «Магелланово Облако» (1955)

М.Я.Маров, И.И.Шевченко

Экзопланеты — новый широчайший класс астрономических объектов, неизмеримо расширивших наши представления о Вселенной и давших дополнительные возможности для физических и динамических исследований. На 19 мая 2014 г. открыто уже 1791 экзопланета (из них значительная часть — благодаря космическому телескопу «Кеплер») и еще больше кандидатов в планеты. Сейчас известно более 1100 экзосистем (экзопланетных систем), и их число растет лавинообразно (рис.1) — как за счет ввода в действие новых, все более эффективных и точных инструментов (главным образом на космических аппаратах, КА), так и благодаря разработке новых, все более изощренных методов обнаружения. К сожалению, большинство методов несвободно от эффектов наблюдательной селекции: лучше «заметны» большие планеты на близких к родительской звезде орбитах.

Экспериментальные ухищрения

История разработки основных методов поиска описана подробно, в том числе в «Природе» [1]. Напомним лишь о наиболее эффективных сегодня, а также о некоторых перспективных. Методы подразделяются на *прямые* (основанные на непосредственных наблюдениях собственного или отраженного излучения планет) и *косвенные* (все остальные). Первые применяют чрезвы-



Михаил Яковлевич Маров, академик, заведующий отделом планетных исследований и космохимии Института геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского РАН. Лауреат Ленинской премии (1970), Государственной премии СССР (1980), Галаберовской премии по астронавтике (1972), премии Международной академии астронавтики (2011), премии Элвина Сиффа (2013). В 2014 г. награжден медалью Нордберга. Главный редактор журнала «Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы». Занимается вопросами исследований Солнечной системы, включая фундаментальные проблемы ее происхождения и ранней эволюции на основе комплексных теоретических подходов и методов математического моделирования.



Иван Иванович Шевченко, доктор физико-математических наук, заведующий отделом небесной механики и динамической астрономии Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (Санкт-Петербург). Член Международного астрономического союза. Область научных интересов — небесная механика, нелинейная динамика, динамика малых тел Солнечной системы, динамика планетных систем.

чайно трудно из-за огромного различия световых потоков от родительской звезды и от планеты; например, для удаленного наблюдателя поток в оптическом диапазоне от Солнца превышает таковой от Земли более чем на 10 порядков (в инфракрасной области контраст несколько меньше). Для выделения слабого планетного сигнала годятся те методы, которые так или иначе исключают свет от звезды: коронография, «обнуляющая» интерферометрия, поляриметрия. *Коронограф* представляет собой линзу или камеру-обскуру, установленную на луче зрения позади затмевающего диска, который блокирует свет от центрального (яркого) объекта. В «обнуляющем» *интерферометре* в отличие от обычного (где при комбинировании потоков максимумы электромагнитной волны совмещаются и усиливаются) совмещаются максимумы и минимумы, так что сигнал от главного (яркого) объекта обнуляется, а смещенный сигнал от планеты ос-

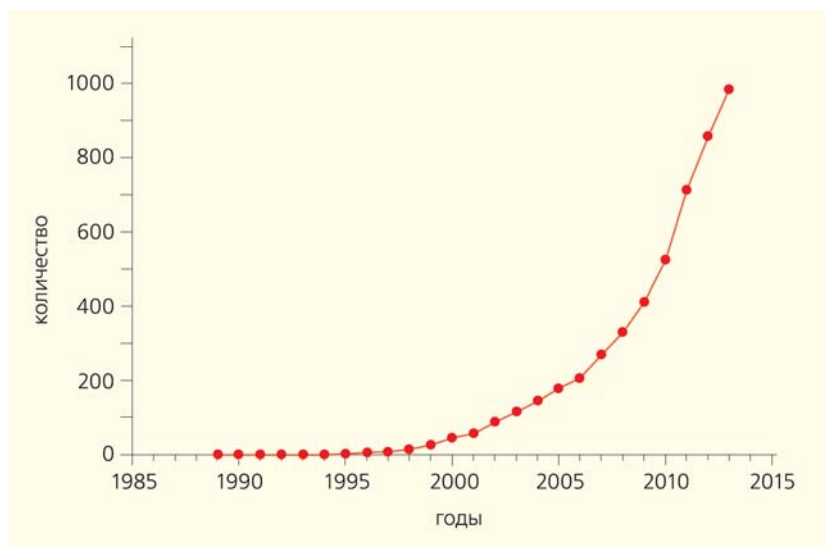


Рис.1. Рост числа открытых экзопланет. График построен по данным Extrasolar Planets Encyclopaedia (<http://exoplanet.eu>) на октябрь 2013 г.

тается прежним. Используя *поляризметрию*, можно исключить неполяризованный свет от звезды, чтобы эффективно выделить поляризованный планетный* (ожидаемая доля поляризованного сигнала в общем световом потоке от звезды и планеты составляет не более 10^{-5}). В 2008 г. С.В.Бердюгина с коллегами впервые наблюдали поляризованный сигнал от открытого ранее горячего юпитера HD189733b. А первой планетой, открытой прямым наблюдением — путем накопления изображения на ПЗС-матрице телескопа, — стала планета-гигант 2M1207-39b у звезды особого типа — коричневого карлика (Г.Шовен и др., 2004).

На косвенных методах остановимся подробнее. *Астрометрический метод* — первый, с помощью которого пытались искать экзопланеты, — исследует периодические колебания звезды в проекции на картинную плоскость: звезда при наличии у нее планеты (планет) движется по орбите вокруг общего центра масс системы. При этом наблюдаемый угловой размер этой орбиты очень мал. В 60-х годах XX в. П.Ван де Камп объявил об открытии им периодической модуляции, вызываемой спутником планетной массы, в видимом движении звезды Барнарда — одной из ближайших к Солнцу. Однако более поздние наблюдения с HST (Hubble Space Telescope — космический телескоп «Хаббл») этот результат не подтвердили. До сих пор данным методом не найдено ни одной планеты, поскольку он требует чрезвычайно высокой астрометрической точности. Так, вариации положения Солнца относительно общего с Юпитером

* При отражении под углом от поверхности планеты (или при наличии рассеивающих частиц в ее атмосфере) свет звезды поляризуется, причем степень вносимой поляризации может быть довольно высокой.

центра масс, если наблюдать с расстояния 10 пк, — менее $0.001''$, а точность астрометрии с HST составляет лишь $\sim 0.1''$. Метод привлекателен тем, что на измеряемую величину массы планеты не влияет неопределенность в наклоне планетной орбиты относительно луча зрения. Ожидается, что им будет открыто от 10 000 до 50 000 планет-гигантов с КА «Гайя» (запущен в ноябре 2013 г.).

RV-метод (называемый также *доплеровской спектроскопией*) заключается в измерении периодических вариаций радиальной скорости звезды, обусловленных наличием планет. Основная формула здесь очень проста: $m_p \sin i = 0.035 P \Delta V$, где m_p — масса планеты (в массах Юпитера M_J), P и ΔV — наблюда-

емый период (в годах) и амплитуда (в м/с) изменения радиальной скорости звезды, i — угол наклона плоскости орбиты к картинной плоскости. При $i=0$ эффект отсутствует. Формула выражает тот факт, что планета вынуждает родительскую звезду совершать радиальные (для удаленного внешнего наблюдателя) периодические колебания относительно центра масс системы. Максимальное изменение радиальной скорости Солнца из-за влияния Земли — 10 см/с, что лежит далеко за пределами возможностей современных инструментов (наилучшее разрешение пока ~ 50 см/с). Поэтому открытие RV-методом планеты земного типа, находящейся в зоне потенциального существования жизни у звезд солнечного типа, сейчас невозможно. Но первая экзопланета, обнаруженная у подобной Солнцу звезды (спектральный класс G5V, масса $1.06 M_\odot$), — массивная (значительно больше Юпитера) планета у звезды 51 Пегаса, была открыта М.Мейором и Д.Кело в 1995 г. именно этим методом. Эта планета — представитель нового класса планет, известного как *горячие юпитеры* (подробнее см., например, [1]). Временные RV-кривые дают материал для моделирования планетных орбит.

Метод *пульсар-тайминга* состоит в наблюдениях и анализе вариаций радиовсплесков от пульсаров во времени (при отсутствии планет всплески строго периодичны). Этим методом в 1992 г. А.Вольщан и Д.Фрейл обнаружили самые первые известные экзопланеты. Эти три планеты с массами 0.025 , 4.3 и $3.9 M_E$ (M_E — масса Земли) обращаются вокруг нейтронной звезды — пульсара PSR B1257+12, находящегося на расстоянии 980 св. лет от Солнца. Сформировались они, скорее всего, уже после взрыва сверхновой, который должен был «разметать» старую систему, если таковая существовала.

Наблюдение *событий микролинзирования* — самый экзотичный из применяемых сейчас методов, однако с его помощью открыт уже десяток планет (первый успех — в 2004 г.). Здесь фотометрически регистрируют увеличение блеска удаленной звезды из-за гравитационного линзирования ее света системой звезда—планета, пересекающей луч зрения. Если линзирующая звезда имеет планету, последняя порождает узкий вторичный пик (рис.2). Полное событие микролинзирования может длиться несколько суток и даже порядка месяца. Для поиска планет этим методом сейчас постоянно наблюдаются тысячи звезд в направлении на Магеллановы Облака и балдж* Галактики в рамках проектов OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment — Эксперимент по оптическому гравитационному линзированию) и MOA (Microlensing Observations in Astrophysics — Наблюдения микролинзирования в астрофизике). Замечательное его достоинство — малая подверженность эффектам селекции: обнаруживаются и планеты земной массы (из остальных методов лишь пульсар-тайминг позволяет «видеть» столь небольшие планеты). Поэтому в перспективе этот метод может дать бесценный материал о *функции масс* планет (распределении планет по массам).

Метод транзитов для поиска экзопланет был впервые предложен в 1952 г. О.Струве, представителем знаменитой астрономической династии. Регистрируются периодические потемнения звезды из-за прохождения по ее диску планеты. Разумеется, транзиты могут наблюдаться, только если наклон орбиты планеты относительно луча зрения достаточно мал. Феномен транзитов давно уже хорошо знаком астрономам на примере Венеры и Меркурия, хотя подобные события довольно редки (со времени изобретения телескопа произошло только восемь транзитов Венеры). Венера затеняет световой поток от Солнца на 0.1%; такого же порядка «транзитный сигнал» следует ожидать и у похожих экзопланет, обращающихся вокруг звезд солнечного типа. В 2000 г. Д.Шарбонно с коллегами впервые зафиксировали планетный транзит в кривой блеска звезды HD 209458, у которой планета была открыта ранее RV-методом. На рис.3 показан пример транзита (для звезды TrES-1).

* Балдж — центральная сфероидальная составляющая нашей Галактики радиуса ~2 кпк. Состоит в основном из старых звезд: красных гигантов, красных карликов, переменных типа RR Лиры; включает шаровые скопления.

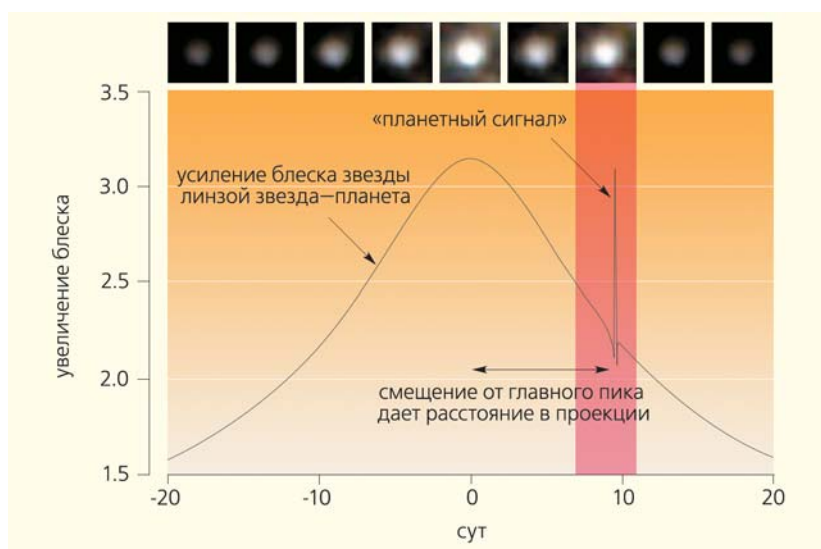


Рис.2. Моделирование увеличения наблюдаемого блеска удаленной звезды из-за гравитационного линзирования ее света системой звезда—планета, пересекающей луч зрения наблюдатель—звезда. Вторичный узкий пик представляет собой «планетный сигнал». (Источник: PLANET Microlensing Collaboration.)

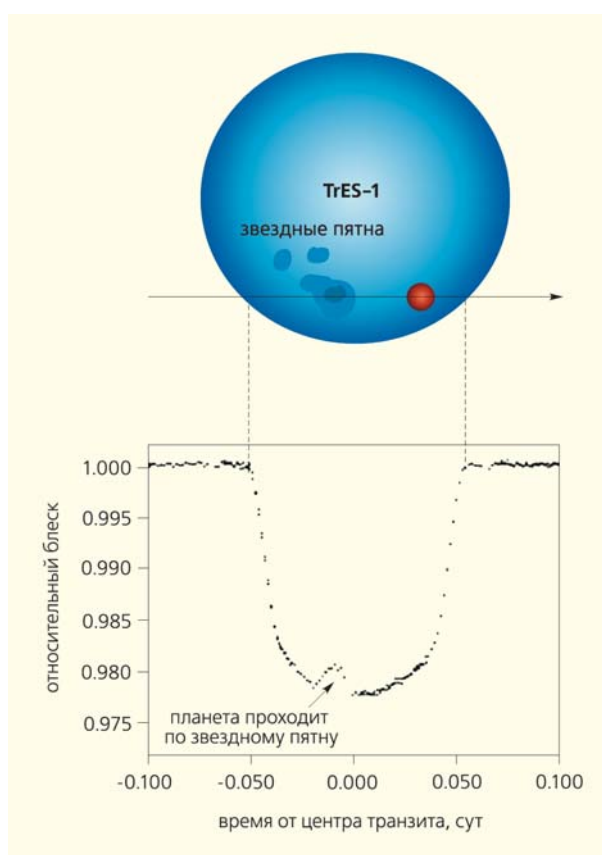


Рис.3. Кривая блеска звезды TrES-1 [2] по результатам наблюдений с HST. Ее любопытная деталь — малый вторичный пик вблизи минимума блеска, вызванный тем, что планета закрывает звездное пятно на родительской звезде. (Графика: G.Laughlin, <http://oklo.org>.)

Если в системе больше одной планеты или звездная система кратная, транзитная планета проходит между наблюдателем и звездой через непостоянные интервалы времени: из-за сложного движения объектов вокруг общего центра масс время транзита колеблется относительно строго периодического сигнала. Теоретические исследования показали, что путем моделирования наблюдаемых *TTV* (transit timing variations — вариаций времени транзита) можно получить практически полную информацию об орбитальных параметрах планет наблюдаемой системы. Первые *TTV* были зарегистрированы и смоделированы для систем с несколькими транзитными планетами. Д. Несворный с коллегами в 2012 г. впервые открыли этим методом «нетранзитную» планету, анализируя *TTV*-сигнал транзитной. Как образно сказал А. Морбиделли, «*TTV*-анализ возрождает то славное время небесной механики, когда Леверье предсказал существование и положение Нептуна из анализа аномалий в движении Урана. Теперь “чудо” Леверье стало обыденным явлением».

Наконец, *дифференциальная спектроскометрия* во время транзитов дает информацию о составе планетных атмосфер. Сопоставляются спектры во время транзитов со спектрами, полученными непосредственно перед и после ухода планеты за звезду. Этот метод может применяться только на очень больших телескопах. С *HST* таким образом впервые было открыто присутствие натрия (по линиям поглощения) в атмосфере HD 209458b (2002 г.), с *КА «Спитцер»* — присутствие воды и метана в атмосфере HD 189733b (2007 г.), а также получены многие другие интереснейшие данные о химическом составе атмосфер экзопланет.

По соседству и вдали

Если при анализе статистики открываемых планет учесть влияние эффектов селекции, получится, что по меньшей мере 25% звезд солнечного типа в Галактике имеют планетные системы, т.е. наличие планет у таких звезд — не редкое, а обычное явление. Однако большинство экзопланетных систем весьма отличны по своему строению и составу от Солнечной системы. Можно выделить четыре основных типа планетных систем [3]: (1) системы с наблюдаемыми *дебрис-дисками* (остаточными дисками) — дисками из малых тел и пыли, предположительно оставшимися после формирования планет, но без наблюдаемых планет (пример: Тау Кита); (2) системы с *дебрис-дисками* и планетами (пример: Эпсилон Эрида); (3) системы с газовыми гигантами на орбитах более 0.1 а.е. («холодные юпитеры»), без заметных *дебрис-дисков* (пример: Солнечная система); (4) системы с газовыми гигантами на орбитах менее 0.1 а.е., без *дебрис-дисков*.

Ближайшие к нам звезды солнечного типа — компоненты А и В двойной системы Альфа Центавра, расположенные на расстоянии 1.34 пк от Солнца. Еще ближе к нам (на 0.02 пк) находится звезда Проксима — красный карлик со светимостью в $6 \cdot 10^{-5}$ светимости Солнца, гравитационно не связанный с двойной Альфа [4]. Звезды А и В — пятая и 11-я из самых оптически ярких звезд неба (звездные величины 0.06 и 0.59 соответственно). Обе весьма близки по своим характеристикам к Солнцу, но вторая несколько его холоднее, ее спектральный класс K1, масса $0.93 M_{\odot}$; она имеет низкую звездную активность, что благоприятствует *RV*-наблюдениям. Грезы многих писателей-фантастов, мечтавших о планетах у ближайших к нам звезд, сбылись 17 октября 2012 г., когда интернациональная группа исследователей [5] объявила, что у компоненты В планета есть. Путем прецизионной доплеровской спектроскопии удалось выявить вариации радиальной скорости звезды с полуамплитудой 51 см/с и периодом 3.2 сут. Радиус планетной орбиты оказался равным всего 0.04 а.е., а масса планеты — порядка массы Земли. Наблюдения охватывали период с февраля 2008 г. по июль 2011 г., и было получено 459 спектров звезды на спектрографе HARPS 3.6-метрового телескопа обсерватории Ла-Силья в Чили, дающем наилучшую точность — несколько десятков см/с. Поскольку прибор работал на пределе своей точности, существует, хотя и небольшая, вероятность ложного открытия (в 2013 г. сомнения усилились). Большое значение имели бы наблюдения транзита планеты, однако вероятность транзита (глубиной 10^{-4}) мала (10%).

Самые удаленные от нас планеты SWEEPS-04 и SWEEPS-11 обнаружены в рамках проекта SWEEPS (Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search — Поиск затмевающих экзопланет в окне Стрельца) по результатам наблюдений в течение 7 сут с помощью *HST* планетных транзитов в насыщенном звездами поле в направлении на балдж Галактики [6]. Поле обзора SWEEPS имеет размеры $202'' \times 202''$ и включает 180 тыс. звезд, у которых с *HST* возможно выявление планет-гигантов юпитерианского типа. Расстояние до SWEEPS-04 и -11 оценивается в 8.5 кпк, т.е. примерно в 30 тыс. световых лет! Массы этих двух планет равны примерно 4 и $10 M_J$, орбитальные периоды — 4.2 и 1.8 сут. Это типичные «горячие юпитеры». Родительские звезды — солнечного типа. В 2007 г. К. Саху с коллегами построили *RV*-кривые для SWEEPS-04 и -11 на основе данных наблюдений на 8-метровом телескопе VLT (Very Large Telescope — Очень большой телескоп Европейской южной обсерватории в Чили). Как оказалось, фазы транзитов и *RV*-вариаций для SWEEPS-11 согласуются, что служит хорошим подтверждением открытия этой планеты.

Сходство и различия

Классификация. Первоначально планеты Солнечной системы отождествлялись по характеру их видимого движения по небосводу*. Сегодня астрономический взгляд на планеты наполнился новым содержанием: под ними мы понимаем астрофизический класс объектов, по своим свойствам занимающий промежуточное положение между звездами (включая коричневые карлики), с одной стороны, и разнообразными «малыми телами» (включая планеты-карлики) — с другой.

Современное определение *планеты*, принятое на XXVI Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (Прага, 2006), по существу основано на характеристиках тел Солнечной системы. Планета определяется как небесное тело, которое: (1) обращается вокруг Солнца; (2) обладает достаточной массой, чтобы самогравитация обеспечила гидростатически равновесную (почти сферическую) форму; (3) расчистило окрестность своей орбиты. *Планета-карлик* (к которым отнесены, например, Плутон и Церера) удовлетворяет пунктам (1) и (2), но при этом она (3) не расчищает окрестность своей орбиты и (4) не является планетным спутником. Все остальные тела ниже определенного порога массы, обращающиеся вокруг Солнца, считаются *малыми телами* (это кометы, большинство астероидов, транснептуновых объектов). Решение, принятое в Праге, базировалось на четкой объективной основе, в частности, — на небесномеханических критериях устойчивости орбит. С точки зрения астрофизики планеты характеризуются тем, что их масс не хватает ($M < 0.013 M_{\odot} = 4100 M_{\oplus}$), чтобы инициировать

* В переводе с древнегреческого «планета» означает «блуждающая». В отличие от звезд, планеты Солнечной системы довольно быстро перемещаются по небесной сфере, иногда выписывая петли, поэтому их так и назвали.

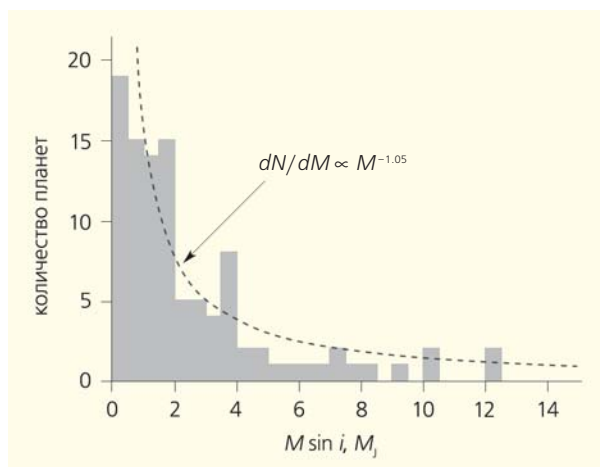


Рис.4. Распределение планет по массам [7].

и поддерживать ядерную реакцию слияния ядер дейтерия в своих недрах. Коричневые карлики — объекты промежуточного типа между планетами и звездами ($0.013 M_{\odot} < M < 0.075 M_{\odot}$) — способны поддерживать реакции слияния ядер дейтерия, но не водорода (термоядерного синтеза гелия); температура в центре тела ниже 6 млн градусов.

Соотношение масса—радиус. Большинство известных экзопланет имеют массы $\sim M_J$ и больше (таков вклад горячих юпитеров). Это явный эффект селекции, и число открываемых планет с массами порядка массы Нептуна и меньше постоянно растет. Зато резкий (гиперболический) спад числа планет при больших массах (рис.4), скорее всего, реален, так как эффекты селекции не сказываются на наблюдательных данных о планетах столь больших масс.

Спектр масс и размеров открытых экзопланет довольно широк: он охватывает три порядка по массам и несколько более одного порядка по размерам (рис.5). Пока наибольший размер имеет

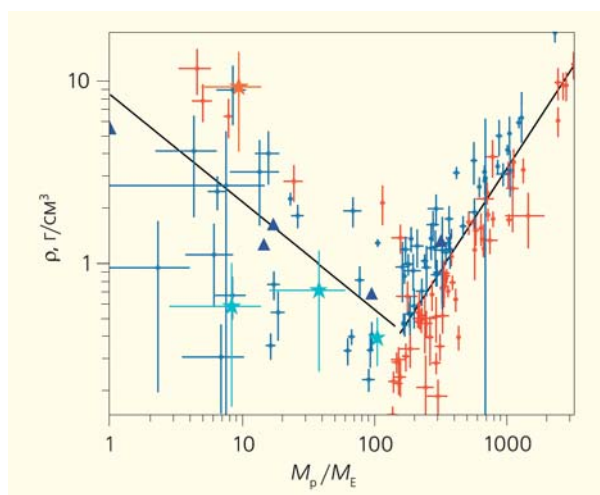
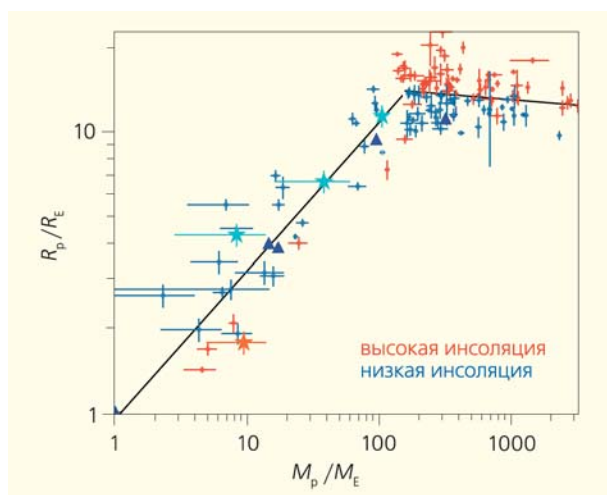


Рис.5. Соотношения масса—радиус и масса—плотность [8].

планета TrES-4 (открытая в рамках проекта Trans-Atlantic Exoplanet Survey — Трансатлантический экзопланетный обзор); ее радиус превышает в 19.8 раза радиус Земли и в 1.8 раза радиус Юпитера, при почти одинаковой с ним массе. Плотность этой планеты ($\approx 0.3 \text{ г/см}^3$) рекордно низка среди планет с известными размерами и массами. Самая же маленькая из известных сегодня экзопланет — Кеплер-37b. Она лишь немногим больше Луны, а масса ее равна $0.01 M_E$.

На графике «масса—радиус» для 138 планет с известными массами и размерами [8] наблюдается четкий излом (см. рис.5), соответствующий переходу от планет земного типа и ледяных гигантов ($M < 150 M_E$) к газовым гигантам ($M > 150 M_E$). Для первых график (при постоянной плотности) имел бы в логарифмических координатах наклон $1/3$, однако на деле наклон приблизительно равен $1/2$, что говорит о возрастающем с увеличением массы вкладе легучих. Для вторых радиус остается почти постоянным и даже уменьшается. Кроме того, для них статистически значимым оказывается увеличение размеров планет при высоких уровнях инсоляции; объясняется это тем, что при больших температурах газовые гиганты «разбухают».

Состав. *Металличность*, важнейший параметр звезд, характеризует относительное содержание железа, которое отражает содержание и других тяжелых элементов. Согласно наблюдательным данным, металличность звезды коррелирует с наличием планет: у звезд с малой металличностью планетные системы отсутствуют, а при металличности выше солнечной* вероятность

* В состав Солнца входят (по массе) водород (74.9%), гелий (23.8%) и более тяжелые элементы («металлы»). Оно содержит 99.85% всего вещества Солнечной системы.

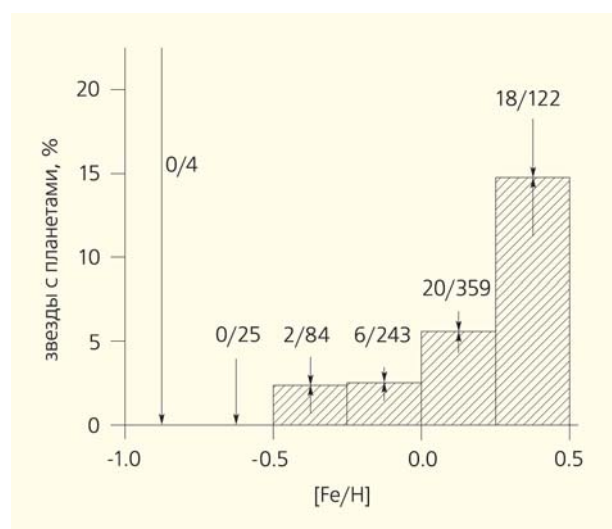


Рис. 6. Связь металличности звезды с наличием планет [9]. (По горизонтали отложена металличность, по вертикали — процент звезд, имеющих планеты.)

присутствия планет резко повышается (рис.6). Причина, по всей видимости, в том, что звезды с планетами рождаются в молекулярных облаках с относительно высоким содержанием тяжелой компоненты [9], способствующим образованию крупных ядер из скальных пород. На этих ядрах конденсируются летучие, аккрецирует газ диска и формируются газо-ледяные планеты-гиганты.

О внутреннем строении экзопланет можно судить, моделируя наблюдаемые статистические зависимости, такие как масса—радиус (см. рис.5). Внутреннее строение экзопланет, видимо, в целом отвечает моделям планет земной группы и планет-гигантов. Различия могут зависеть от металличности родительской звезды и состава протопланетного диска. Температура поверхности, состав и свойства атмосферы определяются расстоянием до родительской звезды. У близких к звездам планет температура поверхности может составлять $\sim 1500 \text{ K}$!

Типы. Большинство открываемых экзопланет совсем не похожи по своим наблюдаемым свойствам на планеты Солнечной системы. Яркий пример — упомянутые выше *горячие юпитеры* — гиганты с юпитерианскими массами на орбитах, близких к родительской звезде (наблюдаются орбитальные периоды порядка нескольких суток и даже меньше). Такие планеты формируются на удалении от звезды, и как планета попадает (мигрирует) в текущее положение, почему она там остается является и «выживает», остается загадкой. Впрочем, возможно, планеты этого типа рано или поздно поглощаются своими звездами.

Второй после планет-гигантов основной тип планет — *земной*. В Солнечной системе к таковым относятся твердотельные («скальные») внутренние планеты — Меркурий, Венера, Земля и Марс. Среди же экзопланет *земли* и *сверхземли* определяются как планеты с недоминирующими атмосферами (высота атмосферы много меньше радиуса планеты) и массами $\sim 1-2$ и $\sim 2-13 M_E$ соответственно. В зависимости от значения параметра I/R (отношения массы воды/льда и твердого вещества — металлов и скальных пород) мы имеем разные типы планет [10]: (1) $I/R \sim 10^{-4}$: скальная планета с содержанием воды, как у Земли; (2) $I/R \sim 0.3-0.5$: планета с жидким океаном под ледяной оболочкой, подобная спутникам Юпитера Европе и Ганимеду; (3) $I/R \sim 1$: полностью океаническая планета. Образование сверхземель возможно, вообще говоря, в результате срыва газовых оболочек планет-гигантов ультрафиолетовым излучением соседних к планетной системе массивных звезд. Итак, наличие систем со сверхземлями можно ожидать в областях формирования звезд больших масс, а систем тех же размеров с планетами-гигантами — в областях формирования звезд малых масс.

К новому, весьма необычному классу экзопланет относятся *планеты-бродяги*, планеты-сироты — не входящие в планетные системы звезд. По-

добные объекты открыты в звездном скоплении в туманности Ориона. Своим происхождением они могут быть обязаны выбросам из планетных систем (в особенности двойных звезд) в межзвездное пространство. То, что это возможно, небесные механики знают давно: Меркурий может покинуть Солнечную систему примерно через миллиард лет. Большая доля планет, образовавшихся в системах двойных звезд, может со временем быть выброшена.

Многоликая динамика

Подобно физическим свойствам, динамические свойства большинства известных экзопланетных систем существенно иные, чем у Солнечной системы: экзопланеты обычно имеют относительно сильно вытянутые орбиты, а планеты-гиганты зачастую обращаются на орбитах, очень близких к родительской звезде. Важнейшие явления, определяющие динамическую архитектуру этих систем, — *резонансы и миграция*. Выделяют *резонансы средних движений* и *вековые резонансы*. Первые представляют собой соизмеримости между средними частотами орбитального обращения планет (либо планеты и звезды в кратных звездных системах), вторые — соизмеримости между скоростями прецессий орбит [11]. Согласно современному космогоническому представлению, захваты планетной системы в орбитальные резонансы — закономерные этапы эволюции, обусловленные миграцией планет в газово-пылевом диске, которая протекает для разных планетных систем с различной скоростью.

В современной динамической классификации планетных систем в качестве первого (основного) класса выделяют системы с резонансами средних движений. Примерами систем с планетами, находящимися в резонансе 2/1, служат Глизе* 876 и HD 82943, в резонансе 3/1 — система 55 Рака. Наличие резонансов средних движений и их взаимодействие в планетных системах обуславливает возможность *хаотического поведения*** в орбитальной динамике планет — например, в случае планетной системы Кеплер-36 [13].

Зачастую ошибки в определении планетных орбитальных параметров из наблюдений много больше интервалов их значений, на которых обеспечена долговременная устойчивость системы. Поэтому анализ устойчивости позволяет налагать более строгие ограничения на орбитальные параметры. К настоящему времени разрабо-

таны как аналитические, так и численно-экспериментальные *критерии устойчивости* планетных систем. Из первых наиболее востребованы критерии Хилла и Уиздома. Критерий Хилла устанавливает границу области устойчивых орбит тела пренебрежимой массы вокруг гравитирующего соседа («второго тела» — спутника, планеты, одной из компонент двойной звезды), когда последний обращается вокруг объекта большей (по сравнению со вторым телом) массы («первого тела» — планеты, звезды, главной компоненты двойной соответственно). Согласно этому критерию, радиус зоны устойчивости прямо пропорционален радиусу «сферы Хилла». Критерий Уиздома адаптирует критерий перекрытия резонансов Чирикова [12] к конкретной небесномеханической задаче: он дает размеры области, «расчищаемой» планетой в окрестности своей орбиты благодаря перекрытию соседних орбитальных резонансов (соседних в том смысле, что им соответствуют близкие друг к другу целочисленные отношения периодов). Движение частиц (тел пренебрежимой массы), попавших в область перекрытия, хаотизируется, и область расчищается. Этот критерий, в частности, служит одним из немногих строгих математических обоснований для определения понятия «планета», приведенного выше. Численно-экспериментальные критерии базируются на вычислениях MEGNO***, показателей Ляпунова, фундаментальных частот движения, а также на анализе условий ухода/столкновений.

Более половины всех наблюдаемых звезд главной последовательности входят в кратные (включая двойные) звездные системы. Исследования долговременной устойчивости гипотетических планетных систем в кратных звездных системах были инициированы еще в 80-х годах прошлого века французским ученым Д.Бене. Сейчас известно о существовании планет в более чем 60 кратных звездных системах. Большинство планет, обнаруженных у двойных, находится на орбитах *S-типа* (вокруг одной компоненты двойной; их также называют внутренними), а остальные — на орбитах *P-типа* (вокруг обеих компонент; такие орбиты именуют еще внешними или *циркумбинными*).

За месяц до объявления об открытии планеты у Альфа Центавра, в сентябре 2012 г., был опубликован анализ устойчивости планетной динамики в этой двойной звездной системе [14], который позволил определить области устойчивого движения гипотетических планет двойной в пространстве орбитальных параметров (рис.7). Открытая планета находится в области устойчивости — глубоко внутри белого «треугольника устойчивости» на рис.7, *слева*. В случае циркумбинарного движения внешняя граница области хаоса на диаграм-

* Название «Gliese» означает, что звезда входит в каталог ближайших (до 25 пк) к Солнцу звезд, составленный в 1969 г. немецким астрономом В.Глизе.

** О феномене динамического хаоса, обусловленного «перекрытием» резонансов, подробнее см. в обзорах Б.В.Чирикова [12] и И.И.Шевченко [11].

*** От англ. mean exponential growth number — среднее значение экспоненциального роста (расхождения траекторий).

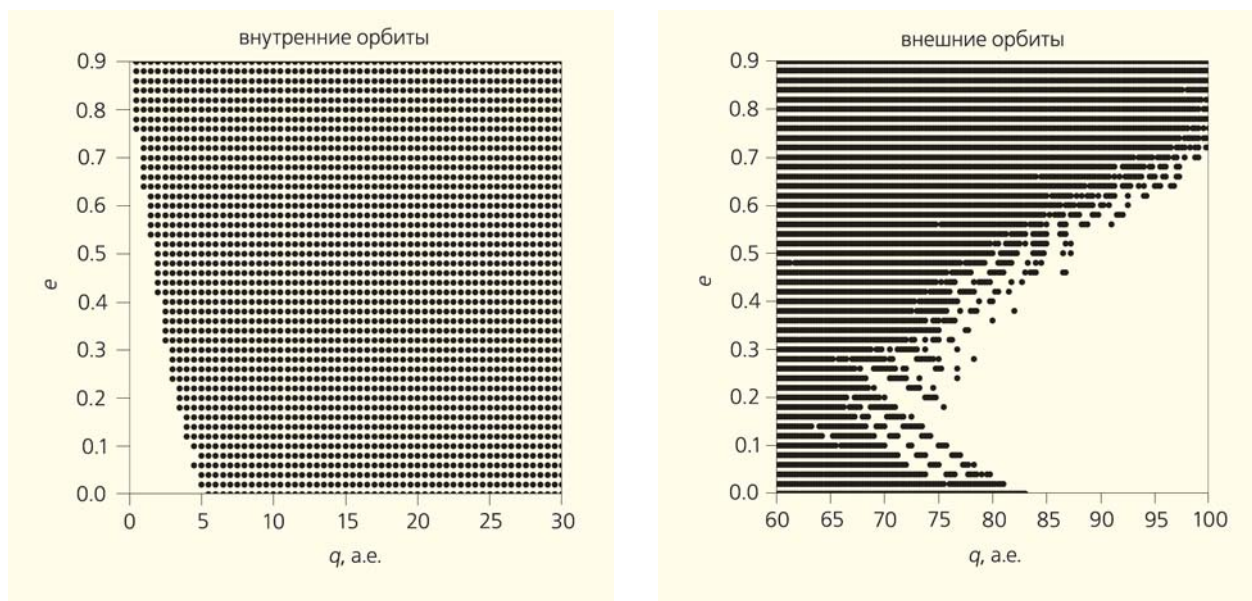


Рис.7. Диаграммы устойчивости на плоскости «перигелическое расстояние q — эксцентриситет e » планеты, построенные для системы Альфа Центавра [14]. Белым показаны области устойчивости, черным — неустойчивости. На обеих диаграммах зоны хаоса расширяются с увеличением эксцентриситета. Каково бы ни было q , движение становится неустойчивым при достаточно большом эксцентриситете, так как сильно вытянутые орбиты при внесении возмущений легко хаотизируются.

мах устойчивости соответствует большим полуосям орбит планет более 80 а.е. Согласно результатам расчетов, наиболее вероятные значения ляпуновского времени движения планет (характерного времени предсказуемого движения [11]) в зонах неустойчивости составляют ~500 лет для внешних орбит и ~60 лет для внутренних орбит.

До наблюдений с КА «Кеплер» было известно порядка 50 планет в двойных звездных системах,

причем большинство из них — внутренние. Встретились и несколько циркумбинарных систем (HW Vir, NN Ser, UZ For, DP Leo, FS Aur, SZ Her) среди тесных двойных с компонентами, не относящимися к звездам главной последовательности. Недавно с КА «Кеплер» методом анализа транзитов открыто несколько циркумбинарных планетных систем у звезд главной последовательности — Кеплер-16, -34, -35, -38 и -47, причем система Кеплер-47 включает две планеты. Орбитальная конфигурация системы Кеплер-16, согласно [15], показана на рис.8. Размеры двойной (0.22 а.е.) примерно в 100 раз меньше, чем у Альфа Центавра (23.4 а.е.). Диаграммы устойчивости на плоскости «перигелическое расстояние — эксцентриситет» показывают [16], что планета Кеплер-16b находится в опасной близости к области хаоса — она расположилась между «зубьями» неустойчивости (рис.9). Однако эта планета «выживает» (не уходит из системы и не падает на родительские звезды), потому что ее орбита близка к полуцелому орбитальному резонансу $11/2$ с центральной двойной. В Солнечной системе данный феномен аналогичен выживанию Плутона и плутино*, находящихся в полуцелом орбитальном резонансе $3/2$ с Нептуном. Границы хаоса — порядок на диаграммах устойчивости демонстрируют фрактальную структуру, обусловленную наличием орбитальных резонансов.

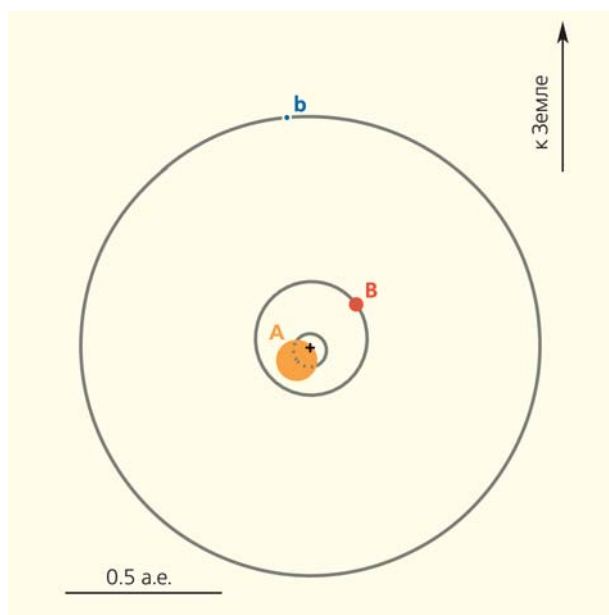


Рис.8. Система Кеплер-16 [15].

* Плутино — объекты той же резонансной группы, что и Плутон, но более мелкие.

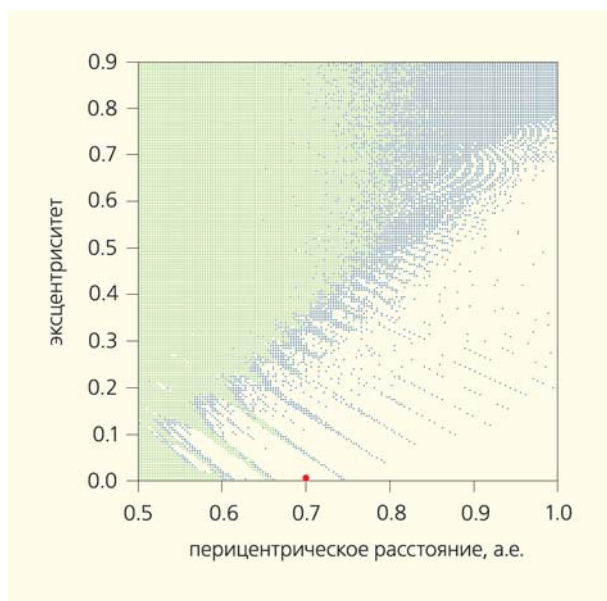


Рис.9. Диаграмма устойчивости для системы Кеплер-16. Зеленым цветом показаны орбиты, неустойчивые по критерию ухода—столкновения, синим — по критерию значения ляпуновского показателя [16].

В мультипланетные системы (с двумя и более планетами) входит примерно треть из числа открытых к настоящему времени экзопланет. Наличие орбитальных резонансов в таких системах широко распространено и подтверждено вычислениями поведения резонансных аргументов. В системе **Глизе 876** орбитальные периоды относятся как 4:2:1 — так же, как у внутренних спутников Юпитера. Вокруг главного компонента подробно изученной двойной системы **55 Рака** — желтого карлика (спектрального класса G8) — обращается по меньшей мере пять планет с массами от 0.034 до 3.84 M_J ; их орбитальные периоды составляют от 2.8 до 5200 сут. Планеты b и c находятся в резонансе 3/1. Система в целом устойчива; она может содержать и другие планеты, так как далека от состояния «плотной упаковки». Желтый карлик двойной **Уpsilon Андромеды** (спектрального класса F8) имеет три планеты-гиганта с массами от 0.69 до 3.93 M_J и орбитальными периодами от 4.6 до 1290 сут, образующих устойчивую систему. Планеты c и d близки к резонансу 11/2. Обращает на себя внимание схожесть резонансной конфигурации с резонансом в упоминавшейся выше циркумбинарной планетной системе Кеплер-16. **Кеплер-11** — одиночный желтый карлик, у которого обнаружено шесть транзитных планет с массами от 4.3 до 300 M_E и орбитальными периодами от 10.3 до 118 сут. Пять внутренних планет движутся на очень тесных орбитах, расстояния между которыми малы как в относительных единицах (в единицах радиуса орбиты внутренней планеты), так и в абсо-

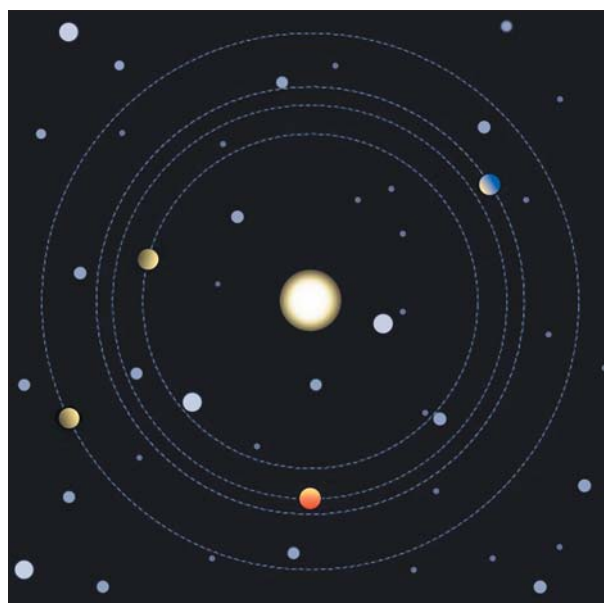


Рис.10. Плотная упакованная резонансная система KOI-730. Четыре планеты-сверхземли обращаются на весьма близких друг к другу резонансных орбитах. (Графика: Wikimedia Commons.)

лютных: орбита самой внешней планеты лишь немногим больше орбиты Меркурия. Система в целом нерезонансна, устойчива; однако ее конфигурация совершенно нетипична. Две самые близкие к родительской звезде планеты близки к резонансу 5/4; возможно наличие внешних (нетранзитных) планет. **KOI-730** (Kepler Object of Interest — 730) — желтый карлик (звезда спектрального класса G5V), у которого открыты четыре транзитные планеты-сверхземли с радиусами: 1.8, 2.1, 2.8, 2.4 R_E (рис.10). Орбитальные периоды составляют 7.4, 9.8, 14.8 и 19.7 сут; таким образом, планеты близки к резонансу средних движений 8:6:4:3. Эта планетная система — наиболее выдающийся из известных сейчас примеров *плотной упакованной резонансной системы*.

Таинство рождения

Открытие экзопланет вкупе с исследованием химического состава комет, астероидов, метеоритов поставило планетную космогонию, изучающую зарождение и эволюцию планетных систем, на новую основу. По современным представлениям, планеты формируются из протопланетной туманности после коллапса центрального сгущения и «конденсации» газовой-пылевой вещества в аккреционный диск [17, 18]. Такие диски — плоские пылевые структуры вокруг протозвезд и молодых звезд главной последовательности — имеют много общего с аккреционными дисками у двойных звезд, образующимися за счет перетекания веще-

ства от обычной звезды на соседний массивный компакт. И в том, и в другом случае речь идет о турбулентной многокомпонентной газовой пылевой среде [19], для которой, вообще говоря, характерны кинетические процессы с разнообразными химическими реакциями. Новые астрофизические и химические данные накладывают существенные ограничения на космогонические модели, в первую очередь на сценарии формирования плотных газовой-пылевых сгустков (кластеров) и рождения первичных твердых тел.

Газово-пылевые кластеры образуются благодаря развитию джинсовской гравитационной неустойчивости, когда отношение пылевого и газового компонентов растет в процессе радиального и вертикального сжатия диска. Еще основатель отечественной космогонической школы О.Ю.Шмидт отмечал: «Мы придаем решающее значение твердой фазе, т.е. пыли и другим твердым частицам в газопылевом облаке». Он связывал процесс эволюции с необратимой потерей частицами механической энергии при неупругих соударениях, но при сохранении момента количества движения, что приводило «к уплотнению системы, к собиранию частиц в плоский слой повышенной плотности». Такой пылевой субдиск получается в результате дифференциального вращения газовой-пылевой вещества протопланетного облака по орбите вокруг звезды и процессов аккреции, когда пылевая составляющая оседает к экваториальной плоскости, перпендикулярной оси вращения диска. Если плотность вещества в этом слое достигает некоторого критического значения, субдиск становится гравитационно-неустойчивым и распадается на многочисленные пылевые сгущения, а это, в свою очередь, создает предпосылки для прогрессирующего роста частиц с образованием астероидоподобных тел — *планетезималей*.

Тот факт, что из вещества газопылевых дисков в процессе дальнейшей эволюции первичных твердых тел и рождаются планеты, по существу не вызывает сомнений. Но как это происходит? Наиболее вероятным механизмом их укрупнения считаются соударения, приводящие как к объединению, так и к разрушению сталкивающихся объектов — в зависимости от физических свойств и динамического характера взаимодействий. При определенных условиях процессы объединения преобладают, что приводит в итоге к появлению планетной системы. С динамикой пылевых частиц и вероятными механизмами их укрупнения до размеров планетезималей связаны ключевые проблемы планетной космогонии, решение которых пока далеко от завершения. Представления о последовательном укрупнении частиц в газовой-пылевой среде в результате соударений (при относительно высоких скоростях тел с сантиметровыми и тем более метровыми размерами) не подтверждаются ни теоретичес-

кими, ни экспериментальными оценками. Так вести себя пылевые частицы могли бы, вообще говоря, в турбулентной гетерогенной среде — из-за эффективности происходящих в вихревых структурах процессов коагуляции. Определенную роль при наличии эффектов самогравитации и вязкости могло бы сыграть резонансное возбуждение волн плотности, оказывающих сильное влияние на особенности морфологии и динамики нелинейных хаотических систем. Наиболее реалистичным нам представляется сценарий, согласно которому образующиеся в пылевом субдиске (вследствие гравитационной неустойчивости) кольцевые сгущения распадаются на отдельные пылевые кластеры в виде рыхлых структур [20, 21]. Здесь обеспечиваются значительно более благоприятные условия для объединения и уплотнения таких структур при соударениях и постепенного их укрупнения до размеров планетезималей, что подкрепляется численными расчетами в широком диапазоне параметров моделей. Совокупность рыхлых пылевых кластеров протопланетного субдиска рассматривается при этом как особый тип сплошной среды — фрактальной, для которой существуют точки и области, не заполненные ее составляющими, с сильным гравитационным взаимодействием. Заметим, что спектральные наблюдения дисков у молодых звезд типа Т Тельца свидетельствуют о существовании в них мелкой пыли (≤ 1 мкм) в течение 1—10 млн лет. В то же время, если исходить из модельных оценок, во внутренней части диска (на расстояниях < 10 а.е.) за это время могут вырасти крупные тела размером ~100—1000 км или еще более крупные сгущения эквивалентной массы.

По существующим оценкам, эволюция кластеров и укрупнение пылевых частиц происходит относительно быстро, за $\sim 10^6$ лет, а завершение процесса формирования планетной системы типа Солнечной занимает $\sim 10^8$ лет. Сейчас признано, что планеты земного типа создает *аккумуляция планетезималей* [17, 22], включающая в себя три стадии: (1) опережающий аккреционный рост малых тел в диске (характерная продолжительность этой стадии — менее миллиона лет; большие тела растут быстрее, чем меньшие, за счет своих больших масс и меньших эксцентриситетов орбит); (2) олигархический рост, когда планетные зародыши растут за счет меньших тел, пока ресурс меньших тел не исчерпывается (продолжительность — порядка ста тысяч — миллиона лет); (3) стадию, начало которой соответствует появлению планетных зародышей с массами от лунных до марсианских. Система зародышей изначально неустойчива. На временах ~ 100 млн лет из-за пересечений орбит происходят их ударные столкновения. Во внутренней области планетной системы зародыши при столкновениях слипаются в тела с размерами порядка земного.

Что касается планет-гигантов, то они, по традиционным представлениям, формируются путем аккреции газа на ядро из скальных пород размерами от единиц до десятков земных радиусов. На расстояниях далее так называемой *снежной линии* (границы конденсации воды и других летучих) температура становится достаточно низкой, чем объясняется образование ледяных гигантов Урана и Нептуна и существование их крупных спутников, состоящих преимущественно из водяного льда.

Можно думать, что эти основополагающие физические представления в целом характерны и для планет в других звездных системах. Их специфические особенности зависят, однако, от конфигурации планетной системы и в первую очередь от радиального расстояния, определяющего эффективную температуру и соотношение газовой и твердотельной оболочек, а также от взаимного расположения планет различной массы. Наличие газового и пылевого компонентов приводит к медленному радиальному смещению орбиты планеты в диске по направлению к звезде или от нее. Скорость миграции относительно высока при интенсивной аккреции газа на планету на ранних стадиях эволюции. Моделирование планетных систем при наличии вязкого газово-пылевого диска позволяет выяснить, как наличие диска определяет возможные резонансные конфигурации планетных систем в итоге эволюции.

Где может быть жизнь?

На окраинах Млечного Пути металличность звезд низка, и это препятствует образованию планет земного типа. Ближе к центру Галактики, где процесс звездообразования интенсивен, металличность высока, но высока и частота взрывов сверхновых, что исключает устойчивое развитие жизни на планетах. На важность этих ограничений обратили внимание Ч.Лайнвивер с соавторами [23]. Путем модельных расчетов галактической эволюции они нашли, что *галактическая зона жизни* ограничена кольцом радиальной протяженности от 7 до 9 кпк от центра Галактики; в ней находятся звезды, сформировавшиеся 8–4 млрд лет назад (рис.11), и большинство из тех, у которых

могут быть планеты со сложными формами жизни, старше Солнца в среднем на ~1 млрд лет. Таким образом, пик развития жизни в Млечном Пути, возможно, уже давно пройден [23, 24].

Зону жизни можно определить и внутри планетной системы. Это область, где на поверхности планет земного типа может присутствовать вода и при этом климатические условия достаточно устойчивы [25]. Широкий температурный диапазон жидкой фазы воды определяет и обширность зоны жизни (по размерам орбиты), и устойчивость климата. Поскольку у льда плотность меньше, чем у воды, океаны замерзают, начиная с поверхности, и жизнь может сохраняться подо льдом. А высокая температура кипения предохраняет океаны от обращения в пар при сезонных изменениях температуры. Как и в Галактике, зона жизни имеет форму кольца (с центром в звезде), до внутреннего радиуса которого на планетах «слишком жарко», а за внешним — «слишком холодно». Границы и ширина зоны изменяются со временем. Есть еще понятие *зоны динамической обитаемости* — области вокруг звезды, где пла-

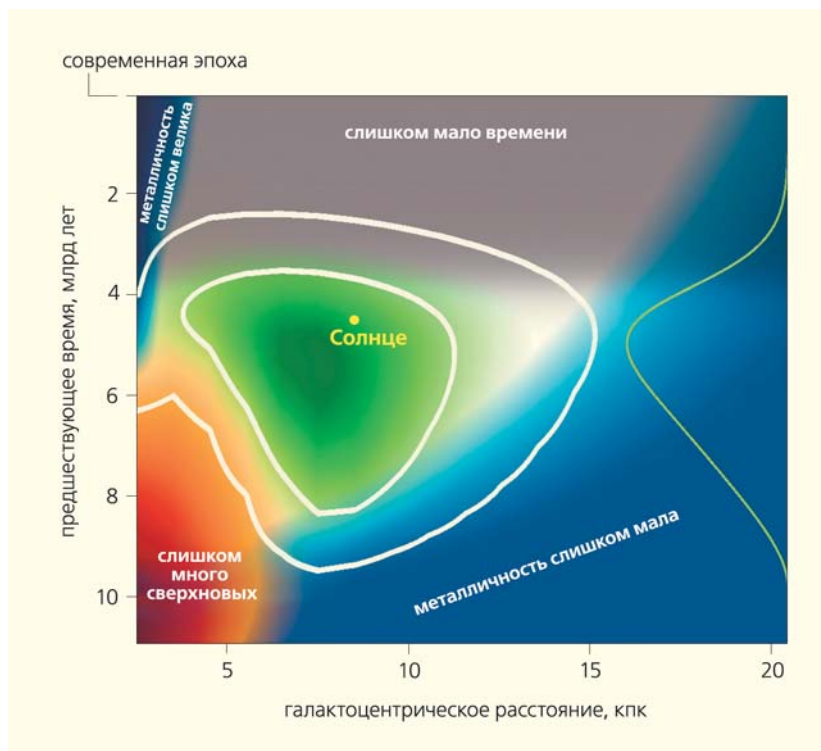


Рис.11. «Галактическая зона жизни», согласно Ч.Лайнвиверу и др. [23]. По горизонтали — расстояние от центра Галактики, по вертикали — возраст звезд. Серым цветом выделена зона, где для формирования сложных форм жизни недостаточно времени; красным — где развитию жизни препятствуют взрывы сверхновых; синим — где металличность родительских звезд слишком мала или, наоборот, велика для формирования и выживания планет земного типа. Отложенная по вертикали зеленая кривая справа — рассчитанное в [23] распределение во времени ожидаемого числа обитаемых планет со сложными формами жизни.

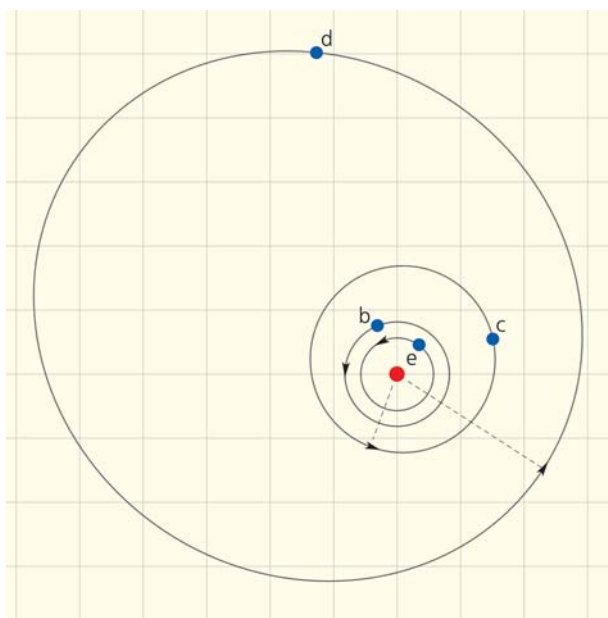


Рис.12. Система Gliese 581. Существование внешней планеты (планеты d) не подтверждено. Масштаб ячейки схемы 0.05×0.05 а.е. (Графика: Wikimedia Commons.)

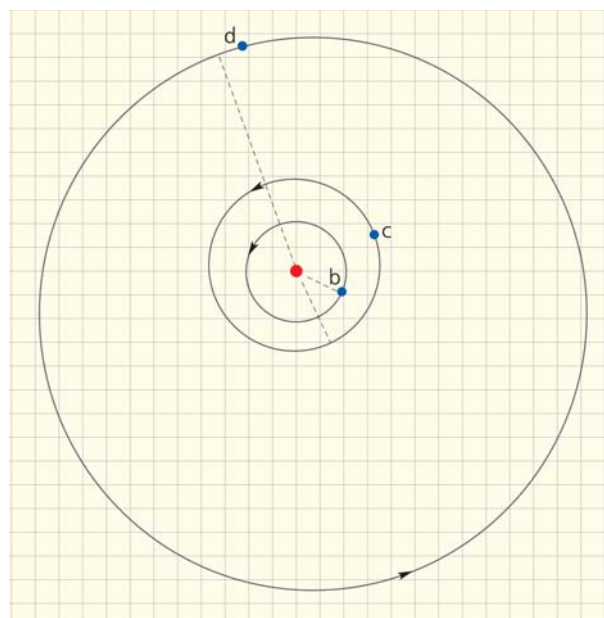


Рис.13. Система 47 UMa. Не исключено, что она содержит и другие планеты. Масштаб ячейки схемы 1×1 а.е. (Графика: Wikimedia Commons.)

неты земного типа могут существовать на длительных шкалах времени, не испытывая существенных возмущений орбит со стороны других планет (или звезд-компаньонов в системах двойных звезд).

Естественно, что планеты земного типа, расположенные в зонах жизни, представляют перво-степенный интерес. В системе **Глизе 581** (рис.12), состоящей из красного карлика (звезды спектрального класса M3V) и трех планет — горячего нептунa и двух сверхземель, одна из последних, массой $5 M_E$ и с орбитальным периодом 13 сут, оказалась, согласно вычислениям, в зоне обитаемости. Близка по конфигурации к Солнечной (с учетом эффектов селекции) система **47 Большой Медведицы** — желтый карлик (спектральный класс G0) и три планеты-гиганта с массами 2.53 , 0.54 и $1.64 M_J$ и орбитальными периодами 1078, 2390 и 14000 сут. Две из них имеют орбиты, близкие к круговым (рис.13). В зоне жизни здесь могут быть гипотетические планеты с орбитами радиусом от 0.8 до 1.3 а.е. Может содержать больше планет (так как далека от состояния «плотной упаковки») и система **μ Жертвенника** — желтый карлик (спектральный класс G3), у которого пока обнаружены имеющие почти круговые орбиты сверхземля и три планеты-гиганта. Массы планет составляют 0.033 , 0.52 , 1.68 и $1.81 M_J$, орбитальные периоды — 9.6, 311, 643 и 4206 сут. Вторая и третья близки к резонансу 2/1; обе эти планеты входят в зону жизни.

«Другие миры» таят много загадок и ждут своих исследователей.

Сестра Земли

Более полувека назад, в 1959 г., в СССР и США одновременно вышли две научно-фантастические повести — «Сестра Земли» Георгия Мартынова и «Планета-сестра» («Sister Planet») Пола Андерсона. Названия говорят сами за себя: речь идет о планетах, мало отличимых от Земли и так же пригодных для жизни. Когда наша статья была уже в процессе подготовки к печати, мировые СМИ облетело известие: найдена экзопланета, которую можно назвать сестрой Земли (сбылись и эти грезы писателей-фантастов!) — хотя и не родной, а скорее двоюродной (кузиной). Открытие состоялось благодаря все тому же великолепному космическому телескопу «Кеплер». Более трех лет ученые тщательно обрабатывали полученные с его помощью данные о транзитах у одной из многих наблюдавшихся звезд, прежде чем объявить об открытии 17 апреля 2014 г. [26]. Планета-кузина получила наименование Кеплер-186f. Она входит в систему красного карлика Кеплер-186, расположенного в созвездии Лебедя на расстоянии 500 св. лет от нас. Кроме планеты f, система включает еще по меньшей мере четыре планеты; все они ближе к своему солнцу, чем планета f. Почему кузина, а не сестра? Кеплер-186f — скальная планета таких же (с погрешностью в пределах десятка процентов) размеров, что и Земля; как и Земля, она находится в «зоне жизни»; однако родительская звезда существенно меньше Солнца по размерам, массе (в два раза), существенно холоднее (это красный, а не желтый карлик) и слабее Солнца по светимости

(в 25 раз!), поэтому околозвездная зона жизни компактнее: ее внешняя граница имеет радиус всего 0.4 а.е. (это радиус орбиты Меркурия). «Кузина» движется вблизи этой внешней границы; соответственно, ее орбитальный период в 3 раза меньше земного года — точнее, он равен 130 сут. Таким образом, Кеплер-186f отличается от Земли спект-

ральным составом падающего на нее излучения и продолжительностью года. Это серьезные отличия; однако сейчас, когда открытия новых экзопланет земного типа следуют одно за другим, мало кто сомневается, что со временем, и возможно очень скоро, во Вселенной найдутся и «родные сестры», и «близнецы» Земли. ■

Литература

1. *Ксанфомалити Л.В., Зеленый Л.М., Захаров А.В., Кораблев О.И.* Планетные системы ближайших звезд // Природа. 2010. №8. С.3—13; №9. С.3—13.
2. *Charbonneau D., Brown T.M., Burrows A. et al.* When extrasolar planets transit their parent stars // Protostars and Planets V / Eds B.Reipurth, D.Jewitt, K.Keil. Tucson, 2007. P.701—716.
3. *Greaves J.S., Fischer D.A., Wyatt M.C. et al.* Predicting the frequencies of diverse exoplanetary systems // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2007. V.378. P.L1—L5.
4. *Anosova J., Orlov V.V., Pavlova N.A.* Dynamics of nearby multiple stars. The Alpha Centauri system // Astron. Astrophys. 1994. V.292. P.115—118.
5. *Dumusque X., Pepe F., Lovis C. et al.* An Earth-mass planet orbiting α Centauri B // Nature. 2012. V.491. P.207—211.
6. *Sabu K.C., Casertano S., Bond H.E. et al.* Transiting extrasolar planetary candidates in the Galactic bulge // Nature. 2006. V.443. P.534—540.
7. *Marcy G., Butler R.P., Fischer D. et al.* Observed properties of exoplanets: masses, orbits, and metallicities // Progress of Theoretical Physics Supplement. 2005. V.158. P.24—42.
8. *Weiss L.M., Marcy G.W., Rowe J.F. et al.* The mass of KOI-94d and a relation for planet radius, mass, and incident flux // Astrophys. J. 2013. V.768. P.14—32.
9. *Fischer D.A., Valenti J.* The planet-metallicity correlation // Astrophys. J. 2005. V.622. P.1102—1117.
10. *Sotin C., Grasset O., Mocquet A.* Mass-radius curve for extrasolar Earth-like planets and ocean planets // Icarus. 2007. V.191. P.337—351.
11. *Шевченко И.И.* Непредсказуемые орбиты // Природа. 2010. №4. С.12—21.
12. *Чуриков Б.В.* Нелинейные резонансы и динамическая стохастичность // Природа. 1982. №7. С.15—25.
13. *Deck K.M., Holman M.J., Agol E. et al.* Rapid dynamical chaos in an exoplanetary system // Astrophys. J. 2012. V.755. P.L21—27.
14. *Попова Е.А., Шевченко И.И.* Планетная динамика в системе Alpha Centauri: диаграммы устойчивости // Письма в Астрон. журн. 2012. Т.38. С.652—659.
15. *Doyle L.R., Carter J.A., Fabrycky D.C. et al.* Kepler-16: A transiting circumbinary planet // Science. 2011. V.333. P.1602—1606.
16. *Попова Е.А., Шевченко И.И.* Kepler-16b: safe in a resonance cell // Astrophys. J. 2013. V.769. P.152—158.
17. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., 1969.
18. *Современные проблемы механики и физики космоса / Под ред. В.С.Авдеевского, А.В.Колесниченко.* М., 2003.
19. *Marov M.Ya., Kolesnichenko A.V.* Turbulence and self-organization. Modeling astrophysical objects. N.Y., 2013.
20. *Маров М.Я.* Малые тела Солнечной системы и некоторые проблемы космогонии // УФН. 2005. Т.175. №6. С.668—678.
21. *Колесниченко А.В., Маров М.Я.* // Астрон. вестник. 2014. №5. В печати.
22. *Chambers J.E.* Terrestrial planet formation // The search for other worlds / Eds S.S.Holt, D.Deming. American Institute of Physics Conference Series. 2004. V.713. P.203—212.
23. *Lineweaver C.H., Fenner Y., Gibson B.K.* The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way // Science. 2004. V.303. P.59—62.
24. *Bounama C., Von Bloh W., Franck S.* How rare is complex life in the Milky Way? // Astrobiology. 2007. V.7. P.745—756.
25. *Kasting J.F., Catling D.* Evolution of a habitable planet // Annual Review of Astron. Astrophys. 2003. V.41. P.429—463.
26. *Quintana E.V., Barclay T., Raymond S.N. et al.* An Earth-sized planet in the habitable zone of a cool star // Science. 2014. V.344. P.277—280.

CRISPR-системы: структура и гипотетические функции

А.А.Гоглева, И.И.Артамонова

Мир микробов жесток. Чтобы выжить, бактерии должны размножаться как можно быстрее. Основные ограничения на скорость деления накладывает размер генома. У прокариот он действительно относительно невелик — на несколько порядков меньше, чем у эукариот. Средний размер генома бактерии составляет около 3 млн пар оснований, и все функции, необходимые и достаточные для ее успешной и эффективной жизни, кодируются, в среднем, 3 тыс. генов. Казалось бы, избыточность генетического материала для бактерий непозволительна, однако, как выяснилось, их геномы помимо уникальных последовательностей нуклеотидов включают и небольшое число повторяющихся*. Одна из самых загадочных геномных структур — это короткие инвертированные повторы (со средней длиной 32 пары оснований), регулярно расположенные группами. Между повторами, как правило, идентичными, располагаются уникальные последовательности примерно той же длины (около 30 пар оснований) — спейсеры. Описанная структура получила название CRISPR (от англ. Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats — короткие



Анна Анатольевна Гоглева, аспирант группы биоинформатики отдела вычислительной системной биологии Института общей генетики им. Н.И.Вавилова РАН (ИОГен). Занимается изучением CRISPR-систем прокариотического иммунитета в микробиоме человека.



Ирина Игоревна Артамонова, кандидат биологических наук, руководитель группы биоинформатики ИОГен, доцент МГУ им. М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник Учебно-научного центра «Биоинформатика» Института проблем передачи информации им. А.А.Харкевича РАН. Область научных интересов — эволюционная геномика, биоинформатика, аннотация геномов.

палиндромные повторы, регулярно расположенные группами). Число повторяющихся единиц (повтор + спейсер) может достигать нескольких сотен, и CRISPR-локусы весьма широко представлены в геномах бактерий. Почему же прокариоты терпят такую, на первый взгляд, непозволительную избыточность генетического материала? Зачем нужны эти повторы и вся CRISPR-структура?

Портрет CRISPR

Впервые необычные повторяющиеся последовательности равной длины, перемежающиеся уникальными участками, были описаны в 1987 г. в геноме основного модельного организма микробиологии и молекулярной биологии — кишечной палочки (*Escherichia coli*) [1]. Чуть позже похожие структуры стали находить у многих других прокариот, причем не только у разных, филогенетически очень далеких

* Подробнее см.: *Смирнов Г.Б.* Повторы в геномах бактерий и в жизни // Природа. 2010. №4. С.3—11. — *Примеч. ред.*

друг от друга, видов бактерий, но и у архей. Среди них, например, архея *Haloferax mediterranei*, живущая в очень соленой воде Мертвого и Средиземного морей; цианобактерии рода *Anabaena*; патогенные бактерии *Mycobacterium tuberculosis* — возбудитель туберкулеза и *Streptococcus pyogenes* (вызывает многие заболевания — от ангины до разнообразных воспалений кожи и мышц у человека и других млекопитающих) [2–5]. К настоящему времени CRISPR-структуры найдены у 45% всех известных бактерий и 85% архей [6]. В геномах эукариот и вирусов ничего подобного обнаружено не было.

По мере изучения CRISPR стало понятно, что это сложная многокомпонентная система, а повторы — всего лишь малая часть CRISPR-«айсберга». Из чего же он состоит?

В первую очередь — из кассет, содержащих повторы с расположенными между ними спейсерами. Число составных звеньев (повтор + спейсер) в CRISPR-кассете может варьировать от двух до нескольких сотен. Пока рекордсменом в этом признана морская протеобактерия *Haliangium ochraceum* с 587 спейсерами в кассете [6]. Часто в геномах содержится более одной CRISPR-кассеты. Самое большое их число обнаружено в ДНК метаногенной термофильной археи *Methanocaldococcus jannaschii* — 18 кассет занимают почти 1% ее генома.

CRISPR-структуры чаще располагаются на основной хромосоме (нуклеоиде), но иногда входят в состав плазмид (маленьких кольцевых, автономно реплицирующихся молекул ДНК).

Повторы в одной кассете, как правило, строго совпадают между собой по длине (напомним, около 32 пар оснований) и последовательности нуклеотидов. Лишь последний повтор кассеты иногда отличается от канонической последовательности остальных, да и то лишь в нескольких концевых позициях.

Для повторов характерна частичная диадная симметрия — части последовательностей в начале и в конце повтора обратно комплементарны. Благодаря этому концы таких палиндромных повторов могут взаимодействовать между собой с образованием устойчивых вторичных структур, прежде всего так называемых шпильек.

Спейсеры в пределах кассеты часто равны по длине, но отличаются по последовательности нуклеотидов. Наборы спейсеров в кассетах штаммов одного вида тоже могут очень сильно различаться. Благодаря такой высокой вариабельности CRISPR, еще задолго до того, как выяснилась их роль в клетках прокариот, стали использовать для быстрого типирования штаммов известных бактерий:

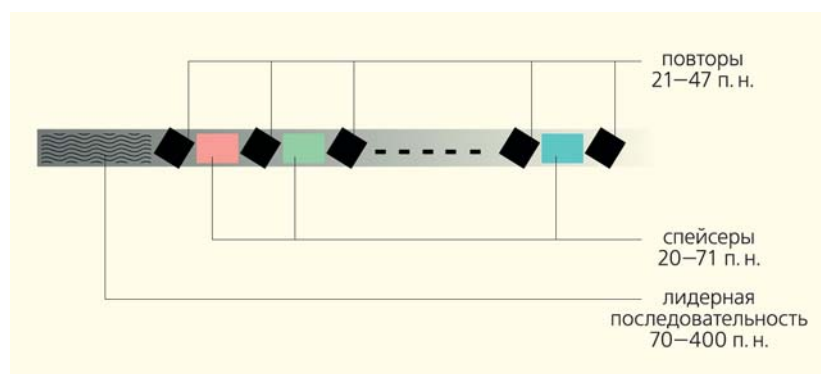


Рис.1. Основные элементы CRISPR-кассеты.

возбудителя чумы — *Yersinia pestis* [7], дифтерии — *Corynebacterium diphtheriae* [8], гастроэнтерита — *Campylobacter jejuni* [9], а также уже упоминавшихся *Mycobacterium tuberculosis* [2] и *Streptococcus pyogenes* [4].

Монотонно чередующиеся повторы и спейсеры составляют «тело» CRISPR-кассеты. Головой служит лидерная последовательность. Она часто разделяет кассету и ассоциированные с системой гены и задает направление транскрипции кассеты (рис.1). По сравнению с типичными повторами и спейсерами лидерная последовательность гораздо длиннее — до 400 пар нуклеотидов. Установлено, что лидерные последовательности не содержат открытых рамок считывания, т.е. не кодируют белки и не встречаются нигде больше в прокариотических геномах, кроме как в начале CRISPR-кассеты.

Примечательная особенность лидерных последовательностей — высокое содержание двух азотистых оснований — аденина (А) и тимина (Т). Как известно, А-Т — это уотсон-криковская пара, которая удерживается только двумя водородными связями, в то время как G-C — тремя, поэтому двухцепочечную ДНК в АТ-богатых участках легче расплести и превратить в одноцепочечную. Кроме того, в АТ-богатых регионах малая бороздка ДНК более узкая — такая топология служит характерным местом посадки для многих белков, взаимодействующих с ДНК. АТ-богатые участки часто встречаются в различных регуляторных последовательностях (например, промоторах) и точках начала репликации. Поэтому предполагают, что лидерная последовательность отвечает за регуляцию транскрипции CRISPR-кассеты, а значит и функционирования всей системы [10]. Для некоторых организмов наличие промоторов в лидерной области удалось подтвердить экспериментально.

Спейсеры, повторы, лидерная последовательность — таков обобщенный портрет геномной CRISPR-структуры (см. рис.1). Но можно ли, глядя на него, предположить, какую роль CRISPR-кассеты играют в клетке?

Гипотетические функции

Гипотеза 1: сегрегация хромосом. Для выживания прокариотам важно делиться не только быстро, но и качественно — так, чтобы генетический материал родительской клетки стабильно наследовался, т.е. правильно удваивался и равномерно распределялся между потомками.

За распределение хромосом между дочерними клетками отвечают системы сегрегации. У эукариот правильное расхождение хромосом обеспечивают центромеры — участки с особенной последовательностью и специальной структурой, соединяющие сестринские хроматиды. Прокариоты значительно проще эукариот по организации целого ряда процессов, необходимых клетке. В частности, центромер у прокариот нет. Однако выяснилось, например, что у низкокопийных бактериальных плазмид Р и F1 есть система *par*, которая служит для правильного расхождения двух копий плазмиды после репликации [11]. Важный элемент *par*-системы — итероны (рис.2). Эти короткие, тандемно расположенные повторы, собраны в область под названием *parC*, с которой связывается белок *parR*, а тот в свою очередь с *parM* и, возможно, с другими белками. Таким образом, *parC*-область представляет собой что-то вроде центра кипения, на котором, как пузырьки в чайнике, собираются клеточные белки системы сегрегации. В этом смысле принцип действия *parC* аналогичен принципу действия центромер эукариот. Как мы уже упомянули, важной особенностью этой области считается тандемное расположение повторов, что очень напоминает CRISPR-касеты.

Например, в геномах двух видов архей — *Haloferax volcanii* и *H.mediterranei* — обнаружено по несколько CRISPR-кассет общей протяженностью до 1600 пар нуклеотидов [6]. Что будет, если удалить CRISPR-касеты из клетки? Или, наоборот, увеличить (например, удвоить) их число? Оказалось, что при введении дополнительных копий CRISPR-кассет у *H.volcanii* часто наблюдаются отклонения в распределении генетического материала при делении клеток и снижается их жизнеспособность [3]. Стоит отметить, что CRISPR-касеты *H.volcanii* и *H.mediterranei* находятся в мегаплазмидах и собственно хромосомной ДНК, т.е. наиболее крупных репликалах (молекулах ДНК, копирование которых начинается с одной точки). На что может указывать такое расположение? Если CRISPR действительно работает системой сегрегации, то в основном и отвечает за правильное распределение по дочерним клеткам важных генов крупных репликалов, а расхождение мелких плазмид с несущественными для выживания генами происходит более или менее случайно. Такой гипотетический сценарий вполне соответствует тому, что мы сейчас знаем и думаем (или думаем, что знаем) о системах сегрегации репликалов у прокариот. Все эти наблюдения могут свидетельствовать в пользу участия CRISPR-локусов в расхождении хромосом.

Гипотеза 2: рекомбинация по повторам. Вторая гипотеза тоже опирается, в основном, на повторы CRISPR-системы, но учитывает не их тандемное расположение, а идентичность.

Часто повторы в геномах служат горячими точками для различных геномных перестроек.

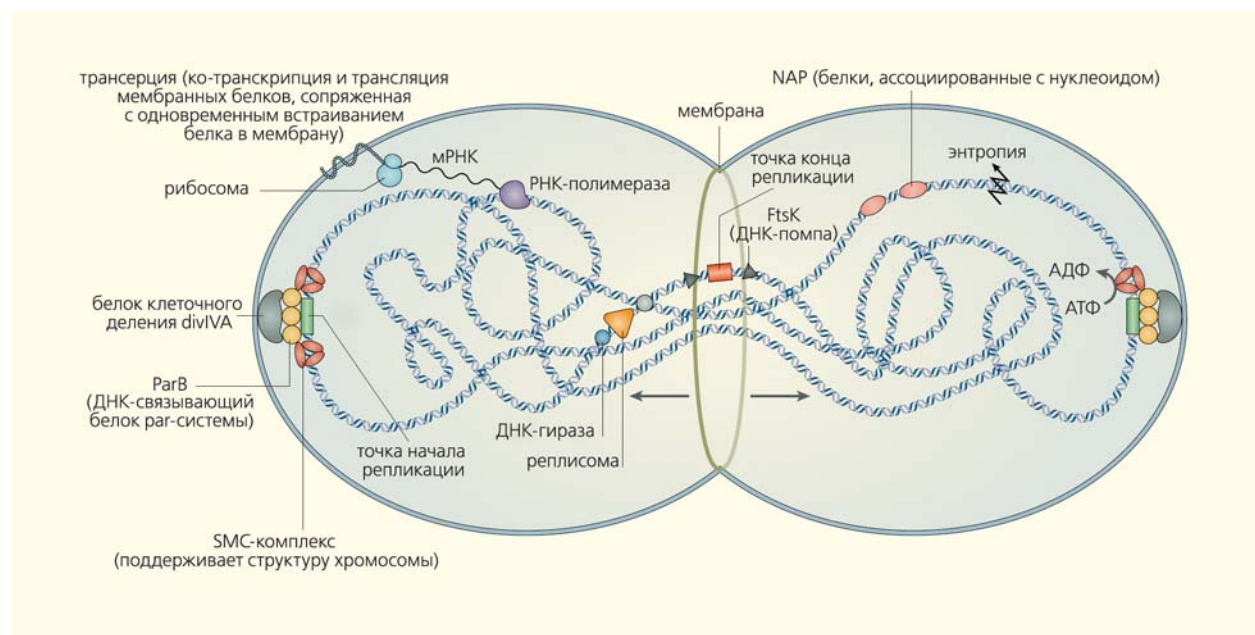


Рис.2. Пример сегрегации репликалов у прокариот (*Streptococcus pneumoniae*) с участием *par*-системы [12]. *Par*-белки формируют физическую связь между *parC*-областями репликалов и внутренней поверхностью мембраны клетки.

Это происходит благодаря рекомбинации, гомологичной или гетерологичной. В некотором смысле участки повторов в двухцепочечной молекуле ДНК напоминают застежки-липучки: одна цепь играет роль крючков, а другая — петелек. В случае CRISPR-кассеты крючки одного повтора могут зацепиться за петельки другого, при этом образуются гетеродуплексные структуры, напоминающие крест — так называемые структуры Холлидея (рис.3). Возникнув, они могут разрешиться (т.е. распутаться) только после разрезания, в результате чего формируются рекомбинантные молекулы ДНК. Часто в ходе рекомбинации происходят делеции (удаления), инверсии (переворот на 180°) и дупликации (удвоение) протяженных участков генома. Такие крупные перестройки не всегда вредны; иногда они служат источником необходимой изменчивости для эволюции и адаптации к меняющимся условиям окружающей среды [13]. Есть основания полагать, что тандемно расположенные повторы CRISPR-кассет могут быть мишенями для рекомбинации в геномах бактерий и архей. Часто наблюдаемые делеции целых групп последовательно идущих спейсеров из середины кассеты служат этому примером.

Гипотеза 3: система репарации ДНК. Прокариотический геном, как упоминалось, относительно невелик, но зато очень структурирован и чем-то напоминает книжный шкаф аккуратного человека, у которого книги по астрономии стоят на одной полке, а по садоводству — на другой. Точно так же у прокариот гены, отвечающие за какую-то одну биологическую функцию (например, защиту от теплового шока или метаболизм сахаров), нередко расположены в геноме рядом. Это очень удобно для клетки. Во-первых, такое соседство гарантирует, что белки, которые совместно выполняют данную функцию, сразу после трансляции будут находиться поблизости в клетке. Во-вторых, облегчает общую регуляцию экспрессии функционально связанных генов, что дает возможность повышать или понижать концентрацию белков одновременно, в зависимости от конкретных условий жизни клетки. Кроме того, позволяет некоторым функциональным системам распространяться в процессе горизонтального переноса. Благодаря генной колокализации зачастую можно судить о функции гена по его ближайшим соседям. Такой подход сейчас довольно успешно используется для аннотации геномов (т.е. для установления функций всех генов в прочитанном геноме).

Давайте, по тому же принципу, попробуем проанализировать функции генов, часто лежащих рядом с CRISPR-кассетами. Было обнаружено, что у организмов с этими кассетами в непосредственной близости от CRISPR-локуса располагаются гены, которых нет у организмов (даже родственных) без CRISPR-кассет, — *cas*-гены (от англ.



Рис.3. Структура Холлидея [14].

CRISPR-associated — сцепленные с CRISPR). Комбинация филогенетической сцепленности и близости расположения четко свидетельствует в пользу функциональной взаимосвязи *cas*-генов и CRISPR-кассет. Первоначально были найдены четыре таких гена (*cas1–4*). Их набор в организмах прокариот, содержащих CRISPR, сильно различается, однако у всех них встречается ген *cas1*. Судя по всему, его можно считать универсальным маркером CRISPR-систем. Какова же функция белков, кодируемых *cas*-генами?

Белок Cas1 имеет выраженный положительный заряд (поэтому может электростатически взаимодействовать с отрицательно заряженным сахарофосфатным остовом ДНК), напоминая этим свойством такие ДНК-связывающиеся белки, как, например, гистоны эукариот. При инкубации с одноцепочечной и двухцепочечной ДНК Cas1 нарежет ее на фрагменты длиной около 80 нуклеотидов, т.е. выполняет функции эндонуклеазы [15]. Cas2 расщепляет молекулы РНК, значит, обладает свойствами рибонуклеазы [16]. Cas3 относится к хеликазам, которые расплетают цепи двухцепочечной ДНК. Известно, что эти ферменты участвуют в репарации (починке) ДНК, регуляции транскрипции генов, сегрегации хромосом и перестройках хроматина. Cas4 — экзонуклеаза, отщепляющая концевые нуклеотиды молекул ДНК и РНК. Экзонуклеазы — компоненты систем рекомбинации и часто входят в состав больших белковых комплексов, например ДНК-полимераз [17].

Таким образом, выяснение функций *cas*-генов позволило только понять, что CRISPR как-то связаны с процессами различных перестроек ДНК. В частности, исследователи предположили, что CRISPR может работать системой репарации (т.е. чинить повреждения ДНК) у термофильных бактерий и архей, постоянно живущих в экстремаль-

ных условиях — при температурах более 100°C [18]. Термофилы поразительно устойчивы к действию факторов, повреждающих ДНК: ионизирующему и ультрафиолетовому излучениям, химическим мутагенам. Совершенно точно, что термофилы должны обладать очень мощной и эффективной системой репарации ДНК, однако ничего подобного в них не оказалось. На роль такой структуры была выдвинута CRISPR со всеми *cas*-генами. В пользу гипотезы, в первую очередь, говорит сходство некоторых *Cas*-белков с эндонуклеазами *RecB*, принадлежащими к *RecBCD* — основной системе рекомбинационной репарации *E.coli*. У других *Cas*-белков обнаружены домены, очень похожие на каталитические домены ДНК- и РНК-полимераз, а также хеликаз, которые тоже очень пригодились бы для репарации ДНК. Однако остается еще приличное количество белков, совершенно точно связанных с CRISPR, но функция которых пока неизвестна. Такие белки были названы RAMP (от англ. Repeat-Associated Mysterious Protein — загадочный белок, ассоциированный с повторами). Возможно, эти загадочные белки могут выступать дополнительными регуляторными ДНК-связывающими субъединицами в составе предполагаемых репарационных комплексов, а может быть из RAMP построены «скользящие зажимы» для ДНК-полимераз. Таким образом, по набору функций CRISPR-*cas*-система, казалось бы, удовлетворяет минимальным требованиям для репарации ДНК.

Гипотеза 4: противовирусный иммунитет.

В 2005 г. сразу несколько независимых исследовательских групп попробовали проанализировать спейсеры уже известных к тому времени кассет с целью понять их происхождение [19–21]. Для этого они сравнили последовательности спейсеров со всеми известными последовательностями ДНК (доступными в базе данных GenBank — основном хранилище такой информации). Оказалось, например, что спейсеры CRISPR-кассет у *Streptococcus thermophilus* и *S. vestibularis* часто совпадают по последовательности с участками генов бактериофагов (вирусов бактерий), специфичных к стрептококкам, или плазмид *S.thermophilus* и *Lactococcus lactis* [20]. Кроме того, некоторые спейсеры оказались идентичны последовательностям бактериальных геномов. При ближайшем рассмотрении выяснилось, что нередко такие спейсеры попадают на последовательности профагов — геномов умеренных бактериофагов, интегрированных в ДНК бактериальных клеток. Таким образом, складывается впечатление, что спейсеры — это что-то вроде обломков чужеродных генетических элементов, которые вторглись в прокариотическую клетку на каком-то этапе ее эволюционной истории.

Вскоре и у многих других архей и бактерий стали находить спейсеры внехромосомного происхождения. На первый взгляд они соответствуют

случайным участкам вирусных или плазмидных геномов (такие участки называли протоспейсерами). Продукты генов, содержащих протоспейсеры, задействованы в репликации ДНК, сборке вирусных частиц, в защите ДНК от рестрикции (разрезания ДНК эндонуклеазами), в переводе провирусов в спящее (интегрированное в геном хозяина) состояние и обратной их активации, в сегрегации репликалов. Все эти функции жизненно важны вирусам и плазмидам для проникновения в клетки прокариот, размножения и дальнейшего распространения.

Установление происхождения спейсеров кассет принесло больше вопросов, чем ответов: CRISPR-спейсеры — это просто кусочки вирусных геномов, застрявшие в геномах прокариот, или эта структура несет какую-то функцию? Если да, то в чем заключается эта функция и как спейсерам помогают ее осуществлять повторы, лидерная последовательность и *Cas*-белки?

Помимо внехромосомного происхождения спейсеров к 2005 г. стало известно, что:

- существует корреляция между числом спейсеров в CRISPR-касете и устойчивостью к фаговым инфекциям (у *Streptococcus thermophilus*) [20];
- механизм образования CRISPR-кассет тесно связан с *cas*-генами [22];
- CRISPR-касеты транскрибируются (у *Archaeoglobus fulgidus* и *Sulfolobus solfataricus*) с образованием малых РНК, а это значит, что CRISPR-касеты — активные компоненты генома [23].

Все эти факты навели на мысль о том, что CRISPR — это система, защищающая прокариот от вторжения вирусов и плазмид [20]. Согласно такой гипотезе, включение участков геномов мобильных элементов в виде спейсеров — не что иное, как иммунная память, которая может передаваться по наследству. Такая система должна давать своим хозяевам существенный выигрыш в приспособленности, что могло бы объяснять широкое распространение CRISPR-систем в мире прокариот.

Продолжение следует...

Так для чего же нужны CRISPR-системы? Для сегрегации хромосом, репарации ДНК, иммунной защиты от вирусов или просто они служат горячим локусом рекомбинации прокариотических геномов, предоставляя эволюции все новые и новые возможности для выбора самых приспособленных форм? Ответу на этот вопрос, а также описанию простых экспериментов, которые позволили его получить, мы посвятим вторую часть этой статьи. Кроме того, мы расскажем, что удалось выяснить о механизме действия системы после этих экспериментов, и почему CRISPR получили популярность в кругу молекулярных биологов и биотехнологов. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект №12-04-01856-а.

Литература

1. *Isbino Y., Shinagawa H., Makino K. et al.* Nucleotide sequence of the *iap* gene, responsible for alkaline phosphatase isozyme conversion in *Escherichia coli*, and identification of the gene product // *J. Bacteriol.* 1987. №169. P.5429—5433.
2. *Groenen P.M., Bunschoten E., Soolingen D. van, Embden J.D. van.* Nature of DNA polymorphism in the direct repeat cluster of *Mycobacterium tuberculosis*; application for strain differentiation by a novel typing method // *Mol. Microbiol.* 1993. №10. P.1057—1065.
3. *Mojica F.J., Ferrer C., Juez G., Rodriguez-Valera F.* Long stretches of short tandem repeats are present in the largest replicons of the Archaea *Haloferax mediterranei* and *Haloferax volcanii* and could be involved in replicon partitioning // *Mol. Microbiol.* 1995. №17. P.85—93.
4. *Hoe N.P., Nakashima K., Lukomski S. et al.* Rapid selection of complement-inhibiting protein variants in group A *Streptococcus* epidemic waves // *Nat. Med.* 1999. №5. P.924—929.
5. *Masepobl B., Gortlitz K., Bohme H.* Long tandemly repeated repetitive (LTRR) sequences in the filamentous cyanobacterium *Anabaena* sp. PCC 7120 // *Biochim. Biophys. Acta.* 1996. P.26—30.
6. *Grissa I., Vergnaud G., Pourcel C.* The CRISPRdb database and tools to display CRISPRs and to generate dictionaries of spacers and repeats // *BMC Bioinformatics.* 2007. №8. P.172.
7. *Vergnaud G., Li Y., Gorgü O. et al.* Analysis of the three *Yersinia pestis* CRISPR loci provides new tools for phylogenetic studies and possibly for the investigation of ancient DNA // *Adv. Exp. Med. Biol.* 2007. P.327—338.
8. *Mokrousov I., Limeschenko E., Vyazovaya A., Narvskaya O.* *Corynebacterium diphtheriae* spoligotyping based on combined use of two CRISPR loci // *Biotechnol. J.* 2007. №2. P.901—906.
9. *Schouls L.M., Reulen S., Duim B. et al.* Comparative Genotyping of *Campylobacter jejuni* by Amplified Fragment Length Polymorphism, Multilocus Sequence Typing, and Short Repeat Sequencing: Strain Diversity, Host Range, and Recombination Comparative Genotyping of *Campylobacter jejuni* by Ampli // *J. Clin. Microbiol.* 2003. №41. P.15—26.
10. *Sorek R., Kunin V., Hugenbholz P.* CRISPR — a widespread system that provides acquired resistance against phages in bacteria and archaea // *Nat. Rev. Microbiol.* 2008. №6. P.181—186.
11. *Schumacher M.* Structural biology of plasmid partition: uncovering the molecular mechanisms of DNA segregation // *Biochem. J.* 2008. №412. P.1—18.
12. *Pinbo M.G., Kjos M., Veening J.W.* How to get (a)round: mechanisms controlling growth and division of coccoid bacteria. // *Nat. Rev. Microbiol.* 2013. №11. P.601—614.
13. *Wilson D.J., Gabriel E., Leatherbarrow A.J.H. et al.* Rapid evolution and the importance of recombination to the gastroenteric pathogen *Campylobacter jejuni* // *Mol. Biol. Evol.* 2009. №26. P.385—397.
14. *Gopaul D.N., Guo F., Van Duyne G.D.* Structure of the Holliday junction intermediate in Cre-loxP site-specific recombination // *EMBO J.* 1998. V.17. №14. P.4175—4187.
15. *Wiedenheft B., Zhou K., Jinek M. et al.* Structural basis for DNase activity of a conserved protein implicated in CRISPR-mediated genome defense // *Structure.* 2009. №17. P.904—912.
16. *Nam K.H., Ding F., Haitjema C. et al.* A Double-stranded endonuclease activity in *Bacillus halodurans* clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR)-associated Cas2 protein // *J. Biol. Chem.* 2012. №287. P.35943—35952.
17. *Haft D.H., Selengut J., Mongodin E.F., Nelson K.E.* A guild of 45 CRISPR-associated (Cas) protein families and multiple CRISPR/Cas subtypes exist in prokaryotic genomes // *PLoS Comput. Biol.* 2005. №1. e60.
18. *Makarova K.S., Aravind L., Grishin N.V. et al.* A DNA repair system specific for thermophilic Archaea and bacteria predicted by genomic context analysis // *Nucleic Acids Res.* 2002. №30. P.482—496.
19. *Pourcel C., Salvignol G., Vergnaud G.* CRISPR elements in *Yersinia pestis* acquire new repeats by preferential uptake of bacteriophage DNA, and provide additional tools for evolutionary studies // *Microbiology.* 2005. №151. P.653—663.
20. *Bolotin A., Quinquis B., Sorokin A., Ebrlich S.D.* Clustered regularly interspaced short palindrome repeats (CRISPRs) have spacers of extrachromosomal origin // *Microbiology.* 2005. №151. P.2551—2561.
21. *Mojica F.J.M., Diez-Villaseca C., Garcia-Martinez J., Soria E.* Intervening sequences of regularly spaced prokaryotic repeats derive from foreign genetic elements // *J. Mol. Evol.* 2005. V.60. №2. P.174—182.
22. *Jansen R., Embden J.D., Gaastra W., Schouls L.M.* Identification of genes that are associated with DNA repeats in prokaryotes // *Mol. Microbiol.* 2002. №43. P.1565—1575.
23. *Tang T-H., Polacek N., Zywicki M. et al.* Identification of novel non-coding RNAs as potential antisense regulators in the archaeon *Sulfolobus solfataricus* // *Mol. Microbiol.* 2005. №55. P.469—481.

Как паразиты манипулируют своими хозяевами

Б.А.Борисов, Ю.Т.Дьяков

Биологи, изучающие паразитов из самых разных таксономических групп, давно подмечали, что паразиты порой обладают некой «расчетливой разумностью» — способностью управлять поведением хозяев в своих интересах. Подобные любопытные наблюдения из жизни насекомых можно найти в книге нашего замечательного естествоиспытателя, энтомолога и писателя П.И.Мариковского [1]. Однако долгое время публикуемые такого рода факты были разрозненными и приводились с известной осторожностью. Толчок к исследованиям в этом направлении, несомненно, дала книга английского этолога и эволюциониста Р.Докинза «Расширенный фенотип» (2011 г., оригинал — 1982 г.). Автор этой книги пишет: «Случайно ли то, что, простудившись, мы чихаем или же это вирусы манипулируют нами, чтобы повысить свои шансы попасть в другого хозяина? Не усиливают ли какие-либо венерические заболевания половое влечение — хотя бы только за счет вызывания зуда, как экстракт шпанской мушки? Увеличивают ли поведенческие симптомы бешенства вероятность дальнейшей передачи вируса? Когда собака заражается бешенством, ее характер быстро меняется. В первые день-два она часто становится более ласковой и склонна лизать людей, с которыми общается, а это опасно, так



Борис Александрович Борисов, научный сотрудник Центра паразитологии Института проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН, научный консультант-микробиолог фирмы «Агробиотехнология». Область научных интересов: микробиологическая защита растений от вредителей и болезней, искусственное культивирование грибов-паразитов беспозвоночных и грибов-антагонистов.



Юрий Таричанович Дьяков, доктор биологических наук, профессор международного биотехнологического центра МГУ им. М.В.Ломоносова, вице-президент Национальной академии микологии и Регионального общества фитопатологов. Занимается вопросами микологии, фитопатологии и иммунитета растений. Автор и соавтор 13 книг и более 300 научных статей.

как у нее в слюне уже содержится вирус. Вскоре в ней нарастает беспокойство, и она блуждает далеко от дома, готовая укусить каждого, кто попадается ей на пути» (Британская энциклопедия, 1977). Вирус бешенства делает злыми и кусачими даже нехищных животных; зафиксированы случаи заражения людей через укусы обычно безобидных крыланов. Очевидно, что укусы хорошо способствуют передаче содержащегося в слюне вируса, но помимо этого его эффективному распространению могло бы превосходно содействовать и «беспокойное блуждание» (Hamilton, May, 1977). <...> Все, что мне требуется, это установить, что в *некоторых* случаях симптомы хозяина справедливо можно рассматривать как приспособление паразита. <...> Если поведение или физиология хозяина — это адаптация паразита, то у паразита должны быть... «гены модификации хозяина», а происходящие с хозяином изменения являются, следовательно, частью фенотипической экспрессии этих генов паразита» [2, с.372, 373].

© Борисов Б.А., Дьяков Ю.Т., 2014

Эти, по выражению Докинза, «забавные примеры» и осторожные попытки их интерпретации вызвали серьезный интерес со стороны исследователей, изучающих взаимодействия паразитов со своими хозяевами и переносчиками. Сегодня по этим вопросам накоплен большой экспериментальный материал, проведено несколько международных симпозиумов, написаны обзорные статьи и даже книги [3]. В переведенной на русский язык книге известного американского научного журналиста К.Циммера «Паразит: тайный мир» отдельная глава посвящена манипуляциям, с помощью которых эти самые опасные существа на Земле управляют поведением своих хозяев. Надеемся, что такие «забавные примеры» манипуляции будут интересны и для читателей журнала «Природа».

Паразиты — простейшие, хозяева и переносчики — животные

Многие простейшие вызывают различные заболевания позвоночных животных — млекопитающих, птиц и рыб. От зараженных животных опасные паразиты чаще всего попадают к здоровым через насекомых-кровососов, в теле которых происходит циркуляция, размножение и зачастую прохождение отдельных стадий жизненного цикла простейших. Паразит при манипуляции поведением переносчика вызывает ухудшение условий его питания. В результате увеличивается частота пищевых контактов переносчика и усиливается передача паразита, но проявляется это только по достижению инфекционной фазы у паразита [4].

Малярийный плазмодий — комар — млекопитающие. Возбудитель малярии относится к простейшим из группы Alveolata — одноклеточным с апикальным комплексом, который служит для проникновения в клетки хозяина. В теле переносчиков (комаров, которые в данном случае служат и основным хозяином паразита) клетки паразита размножаются в желудочно-кишечном тракте, а затем переходят в слюнные железы, после чего комары получают возможность распространять возбудителя. Самки комаров многократно погружают стилет в ткань и заражают хозяев. Содержащийся в слюне кровососов кальций-зависимый мембранный фермент разрушает аденозинтрифосфат, необходимый для лечения ранки: тем самым обеспечивается более легкий приток крови и длительность питания. У зараженных комаров активность фермента ниже, чем у здоровых, поэтому ранки от их укусов затягиваются вдвое быстрее. Это вызывает необходимость частых «укусов» и, следовательно, заражений. Человек, в организме которого осуществляется бесполое размножение паразитов, служит промежуточным хозяином.

Трипаносома — муха цеце — млекопитающие. Сонная болезнь, или африканский трипанозомоз, вызывается простейшим *Trypanosoma brucei*. Основной хозяин паразита — человек или жвачные животные (антилопы, зебры), а переносчик — муха цеце. Существует три подвида возбудителя: *T. brucei brucei* заражает животных, *T.b.rhodesiense* вызывает родезийскую (восточноафриканскую, распространенную в саванне) сонную болезнь людей, а *T.b.gambiense* — гамбийскую (западноафриканскую), заражение которой происходит около водоемов. После того, как в Африке большие участки саванн превратили в пастбища для европейского скота, трипаносома стала вызывать тяжелые заболевания у сельскохозяйственных животных. По словам известного исследователя африканской фауны Б.Гржимека, муха цеце — последняя линия обороны саванн и их населения от экспансии животноводческих ферм.

Трипаносомы размножаются в среднем кишечнике кровососа, затем попадают в слюнные железы, где образуется форма, способная вызывать инфекцию. При питании на животном муха выделяет в ранку слюнный фермент, препятствующий свертыванию крови, и вместе с ним вносит клетки паразита. По сравнению со здоровыми инфицированными мухи производят в три раза больше пробных укусов перед началом активного питания, они значительно более прожорливы и буквально наливаются кровью. Такие особенности способствуют активному распространению паразита. Манипуляция поведением переносчика обусловлена, видимо, воздействием на его генетический аппарат. При анализе белков, синтезирующихся в головах зараженных и здоровых мух, обнаружили различия в 24 белках, включая белки теплового шока, гликолитические ферменты, сигнальные молекулы, регуляторы транскрипции. Вследствие этих модификаций снижается активность фермента апиразы в слюнных железах, что приводит к увеличению числа погружений стилета в ткань позвоночного хозяина. Паразит влияет на поведение не только переносчика, но и зараженного хозяина, запах которого становится более привлекательным для мухи цеце, а более вялое больное животное снижает шансы гибели кровососа.

Лейшмания — песчаная муха — млекопитающие. Родственница трипаносомы, паразитическое простейшее лейшмания, поражает многие виды диких и домашних млекопитающих, а у людей она не только вызывает тяжелые кожные заболевания, но и может поражать внутренние органы. Вызванное лейшманией образование пробки в глотке песчаной мухи приводит к увеличению пробных укусов (рекордно — до 11). «Гипотеза блокировки» объясняется закупоркой желудочного клапана и замедлением тока крови в средний желудок. Клапан закрывается гелеобразной массой, продуцированной паразитом, которая состоит из филаментозного фосфоглюкана (лейшмании синтезируют его и *in vitro*), формирующего

трехмерную сеть [4]. При попытках глотания такие пробки давят на стенки желудка, и клетки паразита, находящиеся в начале пробки, попадают в ранку от укуса. Кроме того закупорка клапана препятствует возврату паразита в средний желудок с током крови.

Токсоплазма — грызуны — кошачьи. Протозойный паразит токсоплазма имеет сложный жизненный цикл. Основной его хозяин — кошка. При заражении цисты паразита сначала попадают в желудок животного, потом поражают эпителий тонкой кишки, где происходит половое размножение. Образовавшиеся в кишечнике ооцисты освобождаются с фекалиями, которые грызуны поедают вместе с травой. Съедая зараженных мышей, кошки заражаются сами, и в их теле завершается жизненный цикл паразита. Он манипулирует поведением грызунов, притупляя у них природное отвращение к запаху кошачьих. Клетки паразита могут поражать зону центральной нервной системы, ответственную за возникновение страха и локомоторное поведение. Более того, кошачий запах даже привлекает зараженных грызунов, которые становятся легкой добычей хищников. Видимо, изменение реакции на запах связано с тем, что у зараженных грызунов повышается уровень дофамина, который и влияет на их поведение.

Паразитические черви — хозяева-животные

Общие принципы манипуляции заключаются в том, что паразиты делают своих промежуточных хозяев более доступной добычей для основных хозяев (как в примере с токсоплазмозом). Так, личинки трематоды *Diplostomum spathaceum*, поражая кожу рыб, продвигаются к глазам, где образуют цисты, и в результате развивается катаракта. Ослабленное зрение заставляет рыб выплывать на поверхность воды, где их съедает основной хозяин паразита — птицы.

Печеночный сосальщик размножается в желчном протоке печени крупного и мелкого рогатого скота, где производит большое количество яиц. Затем они попадают в пищеварительный тракт и освобождаются вместе с фекалиями. Их поглощает первый промежуточный хозяин — улитка, которая после инфицирования начинает выделять на поверхность слизистые шарики, привлекающие муравьев. Поедая их, муравей инфицируется и меняет свое поведение: при вечернем похолодании заползает на край листа, крепко цепляется челюстями и замирает на всю ночь. К полудню, когда потеплеет, активность муравья восстанавливается. Поскольку жвачные животные кормятся, в основном, вечером и ранним утром, они вместе с листьями поедают зараженных муравьев и инфицируются.

Некоторые нематоды меняют морфологию промежуточных хозяев, делая их более уязвими



Зараженная нематодой лягушка с лишними уродливыми конечностями. Это уродство не позволяет ей спастись от птиц и млекопитающих — основных хозяев паразита [5].



Зараженные нематодой муравьи на ветке с ягодами [6]. Их раздутые и окрашенные брюшки почти неотличимы от ягод, вследствие чего этих муравьев склевывают птицы.



Улитка, зараженная трематодой. Внедрение личинок паразита вызвало увеличение левой антенны в размерах и появление пестрой окраски, привлекающей внимание птиц [12].

ми для основного хозяина. Например, паразитическая трематода, вселяясь в головастика, нарушает формирование нормальных конечностей у взрослой особи. Зараженные лягушки могут оказаться совсем без лапок, с укороченными или, наоборот, удлинненными лапками и потому не могут спастись от птиц и млекопитающих, основных хозяев нематоды [5]. А у одного из видов

тропических муравьев нематода вызывает вздутие брюшка. Оно становится оранжевым, т.е. похожим на ягоду, которую и склевывают плодоядные птицы [6]. Интересным способом манипуляции пользуется паразитическая трематода, у которой промежуточный хозяин — улитка, а основной — птицы. Здоровая улитка светлое время суток проводит в растительной подстилке, а питаться выползает ночью. Личинки трематоды, заражая улитку, заставляют ее питаться днем. Они заползают в антенны, которые утолщаются и вытягиваются, выдавая присутствие улитки; сверкающее тело личинки просвечивается сквозь прозрачные покровы антенны, делая ее пестрой. Наконец антенна начинает вибрировать с частотой 70 колебаний в минуту, что также привлекает внимание птиц. Обычно большинство птиц улитками не питаются, но яркие, червеобразно изгибающиеся антенны улиток птицы принимают за червей или гусениц и активно склевывают их, приобретая паразита.

ранять коконы паразита от проползающих мимо насекомых.

Грибы — паразиты насекомых

Многие виды насекомых из отряда прямокрылых (саранчовых, кузнечиков и др.) нередко массово погибают (особенно при сырой погоде) от паразитического гриба *Entomophaga grylli*. Когда грибные споры попадают на поверхность тела «своих» насекомых, начинается прорастание. После этого ростковые гифы с помощью выделяемых ферментов и механического давления проникают в кутикулу хозяина (на это обычно уходит пара суток), чтобы «добраться» до жирового тела и гемолимфы. Здесь гриб приступает к «безудержному пиршеству», извлекая из «соков» насекомого необходимые для своего развития углеводы, белки, жиры, соли и другие вещества. Постепенно гриб съедает внутренности насекомого

Членистоногие — паразиты членистоногих

Очень интересный способ манипуляции поведением хозяина выработал усонгий рачок саккулина, паразитирующий на крабах. Находясь в теле самок, он кастрирует их, а у самцов подавляет выработку мужских гормонов. Такие зараженные самцы крабов приобретают родительский инстинкт и вместе с самками заботятся о яйцах паразита.

Гусеница табачного бражника, зараженная яйцами паразитической осы, перестает двигаться и питаться за день до начала выхода ее личинок из тела. Такое поведение очень важно, так как активная гусеница может сбросить и даже съесть находящихся на ее поверхности личинок. Изменения в поведении гусеницы совпадают с накоплением в ее гемолимфе октопамина (биогенного амина), который, подобно адреналину позвоночных, влияет на множество процессов (агрессию, стресс, движение, питание). Некоторые паразитические осы заставляют зараженных гусениц капустной белянки ткать специальную плотную сетку для защиты окуклившегося потомства осы от капель дождя и даже ох-



«Вершинная» болезнь прямокрылых насекомых — результат действия паразитического гриба *Entomophaga grylli*. Слева — рисунок погибшей от микоза кобылки из работы К.А.Бенуа (1928); справа — мертвые кобылки из разных мест России: из Башкирии (а; заповедник «Шульган-Таш», август 2011 г.), Московской обл. (б; Воскресенский район, июнь 2013 г.), Калужской обл. (в; июль 2011 г.), Орловской обл. (г; июль 2011 г.).

Здесь и далее фото Б.А.Борисова



Веснянка, погибшая от паразитического гриба *Zoophthora plecopteri*. Вверху — пораженная грибом особь прикрепленная к нижней стороне листа. Такие экземпляры можно найти на разных деревьях и кустарниках, на ветках, нависающих над лесными ручьями. (Заповедник «Калужские засеки», начало августа 2008 г.)

и заполняет его мицелием, из которого выделяются нейротоксические вещества. Под их действием насекомые не просто погибают где попало от истощения и отравления, но и находят последние силы, чтобы непременно взобраться на травянистые растения как можно выше. Здесь они судорожно цепляются за листья или стебли лапками и замирают. Вероятно, такие действия регулирует низкомолекулярный пептид, обнаруженный у некоторых видов зараженных насекомых, поскольку время его синтеза совпадает с началом аномального поведения. Тогда же брюшко насекомого сильно раздувается, и можно увидеть, как наружу пробивается грибной мицелий, на котором очень быстро формируются органы спороношения и новое поколение инфекционных спор. Затем созревшие споры отстреливаются с огромной силой: брюшко насекомых порой буквально разрывает на куски. При этом многие умирают с распростертыми крыльями, а часть их тела отгибается от субстрата; эта поза увеличивает зону распространения спор. Такая «вершинная» гибель прямокрылых была известна энтомологам уже давно [7]. «Заставить» вялое, больное

насекомое совершать последнее восхождение очень выгодно грибу: ведь увеличивается шанс разноса спор воздушными потоками и попадания их в «мишени» — на незараженных особей.

Насекомые из отряда веснянок (Plecoptera) большую часть жизни проводят в чистых ручьях и реках. Там из яиц, «разбрызганных» самками на поверхность воды, появляются живущие на дне личинки, но во взрослых крылатых особей они превращаются уже на суше. Хотя веснянки — плохие летуны, они все же периодически могут менять дислокацию — то сидеть на камнях или стволах деревьев, то перепархивать, удаляясь от места выплода на десятки, а то и сотни метров. Главные враги веснянок — рыбы, но есть у них и высокоспециализированный паразит — гриб *Zoophthora plecopteri*. Этот вид замечательно синхронизировал цикл своего развития с фенологией хозяев. Инфицирование грибными спорами (конидиями) происходит в водной среде, однако преждевременная гибель особей на личиночной стадии грибу невыгодна, так как конидии — сугубо воздушные споры. Гриб «позволяет» личинкам завершить свое развитие, выйти «созревшим» нимфам старшего возраста на сушу и превратиться в крылатых особей. Именно им дано совершить чуть ли не единственный в жизни коротенький полет — устремиться до ближайших деревьев или кустов в непосредственной близости от воды, сесть на нижнюю сторону листьев, прикрепиться к ним и... умереть. За считанные часы на трупах веснянок образуются миллионы конидий, которые отстреливаются с тела хозяев и в большом количестве попадают в воду, обеспечивая преемственность жизни гриба.

Еще одним примером может служить гриб *Cordyceps tuberculata* из другой эволюционной ветви — отдела сумчатых (Ascomycota). Этот вид, поражающий взрослых ночных бабочек (чаще всего совок), в нашей стране обитает во многих регионах — в уссурийской тайге, на Черноморском побережье Кавказа, в лесах различных областей (в частности, Московской и Ленинградской) европейской части. Однако найти его чрезвычайно трудно, поэтому можно ошибочно отнести к числу редких видов. Дело в том, что гриб каким-то образом «заставляет» зараженных бабочек перед гибелью подниматься высоко в кроны деревьев или искать укромный «последний приют» где-то под козырьками на скалах, т.е. в местах, труднодоступных для исследователей. В июле—сентябре высоко над землей образуются половые многоклеточные аскоспоры или одноклеточные бесполое воздушные конидии гриба, что позволяет ему гораздо эффективнее распространяться по территории леса. К тому же осенью часть спор с трупиками на облетевших листьях более скученно попадает в подстилку и в верхний слой почвы (там зимуют гусеницы или куколки многих чешуекрылых). Среди осеннего вороха и можно порой наткнуться на ста-

рые обтрепанные экземпляры этого гриба. А если нужны «тепленькие» экземпляры, то тогда, как говорится, — вперед, но примерно на месяц пораньше, да с альпинистским снаряжением!

Некоторые грибы из этой группы аскомицетов поражают тлей. Здоровая тля, почуяв опасность (например, нападение хищника), выделяет феромон тревоги β-фарнезин, который заставляет других особей уходить от опасного места. В случае заражения грибом соседи перестают реагировать на феромон тревоги, и шансы их заражения увеличиваются.

В последние годы, набрав в интернете ключевые слова «муравьи-зомби», можно найти множество сайтов, в которых с избыточно громкой сенсационностью («гипногриб», «гриб-повелитель», «захватчики разума муравья» и т.п.) преподносятся «перепевы» из недавних исследований паразитического гриба *Ophiocordyceps unilateralis*. Он поражает в тропических лесах Южной Америки и Юго-Восточной Азии муравьев рода *Camponotus*. В целом наблюдалась картина, аналогичная предыдущим примерам. Инфицированные муравьи уходили погибать в места с условиями (влажность 92–94%, температура +25±5°C), наиболее благоприятными для образования грибного потомства. Насекомые прочно прикреплялись челюстями к нижней стороне листьев растений примерно на высоте 25 см от поверхности земли, причем с северной стороны стволов деревьев. А затем из головы зараженного муравья вырастает длинная нить — строма, содержащая плодовые тела с аскоспорами гриба. В действительности оказалось, что под указанным названием гриба долгие годы скрывался комплекс «зомбирующих» близкородственных видов (это выяснилось с использованием молекулярно-генетических методов исследований), имеющих специализацию к разным видам муравьев-хозяев.

Однако подобные явления в жизни (точнее, в смерти) муравьев описаны Мариковским еще в 1977 г. в уже упомянутой книге. Наблюдение, сделанное автором в окрестностях Томска, заслуживает того, чтобы его процитировать.

«Мое внимание привлекло необычное поведение муравьев: около десятка насекомых взобрались на травинки вблизи муравейника, над самой оживленной муравьиной дорогой. Они крепко-накрепко схватились за травинку челюстями и замерли, едва пошевеливая ножками и усиками. Обычно лесной муравей не любит ползать по траве. <...> Без труда я оторвал от травинки нескольких муравьев и опустил их на муравьиную кучу. Они побродили поверху, потолкались в копошащейся куче среди своих собратьев, и снова каждый забрался на верхушку травинки. Муравьи прицепились примерно на расстоянии 10–15 см от поверхности земли. Каждый избрал для себя наиболее оживленное место: у края гнезда, над тропинкой. Я собрал несколько муравьев вместе с травинками и поло-



Прикрепившаяся к листу бабочка-совка с выросшими на ее теле конидиями гриба *Cordyceps tuberculata*. (Краснодарский край, Сочинский национальный парк, ноябрь 2008 г.)

жил в пробирку. <...> [Через три дня] все муравьи были мертвы. Ни один из них не выпустил из челюстей травинки. В сочленениях головы и груди муравьев появились странные белые полоски. Под микроскопом я узнал в них мицелий грибка. А на следующий день все муравьи покрылись обильными спорами грибка. Стало ясно: маленькие труженики леса погибли от грибковой болезни. <...> [Спустя несколько дней] на знакомом муравейнике я застал интересную картину. Всюду на травинках висели муравьи. Многие только что на них забрались. Другие уже были разукрашены полосками мицелия грибка. Третьи — покрыты пушистыми комочками спор. Поразило и то, что здоровые муравьи не остались безучастными к происходящему событию. У них в этом трудном случае проявился соответствующий инстинкт. Здоровые муравьи ползали на травинках и разыскивали забо-



Мертвый муравей на нижней стороне листа, зараженный грибом *Ophiocordyceps unilateralis*. Видна его строма, выросшая из тела насекомого. (Вьетнам, 2011 г.)

Фото А.В.Александровой

левших. С большим прилежанием муравьи-санитары снимали с трав больных и недавно погибших и несли в муравейник на съедение. <...> Но тех муравьев, которые уже покрылись спорами грибов, не трогали. Видимо, от них можно заразиться. Но как ловко грибок — давний исконный враг муравьев — изменил поведение больных насекомого ради своего процветания. Сколько потребовалось миллионов лет паразитизма, чтобы так приспособиться к своей жертве и научиться **влиять на инстинкты** этого маленького труженика леса!» [1, с.14—16]. К сожалению, из этого текста трудно понять, с каким видом грибного возбудителя столкнулся Мариковский, но отметим, что *O. unilateralis*, о котором говорилось в предыдущем примере, в России неоднократно находили по крайней мере на юге Приморского края. Нелишне отметить, что измененное поведение погибающих насекомых наблюдается не только в случаях их заражения грибными возбудителями. У гусениц чешуекрылых в годы массового размножения нередко возникают опустошительные эпизоотии от смешанных вирусно-бактериальных инфекций, которые издавна называют фла(я)шерией. Мариковский приводит пример, когда гусеницами бабочки-монашенки, обреченными на гибель от болезни с не совсем ясной этиологией, «овладевает неукротимое стремление забраться как можно выше на деревья; они собираются тысячами на вершинах деревьев, застывают в своеобразной позе и погибают». Далее автор пишет: «В процессе эволюции возникло немало приспособлений для распространения среди насекомых их врагов-невидимок. Так, некоторые грибки да, вероятно, и бактерии, размножаясь в организме насекомого, **изменяют его поведение**. <...> Весьма вероятно, что заболевшие «вершинной болезнью» гусеницы [монашенки] поэтому и забиваются на самые высокие части деревьев. Отсюда возбудителю болезни легче рассеиваться из тел погибших насекомых во все стороны, обсеменяя возможно дальше эту местность» [1, с.14].

Что еще можно добавить к этим словам, написанным выдающимся русским ученым около 40 лет назад?

Фитопатогенные вирусы и бактерии — насекомые-переносчики

В растениях большинство паразитирующих вирусов, а также многие бактерии распространяются с помощью членистоногих. Насекомые, имеющие колюще-сосущий ротовой аппарат (тли, цикадки, белокрылки, трипсы, клопы и др.), прокалывая покровы и трубочки больных растений, переносят вирусы в здоровые. Через соединенную со слюнными железами трубочку в ранку нагнетается слюна, ферменты которой разлагают сложные полимеры растительной клетки (белки, полисахариды и др.) до олиго- и мономеров, осуществляя

тем самым внекишечное пищеварение. Через другую трубочку, соединенную с пищеварительным каналом, всасывается частично уже переваренный сок растения.

По взаимоотношениям с переносчиками вирусы упрощенно делят на две группы: стилетные и циркулятивные. Первые адсорбируются на элементе ротового аппарата (стилете) и при последующем питании «счищаются» с него, заражая растение. Вторые циркулируют в теле насекомого: попадают в его желудочно-кишечный тракт и даже могут там размножаться; через стенки кишечника они переходят в гемолимфу и доставляются в слюнные железы, откуда поступают в клетки растения вместе со слюнными ферментами.

Многие исследования показали, что вирусы растений, как и описанные выше паразиты животных, могут влиять на поведение переносчиков. В частности, обнаружено, что свободные от вирусов тли посещают зараженные растения достоверно чаще, чем здоровые, на которых, напротив, больше тлей, несущих инфекцию. В специальных опытах установили, что поведение тлей изменяется в результате как прямого воздействия вируса (проявляется даже при питании очищенным вирусным препаратом), так и непрямого — вследствие изменения метаболизма зараженного растения [8].

Изучение механики прямого действия вирусов на поведение их переносчиков только началось, поэтому остановимся на непрямом действии на разнообразные источники. Тля выбирает для себя растение по его окраске, запаху и текстуре листа. Вирусная инфекция может модифицировать композицию или концентрацию некоторых летучих веществ растений. Их привлекательность показана для ячменя, свеклы, картофеля, инфицированных вирусами желтой карликовости, западной желтухи, и скручивания листьев. Состав некоторых летучих соединений у растений, содержащих фитопатогенные вирусы, известен.

Сначала тля очень быстро и многократно погружает стилет в ткань растения, забирая небольшую порцию сока, чтобы «оценить» его пищевые достоинства. При каждом уколе зараженная тля может вносить вирусные частицы в растение. Так, на листьях томатов, инфицированных вирусом пятнистого увядания, число пробных уколов самцами трипсов оказалось в три раза больше, чем на здоровых растениях.

Следующий этап питания может продолжаться длительное время (до 30 мин). Показано, что тли на листьях ячменя, содержащих частицы вируса желтой карликовости, питаются значительно дольше, чем на листьях здоровых растений.

Стилетный вирус огуречной мозаики стимулирует усиленное выделение смеси летучих веществ из листьев тыквы, чем привлекает персиковую и хлопковую тлей. Однако качество питания зараженными листьями снижается, поэтому тля быст-

ро их покидает. Такое поведение только усиливает распространение вируса, ибо он сразу после питания передается здоровым растениям.

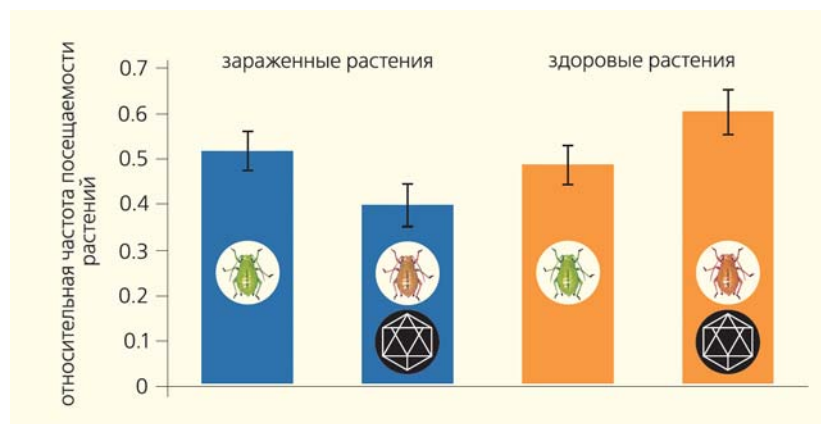
Эти разнообразные факторы обеспечивают насекомым-переносчикам быстрый рост, большую плодовитость и долгую жизнь при питании растениями, которые заражены вирусами. Следовательно, насекомые более эффективно приобретают вирусы и успешнее их переносят.

Сходное влияние на поведение насекомых-переносчиков оказывают и некоторые фитопатогенные бактерии. Так, живущая в сосудах растений фитоплазма (возбудитель тяжелого заболевания яблони), не имеющая клеточной стенки, индуцирует выделение летучих соединений β -карифиллена и метилсалицилата. Именно они привлекают переносчика бактерии — яблоневую цикадку к зараженным деревьям. А инфицированные переносчики посещают здоровые растения чаще, чем зараженные. Видимо, бактерия, находящаяся в теле цикадки, меняет восприятие привлекательного запаха таких растений на отталкивающее.

Манипуляции фитопатогенных грибов

Поскольку большинство растений прикреплены к субстрату, манипулировать их передвижением, благоприятным для распространения паразита, невозможно. Однако грибы научились влиять на морфологию и физиологию растений-хозяев, в частности адресовать потоки метаболитов в инфицированные места.

По способу питания фитопаразиты делятся на некротрофов и биотрофов. Первые обладают большим набором ферментов, разрушающих макромолекулы растений, и токсинов, убивающих их клетки. Этот набор орудий убийств они используют, чтобы погубить участки растений, которыми потом можно будет овладеть. Ведь мертвые, по выражению героя Стивенсона Билли Бонса, не кусаются. В самом деле некротрофы, потерявшие иммунные свойства, присущие живым, могут быть названы «паразитами теплого трупа», которым никакие манипуляции не нужны. Иное дело биотрофы, питающиеся содержимым живых клеток хозяина. Их задача — не убить, а, наоборот, сохранить как можно дольше зараженные клетки живыми. В отличие от некротрофов, биотрофы выделяют в ткани растения не токсичные продукты, а фитогормоны, регулирующие метаболизм растений, — индолилуксусную кислоту (гетероауксин), гиббереллины,



Влияние вируса желтой карликовости ячменя на поведение тли. Свободные от вируса насекомые посещают зараженные растения чаще, чем здоровые. На не зараженной пшеницы, напротив, больше тлей, несущих вирус [8].

цитокинины и др. Эти соединения паразиты не используют для жизни вне растений, они им нужны только для манипуляции морфо-физиологическими процессами, протекающими в зараженном растении. Под влиянием образуемых паразитами фитогормонов метаболизм растения меняется в сторону, благоприятную для их питания и развития.

Методом автордиографии на зараженных ржавчиной листьях пшеницы, которая росла в атмосфере радиоактивно меченого углекислого газа ($^{14}\text{CO}_2$), давно показано усиление притока продуктов фотосинтеза в зараженные участки растения. Радиоактивная метка концентрируется в местах, где развиваются пустулы ржавчинного гриба.

Фитогормоны паразитов часто вызывают разрастание зараженных тканей, появление опухолей, галлов и других новообразований. Галлы, возникающие под действием самых разных паразитов (миксомицетов, бактерий, грибов, нематод, клещей и насекомых) защищают их от внешних воздействий и создают им комфортные условия. Кроме того, для формирования галла растения направляют в зараженное место поток питательных веществ, которые подкармливают и паразита.

Зараженные участки растений стареют медленнее здоровых, дольше сохраняют ювенильное состояние. Листья после обрывания, как известно, быстро желтеют вследствие разрушения хлоропластов. Однако вокруг пустул возбудителя ржавчины долго сохраняются зеленые островки ювенильных клеток, снабжающих питанием паразита.

Увеличивается общая неспецифическая стойкость растительных протопластов к повреждающим воздействиям. Американской фитопатолог С.Ярвуд заражал одну половинку листа фасоли биотрофными паразитами (ржавчинными и мучнисторосяными грибами), а вторую оставлял здоровой. Затем весь лист подвергался воздействиям (высоким и низким температурам, ядовитым воздухом и др.), вызывающим повреждение и гибель



Шарообразные галлы на листьях дуба. Эти образования, возникшие под влиянием слюнных ферментов орехотворки *Cynips quercustolii*, иногда достигают диаметра 4 см; внутри них в губчатой ткани развиваются личинки. (Заповедник «Калужские засеки», август 2008 г.)

Здесь и далее фото Б.А.Борисова



Изысканные разрастания ткани отдельных листьев дуба — результат работы насекомых. (Приморский край, Лазовский заповедник, август 2001 г.)

клеток. Во всех случаях зараженные половинки листьев оказывались более стойкими, чем здоровые, и погибали лишь при более интенсивных воздействиях. Поскольку причины гибели клеток от разных воздействий различны, можно сделать общий вывод о повышении стойкости протопластов клеток зараженных растений.

Под действием паразитов формируются псевдоцветки. Имеющиеся у насекомых на усиках-антеннах рецепторы чрезвычайно чувствительны к летучим химическим веществам. Всем хорошо известны многочисленные ухищрения, с помощью которых цветковые растения привлекают к себе насекомых-опылителей. В частности, ароматы цветков существуют вовсе не для того, чтобы вызывать у нас восхищение, а для заманивания насекомых. Но гораздо менее известно, что и грибы «научились» выделять влекущие насекомых ароматы. Понаблюдайте поздней весной, в конце мая — начале июня, за побегами одного из самых распространенных наших сорняков, осота. Отдельные побеги его отстают в росте и имеют более мелкие листья, покрытые желтоватыми пятнами, в которых образуются бутылочки — спермогонии гриба. Если такой побег понюхать, можно почувствовать тонкий, приятный цветочный аромат, хотя никаких цветков на таких побегах нет и никогда не будет — они заражены ржавчинным грибом. Его весенние споры распространяются насекомыми-опылителями, а цветочный запах — обман, имитация, «придуманная» для их привлечения.

Некоторые грибы пошли еще дальше. Ржавчина резухи, или арабиса (декоративного растения из семейства капустных), не только выделяет летучие вещества с цветочным ароматом, но и вызывает сильные морфологические изменения зараженного растения. При этом увеличивается число листьев, а на сильно вытянутых цветоносах образуются не цветки резухи, а многочисленные листочки, светло-желтые от грибных структур — спермогониев, внешне напоминающие цветки лютика, относящегося к другому семейству [9]. Для привлечения насекомых-опылителей этот гриб имитирует не только запах, но и форму цветка. Также поступает и другой гриб — монилия, поражающий бруслику и чернику. Ранней весной его споры попадают на стебли и листья этих растений, которые приобретают запах цветков, появляющихся гораздо позже, и отражают ультрафиолетовые лучи так же, как и цветки. Насекомые-опылители кормятся на зараженных растениях сахаристым нектаром, выделяемым грибом, и разносят его споры.

Реальная цена манипуляций

Мы понимаем, что паразиты со сложным жизненным циклом имеют мало шансов выжить из-за высокой вероятности гибели при переходе от одного хозяина к другому. Возможные потери компен-

сируются высокой скоростью размножения паразитов (так называемая R-стратегия жизни) и способностью менять поведение хозяина в нужном для себя направлении. Однако мы не всегда можем оценить эффективность манипулирования. Например, паразиты делают своих промежуточных хозяев легкой добычей, но ведь не только для основных хозяев, в которых паразит продолжит свой цикл, а еще для других видов. В этом случае манипулирование поведением хозяина будет обесценено. Специальные эксперименты с нематодой (паразитом пресноводного окуня) показали, что уязвимость зараженных изопод (второго хозяина) повышается и для рыб, и для личинок стрекоз, но для первых — сильнее, чем для вторых. В данном конкретном примере манипулирование промежуточным хозяином повышает шансы паразита сохраниться и размножиться.

Интересные результаты получены также при изучении трансмиссии трематоды в сложном трехчленном паразитическом цикле (моллюски, рыбы и птицы). Зараженные моллюски не зарываются в грунт дна, а лежат на поверхности, становясь видимыми для рыб, которые, проглотив добычу, всплывают на поверхность водоема и попадают на обед птицам. Расчеты показали, что на каждом этапе перехода от одного хозяина к другому передача паразита у манипулированных животных выше, чем у неуправляемых, а гибель, соответственно, ниже [10].

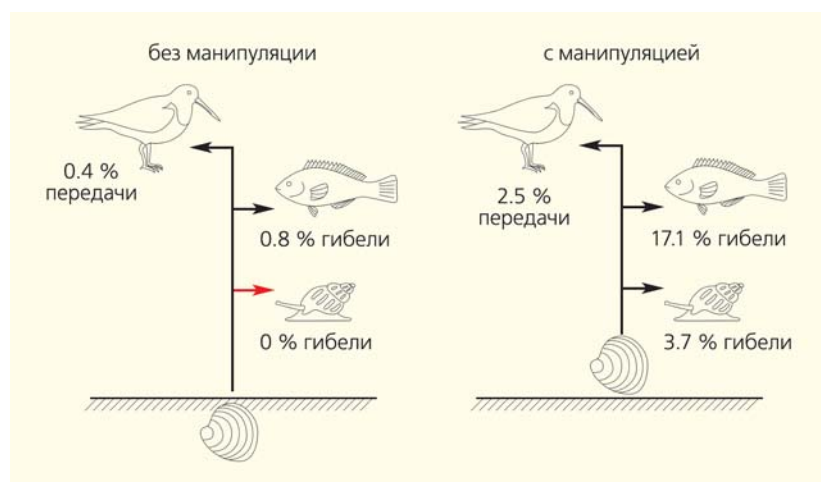


Схема возможной гибели животных-хозяев трематоды и передачи паразита в трехчленном паразитическом цикле без манипуляции поведением хозяев и при наличии манипуляций [10].

Примеров манипуляции хозяев паразитами в своих целях слишком много, чтобы считать их случайными побочными явлениями, а не продуктами эволюции паразитизма. Другое дело, что возникали они, видимо, как результат непрямого эффекта паразита. Например, трематоды секретируют в тело хозяев эндорфины и другие опиоидные пептиды, которые подавляют иммунную и нервную системы. Эти соединения играют ключевую роль в изменении поведения хозяев [11]. Вероятно, отбор на продукцию опиатов был вызван необходимостью подавить иммунный ответ на заражение, но вторичный эффект такого действия также оказался полезным. Вообще, эволюционное закрепление побочных эффектов возникших ранее процессов — обычное явление. ■

Литература

1. Мариковский П.И. Насекомые защищаются. М., 1977.
2. Докинз Р. Расширенный фенотип. М., 2011.
3. Hughes D.P., Brodeur J. Host Manipulation by Parasites. Oxford, 2012.
4. Hurd H. Manipulation of medically important insect vectors by their parasites // Annu. Rev. Entomol. 2003. V.48. P.141—161.
5. Goodman B.A., Johnson P.T.J. Disease and the extended phenotype: parasites control host performance and survival through induced changes in body plan // PLoS ONE. 2011. V.6. e2019. P.1—10.
6. Yaniviak S.P., Kaspari M., Dundley R., Poinar G. Parasite-induced fruit-mimicry in a tropical canopy ant // American Naturalist. 2008. V.171. P.436—544.
7. Бенуа К.А. Грибные болезни саранчи. Сводка литературных данных и отчет. Ленинград, 1928.
8. Ingwell L.L., Eigenbrode S.D., Bosque-Perez N.A. Plant viruses alter insect behavior to enhance their spread // Sci. Report. 2012. V.2. doi:10.1038/step00578.
9. Raguso R.A., Roy B.A. Floral' scent production by *Puccinia* rust fungi that mimic flowers // Molecular Ecology. 1998. V.7. P.1127—1136.
10. Mouritsen K.N., Poulin R. Parasite-induced trophic facilitation exploited by a non-host predator: a manipulators nightmate // Int. J. Parasitol. 2003. V.33. P.1043—1050.
11. Thomas F., Adamo S.A., Moore J. Parasitic manipulation: where are we and where should we go? // Behav. Process. 2005. V.68. P.185—200.
12. Attenbourough D. The Trial of Life. L., 1990.

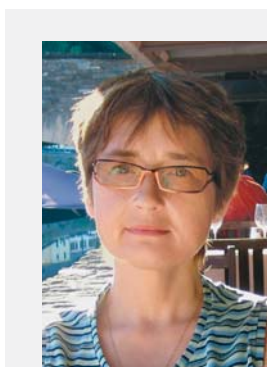
Колебания уровня моря в голоцене: взгляд с Камчатки

Т.К.Пинегина

В настоящее время существует несколько взглядов на характер колебаний уровня океана в голоцене [1–6]. Большинство ученых считают, что в интервале 5–7 тыс. лет назад он достиг максимума, который на 1–3 м превышал уровень, наблюдаемый сегодня (или примерно ему соответствовал). Ряд же исследователей полагают, что среднеголоценовый уровень понизился до современного в интервале от 4 до 2 тыс. лет назад. Вместе с тем, если сравнить кривые колебаний уровня океана, построенные для различных районов мира, то разброс данных превышает 10 м и даже наклон и направление кривых для одних и тех же промежутков времени не совпадают.

Абсолютный и относительный уровни океана

На осредненной кривой колебаний уровня океана в голоцене (рис.1), построенной по данным, которые получены для разных побережий мира, среднеголоценовый максимум вообще отсутствует (а его наличие признает большинство ученых). Дело в том что, хотя речь идет об *абсолютном* уровне океана, все имеющиеся кривые отображают *относительный*, так как они построены относительно какого-либо репера на берегу (напри-



Татьяна Константиновна Пинегина, кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). Область научных интересов — палеосейсмология, палеоцунами, активная тектоника. Неоднократно публиковалась в «Природе».

мер, тылового шва хорошо сохранившейся и точно датированной морской террасы). Эти опорные точки не остаются неподвижными. Они испытывают тектонические движения вместе с литосферными блоками, на которых располагаются. В разных геодинамических обстановках блоки земной коры движутся с разной скоростью, и направление их вертикальных перемещений также может быть различно. Таким образом, изменения уровня океана на любом побережье мира — результат наложения глобальных колебаний уровня (связанных с оледенениями и межледниковьями) и локальных тектонических движений [7]. Построенные кривые поэтому показывают изменения относительного уровня для отдельно взятых районов. Кривая же, отражающая глобальные колебания абсолютного уровня океана, весьма условна. Итак, в районах с наиболее активными тектоническими процессами относительные колебания уровня океана (относительно побережья) могут совершенно не совпадать с абсолютными колебаниями.

На территории России наиболее тектонически активные районы — п-ов Камчатка и Курильские о-ва. Они расположены вдоль зоны субдукции, где Тихоокеанская литосферная плита погружается под Евразийскую со средней скоростью около 8 см/год. В рельефе морского дна зонам субдукции соответствуют глубоководные желоба. Здесь происходят наиболее сильные землетрясения. Для побережий, расположенных вдоль таких зон, характерны резкие и медленные вертикальные разнонаправленные движения, которые связаны с косейсмическими (образованными во время землетрясения) деформациями, постсейсмической релаксацией и интерсейсмическим накоп-

лением напряжений [8, 9]. Подобные движения приводят к тому, что колебания относительного уровня океана могут существенно различаться даже для близкорасположенных участков побережий. Однако тектонические движения здесь не хаотичны, они подчинены определенным закономерностям.

Согласно геодезическим, а в последнее время и GPS-данным, сильные межплитные землетрясения вызывают вертикальные косейсмические деформации на побережьях, расположенных даже в нескольких сотнях километров от глубоководных желобов. Наблюдения, проведенные после некоторых крупнейших исторических землетрясений (например, Чилийского 1960-го года с $M_w = 9.5$; Аляскинского 1964-го с $M_w = 9.2$; Индонезийских 2004-го с $M_w = 9.5$ и 2005-го с $M_w = 8.6$; Японского 2011-го с $M_w = 9.1$ и др.) показали, что земная поверхность над ближайшей к желобу частью очага (на взброшенном крыле) во время субдукционного землетрясения поднимается. В то же время область, которая находится ближе к вулканической дуге (над более глубокой частью очага), опускается. Амплитуды зарегистрированных на побережьях в историческое время эпизодов косейсмических поднятий достигали 4–6 м, амплитуды опусканий составляли 1–2 м [9]. На фоне таких резких тектонических движений морские аккумулятивные террасы на побережьях также периодически опускались и размывались, либо выдвигались и выдвигались в сторону моря. В первом случае относительный уровень океана резко повышался, во втором — резко понижался.

Береговые линии: древние и современные

На протяжении последних 20 лет на камчатском побережье проводились исследования по восстановлению параметров (величины вертикальных и горизонтальных заплесков и повторяемости) голоценовых цунами. Для этого (помимо других задач) следовало восстановить пространственное положение древних береговых линий в различные моменты времени относительно современно-го уреза воды [10, 11].

За счет приливно-отливных и штормовых флуктуаций уровень океана нестабилен, и под береговой линией подразумевается верхняя граница

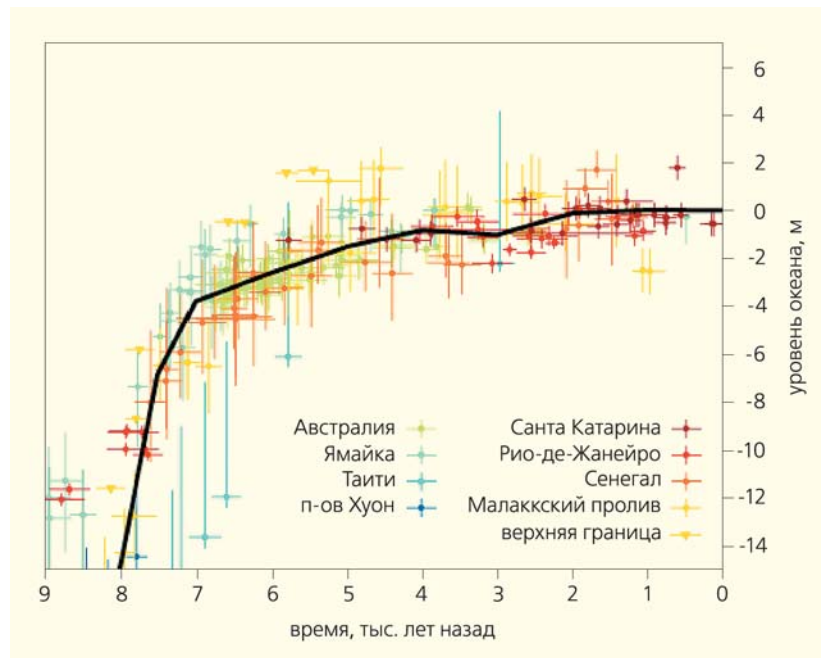


Рис.1. Изменение уровня океана в голоцене для разных районов мира. Погрешность определения показана разноцветными точками с «усами». Жирная линия — осредненная методом наименьших квадратов кривая изменения уровня океана (<http://www.globalwarmingart.com>).

активного пляжа, в пределах которого формируется береговой вал. Его высота зависит от волновой энергии, воздействующей на побережье. Серия разновозрастных береговых валов, последовательно приращенных друг к другу, образует аккумулятивную морскую террасу. Высотное положение верхней границы активного пляжа в разные моменты времени может быть различным и контролируется относительным уровнем океана.

Заращение песчано-галечной поверхности берегового вала густой растительностью и появление на ней почвенного профиля означают, что береговой вал вышел из зоны штормовой досягаемости и стал реликтовым (неактивным). В геологическом разрезе окончанию процесса формирования вала соответствует граница между морскими и перекрывающими их субаэральными отложениями; пространственное положение берегового вала определенного возраста дает нам примерное положение верхней границы активного пляжа.

Определение верхней возрастной границы формирования морских террас (т.е. собственно, береговой линии) проводилось с помощью метода тефрохронологии — по маркирующим горизонтам вулканических пеплов (тефры), залегающих в самом основании почвенного чехла, непосредственно над морскими отложениями. При извержении вулкана пепел плащом покрывает огромную территорию и образует четкий горизонт, который можно проследить на большие расстоя-

ния (от сотен до нескольких тысяч километров). Практически каждый слой тefры обладает уникальным набором свойств (цветом, размерностью, минералогическим составом и составом стекла и др.), позволяющим идентифицировать его в геологических разрезах [12, 13]. Точность определения возраста тefры зависит от точности радиоуглеродного датирования вмещающей ее органики. Погрешность в возрасте обычно не превышает ± 100 лет, а иногда — ± 30 лет.

Характер поперечного профиля морских террас (наличие лестниц, плавное повышение или понижение в сторону суши и др.) зависит главным образом от того, в каком направлении и как (постепенно или импульсами) менялся относительный уровень океана.

Таким образом, изучая распространение морских террас вдоль побережья (в данном случае речь идет прежде всего об аккумулятивных террасах), определяя их возраст, измеряя высоты можно выявить тектоническую составляющую в их формировании. Главное при этом — восстановление положения древних береговых линий относительно современной в различные моменты времени.

Наблюдения и модели

На Камчатке максимальный абсолютный уровень океана в голоцене был 5.5—6.5 тыс. лет назад [10, 14, 15]. К этому времени относится формирование лагун (в результате подтопления берега морем) почти по всему берингоморскому побережью Камчатки, расположенному к северу от зоны субдукции и тектонически более стабильному. Судя по тому, что в настоящее время кровля лагунных отложений здесь находится практически на современном уровне ($\pm 1-2$ м), существенных колебаний абсолютного уровня океана в среднем—позднем голоцене не происходило. Следовательно, короткопериодные крупноамплитудные (в несколько метров) колебания относительного уровня океана на побережьях, расположенных вдоль зоны субдукции, — результат вертикальных тектонических движений.

Наличие косейсмических деформаций на побережье Камчатки находит подтверждение прежде всего в разновысотности и «ступенчатости» голоценовых морских террас (рис.2) [10]. На рисунке видно, что побережья полуостровов в целом воздымаются, в то время как берега крупных заливов опу-

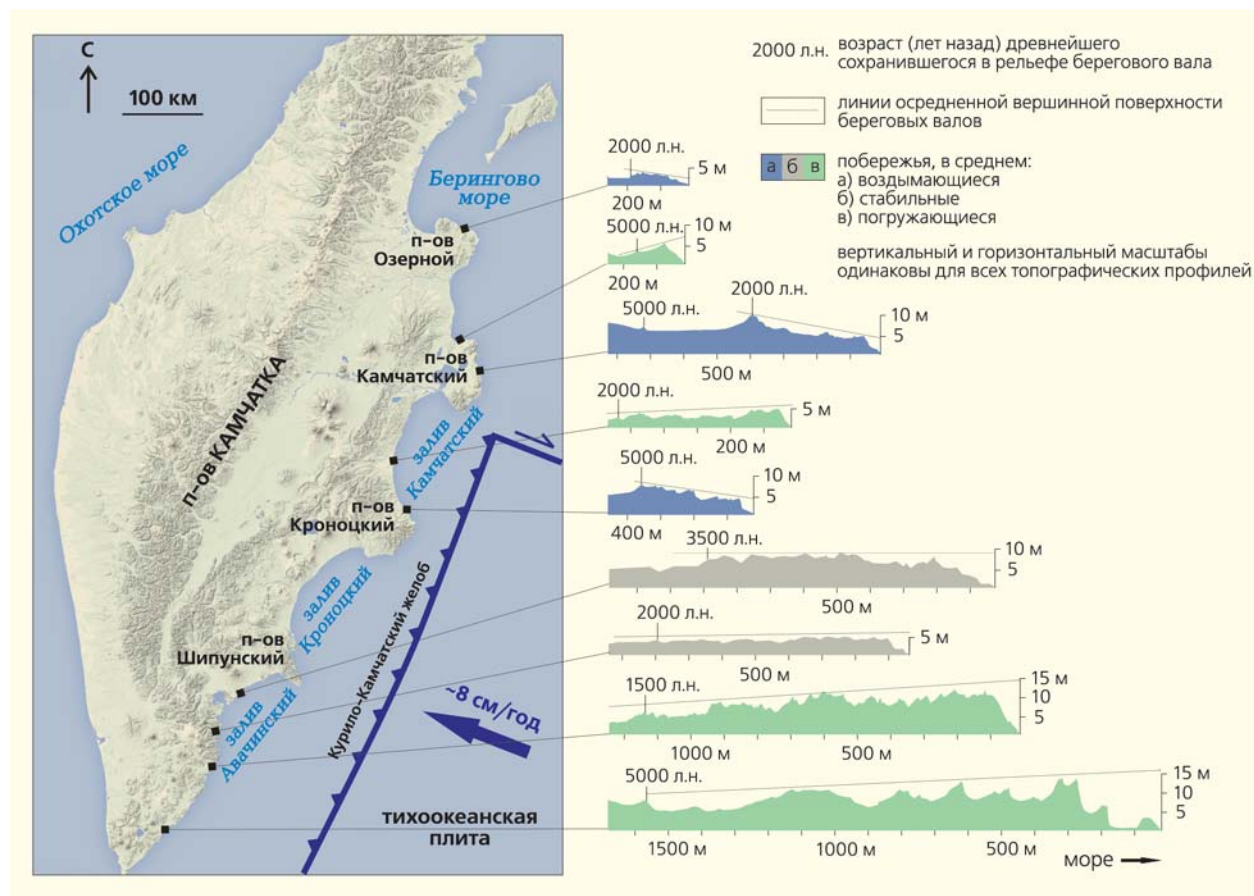


Рис.2. Примеры топографических профилей, проведенных через морские террасы в разных районах восточного побережья Камчатки.

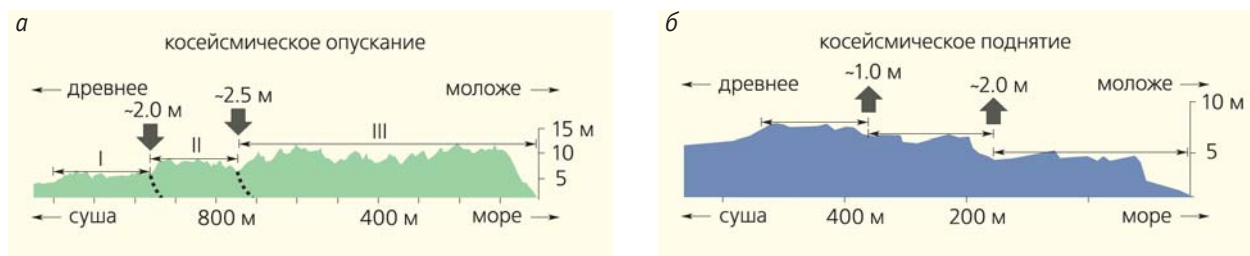


Рис.3. Топографические профили побережий, периодически подвергающихся косейсмическим опусканиям (на примере бухты Мутной, южная Камчатка, а) и косейсмическим поднятиям (на примере п-ова Кроноцкий, б). Стрелки с цифрами показывают направления и примерную амплитуду косейсмических деформаций. Пунктиры соответствуют положению погребенных уступов размыта, образованных после опускания побережья.

скаются или остаются относительно стабильными. Поднятия и опускания могут сменять друг друга в разные периоды сейсмического цикла (во время накопления напряжений и во время их реализаций в виде подвижек по мегаразлому, который, по сути, и представляет собой зона субдукции). Кроме того, во многих случаях на восточном побережье Камчатки в рельефе не сохранилось морских террас возрастом около 5–6 тыс. лет, широко представленных вдоль тектонически-стабильных (пассивных) континентальных окраин. Отсутствие среднеголоценовых террас указывает на этапы значительного размыва, даже если сейчас на побережье происходит аккумуляция. Чередования аккумуляции и размыва свидетельствуют в пользу быстрых разнонаправленных тектонических движений.

Анализ топографических профилей и геолого-геоморфологического строения береговых валов, составляющих аккумулятивные морские террасы вдоль восточного побережья Камчатки и Курильских о-вов, показал, что эти районы в среднем—позднем голоцене неоднократно испытывали косейсмические поднятия и опускания с амплитудами до нескольких метров.

При поднятиях на побережье образуются видимые формы рельефа — ступени морских террас, которые можно датировать и непосредственно изучать, а идентификация опусканий (т.е. относительного поднятия уровня океана), с геологической точки зрения, гораздо сложнее (рис.3).

Упрощенно, схема развития побережья представляется такой: после опускания размываются береговые валы и формируются новые, перекрывающие старые. Спустя некоторое время (до нескольких десятков лет) на берегу устанавливается новый профиль равновесия. Размыв прекращается, и проградация (выдвижение в сторону моря) берега возобновляется (при достаточном количестве наносов). Если вкрест простирается молодого и более древнего вала проложить канаву, то в ее стенках будут видны часть древней террасы с перекрывающей ее почвой и молодой наложенный штормовой вал, залегающий несогласно по отношению к предыдущему валу. Место сочленения валов соответствует *погребенному уступу размыва* (рис.4).



Рис.4. Погребенный уступ размыва, вскрытый шурфом на морской аккумулятивной террасе. 1 — погребенная почва в кровле древней части террасы; 2 — молодые штормовые отложения, сформированные при размыве морской террасы после косейсмического опускания; 3 — отложения верхней части активного пляжа, образованные после размыва и возобновления аккумуляции. Стрелками показан собственно погребенный уступ размыва древней части террасы.

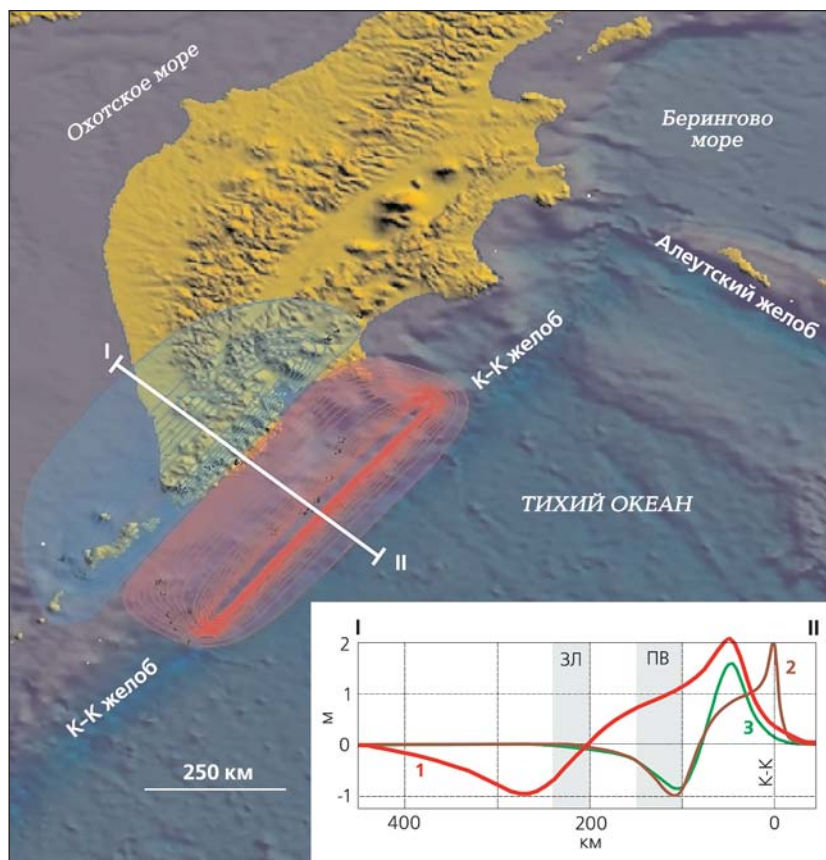


Рис.5. Модели деформаций земной поверхности на суше и на дне в очагах землетрясений. Вверху — в плане, в модель заложены параметры Камчатского землетрясения 1952 г., полученные в результате инверсии записей цунами на удаленных станциях (в варианте постоянной подвижки по площадке очага) [18]. Красная область соответствует деформации поднятия, синяя — опускания. Внизу — деформации в разрезе по линии I—II. Кривая 1 соответствует очагу 1952 г., 2 и 3 — очагам гипотетических землетрясений. Параметры очагов, заложенные в модель: 1 — длина 600 км, ширина 200 км, глубина 22.6 км, падение 13°, простираение 214°, величина подвижки (slip) 5 м; 2 — глубина 5 км, ширина 100 км, остальные параметры как в (1); 3 — ширина 50 км, остальные параметры как в (1). К-К — Курило-Камчатский желоб, ПВ — положение полуостровов Камчатки на разрезе (100—150 км от желоба); ЗЛ — положение заливов Камчатки на разрезе (200—240 км от желоба).

Ось Курило-Камчатского желоба протягивается в 100—240 км от побережья Камчатки и Курильских о-вов. За время сейсмических наблюдений самое сильное землетрясение произошло напротив южной Камчатки 5 ноября 1952 г. Ретроспективно его магнитуда M_w оценена в ~9—9.2 [16].

Для выяснения параметров очагов, при которых следует ожидать заметных (с геологической точки зрения) косейсмических деформаций на побережье Камчатки, проводилось компьютерное моделирование деформаций земной поверхности по методике японского исследователя Ю.Окада [17]. В модель были заложены параметры очага события 1952 г. [18] и еще двух гипотетических землетрясений. Полученные модели деформаций морского

дна и суши весьма приближены. Они не учитывают гетерогенность и мультисегментность разрывов, разную величину подвижек по отдельным сегментам. Однако они дают представление об общих тенденциях вертикальных движений берегов. В зависимости от ширины площадки очага землетрясения один и тот же район побережья может опускаться, подниматься или оставаться стабильным (рис.5).

Обращает на себя внимание то, что наиболее удаленные от Курило-Камчатского желоба побережья крупных заливов (Камчатского, Кроноцкого, Авачинского), а также острова Шумшу и Парамушир, по-видимому, во время самых сильных событий с широкими (150—200 км) очаговыми зонами могут испытывать косейсмические опускания (см. рис.5). Одновременно с этим восточные полуострова — Шипунский и Кроноцкий, наиболее приближенные к Курило-Камчатскому желобу, могут подниматься.

При землетрясениях с более узкими (50—100 км) очагами на побережье этих полуостровов следует ожидать косейсмических опусканий. Вместе с тем, там сохранились морские плейстоценовые террасы, свидетельствующие об общем (результатирующем) тектоническом поднятии территории. Модель (см. рис.5) показывает, что поднятие полуостровов может обеспечиваться за счет суммарного эффекта от косейсмических поднятий по сценарию землетрясения 1952 г. с очаговой зоной шириной 200 км.

Полученные результаты моделирования хорошо согласуются с геологическими данными. В центральных частях заливов не сохранилось плейстоценовых морских террас. Там также нет и голоценовых морских террас возрастом ~5—6 тыс. лет (время стабилизации абсолютного уровня океана). Как правило, возраст голоценовых террас здесь не более 2—3.5 тыс. лет (см. рис.2). Побережья же заливов несут геолого-геоморфологические признаки опусканий.

Судя по модели, побережье южной Камчатки может периодически испытывать как косейсмические опускания, так и поднятия. Это также хорошо

согласуется с полевыми наблюдениями. Для южной Камчатки характерен контрастный прибрежный рельеф с высокими береговыми валами, глубокими межваловыми понижениями и общим наклоном рельефа в сторону суши (рис.2, 3,а). Такой рельеф свидетельствует о крупноамплитудных разнонаправленных вертикальных движениях в разные периоды сейсмического цикла и об общем (результатирующем) опускании. В пользу последнего свидетельствует также отсутствие на юге полуострова плейстоценовых морских террас, которые встречаются на выступающих полуостровах восточной Камчатки [10, 19–20].

* * *

Приведенные данные показывают, как бывает необоснованно использовать в локальном районе осредненные региональные кривые колебаний уровня океана или кривые, взятые из других областей. Если в тектонически стабильных регионах локальные колебания уровня и могут быть незначительными на фоне глобальных изменений абсолютного уровня океана, то в районах, где протекают активные тектонические процессы, глобальные изменения уровня океана не значительны по сравнению с относительными колебаниями. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 12-05-00712а.

Литература

1. Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г. Берега. М., 1991.
2. Селиванов А.О. Изменение уровня Мирового океана в плейстоцене-голоцене и развитие морских берегов. М., 1996.
3. Douglas B.C., Kearney M.S., Leatherman S.P. Sea Level Rise: History and Consequences. San Diego, 2001.
4. Peltier W.R. On eustatic sea level history: Last Glacial Maximum to Holocene // Quaternary Science Reviews. 2002. V.21. P.377–396.
5. Woodroffe S.A., Horton B.P. Holocene sealevel changes in the Indo-Pacific // Journal of Asian Earth Sciences. 2005. V. 25. P. 29–43.
6. Gebrels R. Sea-level changes since the Last Glacial Maximum: An appraisal of the IPCC Fourth Assessment Report // Journal of Quaternary Science. 2010. V. 25. P. 26–38.
7. Chen Y.-G., Liu T.-K. Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan // Quaternary Science Reviews. 2000. V.19. P.923–930.
8. Meyers R.A., Derald G., Harry M. J. et al. Evidence for eight great earthquake-subsidence events detected with ground-penetrating radar, Willapa barrier, Washington // Geology. 1996. V.24. P.99–102.
9. MacCalpin J.P. Paleoseismology / International Geophysics series. 2009. V.95.
10. Пинегина Т.К., Кравчуновская Е.А., Ландер А.В. и др. Голоценовые вертикальные движения побережья полуострова Камчатский (Камчатка) по данным изучения морских террас // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. №1. Вып.15. С.231–247.
11. Pinegina T.K., Bourgeois J., Kravchunovskaya E.A. et al. A nexus of plate interaction: Segmented vertical movement of Kamchatsky Peninsula (Kamchatka) based on Holocene aggradational marine terraces // The Geological Society of America Bulletin. 2013. V.125. P.1554–1568.
12. Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. The ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia // Bull. Volcanol. 1995. V.57. №6. P.383–402.
13. Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., et al. Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 1997. V. 47. P.125–139.
14. Pinegina T., Bourgeois J., Bazanova L., et al. Millennial – scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy bay coast, Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 2003. V.59. P.36–47.
15. Bourgeois J., Pinegina T.K., Ponomareva V.V., Zaretskaia N.E. Holocene tsunamis in the southwestern Bering sea, Russian Far East, and their tectonic implications // GSA bulletin. 2006. V.118. P.449–463.
16. MacInnes B.T., Weiss R., Bourgeois J., Pinegina T.K. Slip Distribution of the 1952 Kamchatka Great Earthquake Based on Near-Field Tsunami Deposits and Historical Records // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V.100. P.1695–1709.
17. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // The Geological Society of America Bulletin. 1985. V.75. P.1135–1154.
18. Johnson J. M., Satake K. Asperity distribution of the 1952 great Kamchatka earthquake and its relation to future earthquake potential in Kamchatka // Pure Appl. Geophys. 1999. V.154. P.541–553.
19. Pedoja K., Authemayou C., Pinegina T. et al. Arc-continent «collision» of the Aleutian-Komandorsky arc into Kamchatka: insight into Quaternary tectonic segmentation through Pleistocene marine terraces and morphometric analysis of fluvial drainage // Tectonics. 2013. V.32. P.827–842.
20. Pedoja K., Bourgeois J., Pinegina T. et al. Does Kamchatka belong to North America? An extruding Okhotsk block suggested by coastal neotectonics of the Ozernoi Peninsula, Kamchatka, Russia // Geology. 2006. V.34. P.353–356.

Паратуризм в заповедниках России

И.В. Андреева



Наша страна привлекает путешественников — как отечественных, так и зарубежных — своими просторами, природным многообразием и немалым количеством нетронутых цивилизацией мест.

Последние, заботливо облакаемые государством в форму заповедников (а с конца XX в. — и национальных парков), влекут туристов первозданной природой, концентрированным биологическим и ландшафтным разнообразием. Качества эти сохранены благодаря уникальной российской заповедной системе, передавшей свои традиции и молодым национальным паркам. Консерватизм системы многие десятилетия оберегал охраняемые территории от любого использования, за исключением научного изучения. Сегодня границы заповедников постепенно открываются миру, охраняемые зоны включаются в процесс туристического освоения.

Не все в этом процессе однозначно, и к радости будущих открытий примешивается тревога за сохранность бесценных природных сокровищ. По-видимому, потребуются новые природоохранные технологии. Какие?

Следствие важных обстоятельств

Вряд ли кто оспорит уникальность и уязвимость заповедных ландшафтов. Неслучайно в понятии «охраняемые природные территории» появилось слово «особо». В свете последних глобальных климатических событий и региональных экологических катастроф, вызванных деятельностью человека, очевидно, что необходим щадящий (экологичный) подход к природе, и в первую очередь — при организации туризма и отдыха на заповедных территориях.

Заповедники — национальное и всемирное природное достояние. Это требует их открытости и доступности для всех категорий людей, в том числе для лиц с ограниченными возможностями. В последнее десятилетие туризм становится все более популярным среди инвалидов. Подсчитано, что в Великобритании путешествуют 37% маломобильных граждан, в Германии — до 53%. Российской статистики не существует. Но эксперты туристического рынка говорят об интенсивном увеличении числа путешествующих инвалидов, а также о смещении географических центров инвалидного туризма (паратуризма) в сторону природных территорий. В Приморском крае, Тверской, Омской и Челябинской областях, Башкирии, Алтайском крае, Республике Алтай и других субъектах РФ туристы-инвалиды (в их числе и дети) совершают водные, пешие и горные походы, участвуют в туристических соревнованиях и слетах.

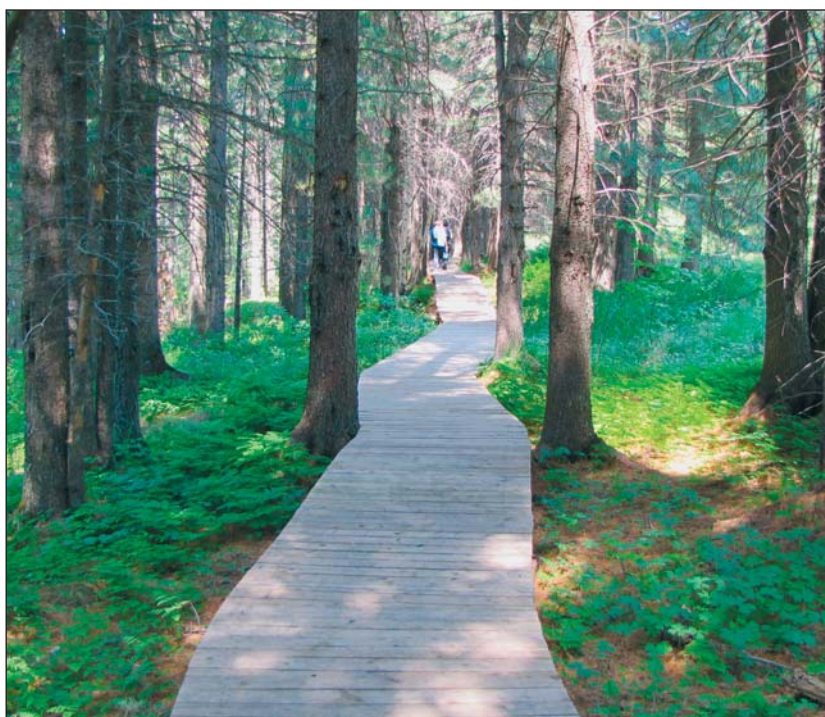
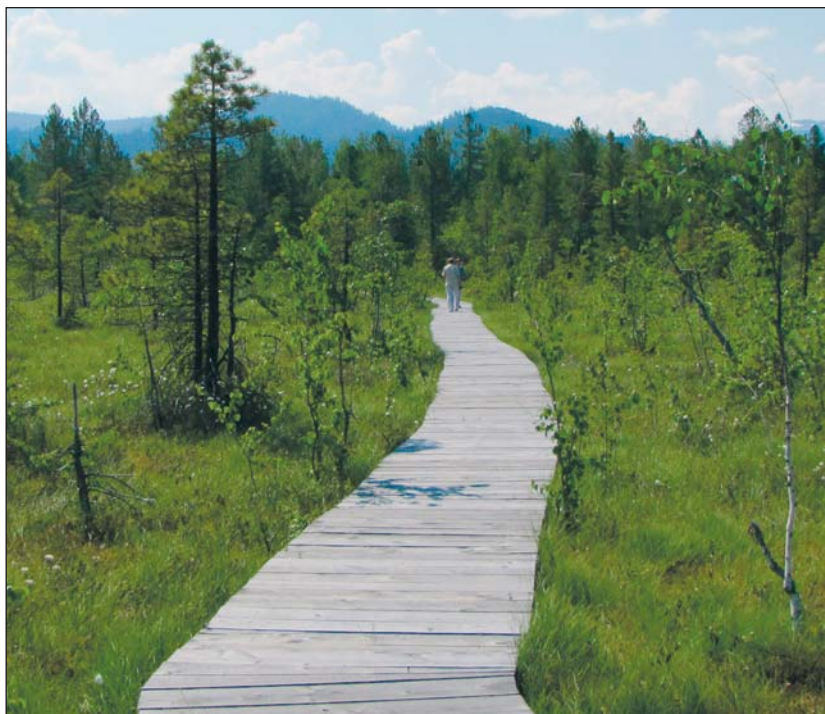
© Андреева И.В., 2014



Ирина Владимировна Андреева, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН (г.Барнаул). Специалист в области экологии, охраны природы и рекреационного природопользования.

В 2012 г. Россия вступила во Всемирную торговую организацию. Одно из главных последствий такого шага для всех отраслей отечественной экономики — необходимость соответствия мировым стандартам. Для экологического туризма это означает создание специальной инфраструктуры и адаптацию маршрутов для разных категорий граждан — так, как это принято в зарубежных национальных парках. Пока же подавляющее большинство российских заповедников и национальных парков (впрочем, как и многие населенные пункты) недоступны для людей с ограниченными возможностями [1]. Зато на тех заповедных территориях, которые создают хотя бы минимальные условия доступности для инвалидов, отмечается рост количества посетителей. Так происходит из-за скудного выбора мест отдыха, доступных людям с ограниченными возможностями: понравившиеся места такие туристы зачастую посещают многократно и рекомендуют их другим.

Инвалиды физиологически ограничены в передвижении. Они менее активны по сравнению со здоровыми людьми, предпочитают небольшие коллективы и избегают длительных путешествий. Чаще всего для передвижения по природным маршрутам маломобильным туристам необходимы специально подготовленные поверхности и обустроенные тропы. Отсюда следует, что визиты паратуристов — в сравнении с посещениями обычных отдыхающих — не нанесут вреда почвам, растительности и другим компонентам заповедных территорий. Более того, элементы обустройства маршрутов, такие как места для стоянок и отдыха, информационные аншлаги, но самое главное — тропы, изначально предназначенные для «особых» путешественников, могут быть основой всей туристической инфраструктуры. Со-



Байкальский заповедник. Тропа с деревянным настилом, участки «Болотная экосистема» (вверху) и «Кедровая аллея» (внизу).

Здесь и далее фото автора

здание таких элементов поможет повысить общее число посетителей и одновременно снизить негативные воздействия на охраняемые ландшафты [2]. Выходит, что природный паратуризм — это новый экологический феномен.

нальные парки» на практике оформилось в конкретные территориальные объекты: заповедники Байкальский (Республика Бурятия) и Тигирекский (Алтайский край), сотрудников которых мы благодарим за содействие в проведении исследований.

Обобщение этих обстоятельств, только на первый взгляд кажущихся весьма далекими друг от друга, привело к выводу: высокая экологическая дружелюбность паратуризма по отношению к особо охраняемым природным территориям позволяет им развивать его как базовое направление туристической деятельности.

Замечу, что попытки отыскать в географической научной литературе какие-либо теоретические разработки в области природного туризма инвалидов как досугового направления их деятельности не дали результата. Медицина, социология, психология, педагогика рассматривают этот вид туризма в контекстах своих отраслей. Поэтому для дальнейшего более глубокого и систематизированного рассмотрения феномена потребовалось углубиться в вопросы разработки видов природного паратуризма, категорий участников, его терминологии и классификации, специальной оценки природных территорий для разных видов паратуризма, а также оценки особенностей его воздействия на природные комплексы. Но, оставив в стороне теоретические выкладки [1, 2], обратимся все же к практической стороне вопроса. Ее суть сводится к подтверждению и уточнению теоретических выводов путем проведения тестовых волонтерских походов, а также к разработке конкретных паратуристических маршрутов в заповедниках и национальных парках.

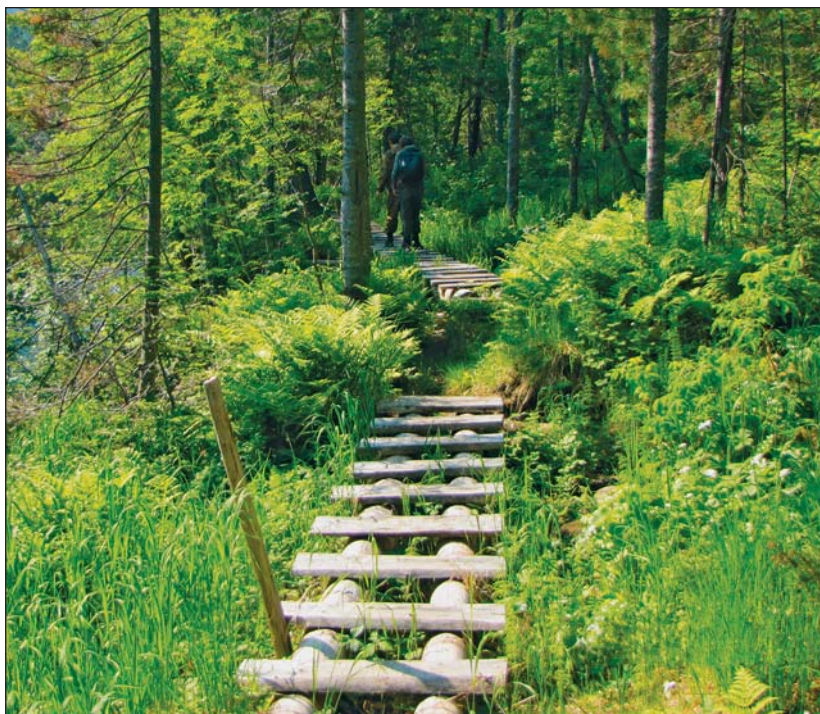
В нашей стране 101 заповедник и 41 национальный парк. Но анализ их интернет-сайтов показал, что лишь единицы приглашают к себе туристов-инвалидов и разработали для них специальные маршруты! Постепенно первоначальное расплывчатое понятие «заповедники и национальные парки» на практике оформилось в конкретные территориальные объекты: заповедники Байкальский (Республика Бурятия) и Тигирекский (Алтайский край), сотрудников которых мы благодарим за содействие в проведении исследований.

Важно отметить, что цель настоящего исследования — не попытка сравнения территорий и деятельности двух совершенно разных во многих аспектах заповедников. В статье рассмотрено лишь одно из возможных направлений экологического туризма — природный паратуризм, а также приведены результаты тестовых походов по заповедным территориям: описаны пройденные маршруты, отмечены положительные моменты и показаны перспективы развития паратуризма. Эти данные могут быть полезными как заповедникам в их экотуристической деятельности, так и путешественникам, планирующим свои походы самостоятельно.

Байкальскими тропами

Здесь позволю себе представить волонтеров — участников тестовых походов. Никита Андреев — шестнадцатилетний компьютерный гений и эрудит. Слабое зрение — 0.1 с коррекцией — основание отнесения его к категории слабовидящих паратуристов. Светлана Циликина — талантливый картограф, при этом человек с букетом профессиональных и генетических болезней — принадлежит к категории паратуристов с заболеваниями внутренних органов [2]. С желанием быть полезными обществу и в надежде на научный прорыв в экологическом туризме мы организовали и провели несколько тестовых походов в сибирских заповедниках.

В числе очень и очень немногих, реально принимающих у себя туристов с ограниченными возможностями, оказался Байкальский заповедник — один из старейших в нашей стране и имеющий богатые туристические традиции. На его сайте мы увидели описание деревянной экологической тропы длиной более 2 км в охранной зоне (пос.Танхой). Позже довелось убедиться на практике: тропа действительно спроектирована и построена для людей с ограниченными физическими возможностями (включая инвалидов-колясочников) и для массового потока



Большая Байкальская тропа по долине Осиновки.

посетителей. По лиственничным настилам можно пройти двумя маршрутами: «Болотная экосистема» и «Кедровая аллея» [3], совершенно разными, но несомненно насыщенными новыми пейзажами, запахами и прикосновениями. Даже для обычного человека эта деревянная дорога — впечатляющее зрелище. Она сделана из экологичного мест-



Мост через Осиновку на участке Большой Байкальской тропы.

Фото С.В.Циликиной

ного материала, ровно подогнана — дощечка к дощечке, удобна и ухожена. По словам заместителя директора заповедника по экологическому просвещению и познавательному туризму Ирины Викторовны Лясоты, тропа редко пустует. Она популярна и у местных жителей, и у воспитанников специальных социальных учреждений из расположенных рядом населенных пунктов. Но, несмотря на это, мы не обнаружили ни следов мимо тропы, ни мусора вокруг, ни даже сломанной ветки! Вот и подтверждение особого экологического феномена.

Другой задачей стали разработка и продвижение маршрута для «особых» туристов по территории Байкальского заповедника. Имеющаяся тропа по долине р.Осиновки — один из участков Большой Байкальской тропы — изначально предназначена для людей с ординарным здоровьем. Отрезок пути от центральной усадьбы в пос.Танхой до водопада на Осиновке (12,5 км туда и обратно) волонтеры прошли в тестовом режиме и экскурсионном формате как маршрут для туристов-инвалидов. Нас сопровождал сотрудник заповедника Евгений Серафимович Башинов — настоящий байкальский Дерсу Узала!

Тропа, начинающаяся в охранной зоне, проходит по заповедной территории с темнохвойными пихтово-кедровыми лесами [4]. Зная не понаслышке, какими могут быть туристические тропы (даже на особо охраняемых природных территориях), мы были приятно удивлены состоянием осинов-

ской. Ее полотно ровное, чистое, без крупных или подвижных камней, корней и упавших деревьев. Все водотоки и неровности рельефа обустроены удобными переправами, выравнивающими мостками и ступенями. Маршрут промаркирован указателями расстояний, а в районе водопада находится оборудованная стоянка (зимовье), что позволяет совершать многодневные походы.

За качество тропы и ее обустройство стоит благодарить общественную организацию «Большая Байкальская тропа» и самоотверженных сотрудников Байкальского заповедника. Проход по тропе не вызвал у волонтеров никаких трудностей. Это позволяет оценить ее как доступную и рекомендовать к использованию паратуристами категорий слабовидящих, глухих, слабослышащих, лиц с нарушением интеллекта и с заболеваниями внутренних органов, а также пожилым людям и семьям с детьми. Другими словами, тем паратуристам, которые обладают равными или большими двигательными и сенсорными способностями в сравнении с имеющимися у волонтеров.

Нашими рекомендациями уже воспользовались представители целевой аудитории: в июле 2013 г. двухдневный поход по осиновскому маршруту совершила молодежная группа улан-удэнской местной организации Общества слепых. Из 19 человек, участвовавших в походе, трое — тотально слепые. По словам председателя общества Валерия Петровича Соболева, мероприятие оставило у участников яркие впечатления и желание

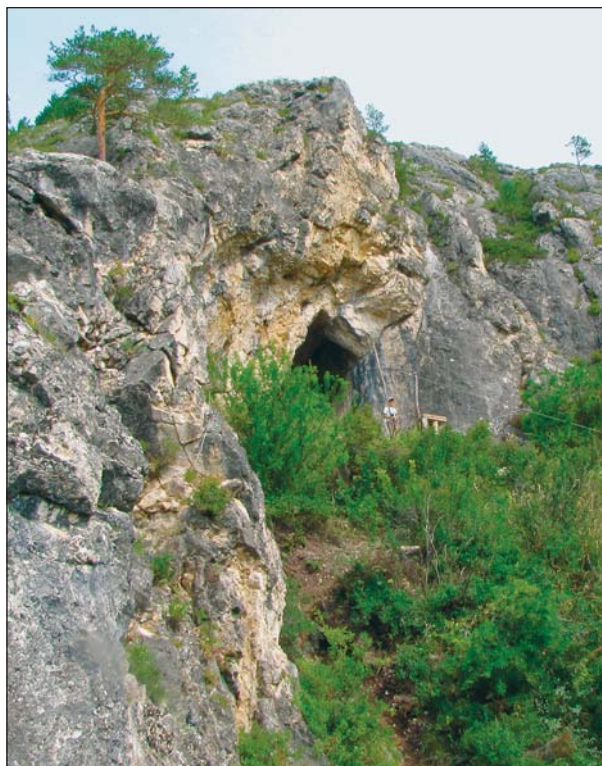
повторить поход*. Это не что иное, как заявка на востребованность маршрута и перспективность инвалидного туризма на природных территориях вообще! Но, в отличие от наших волонтеров, слабовидящие путешественники высказали ряд пожеланий к качеству полотна тропы и элементам обустройства. Значит, необходим еще более тщательный, чем даже в данном, близком к идеалу, случае подход к подготовке специальных маршрутов. Нужны предварительная оценка территорий и детальная проработка маршрутов.

По Тигирекскому заповеднику

Если кто отправляется в дорогу и в то время пойдет дождь, то это предвещает благополучный путь.
Русская народная примета

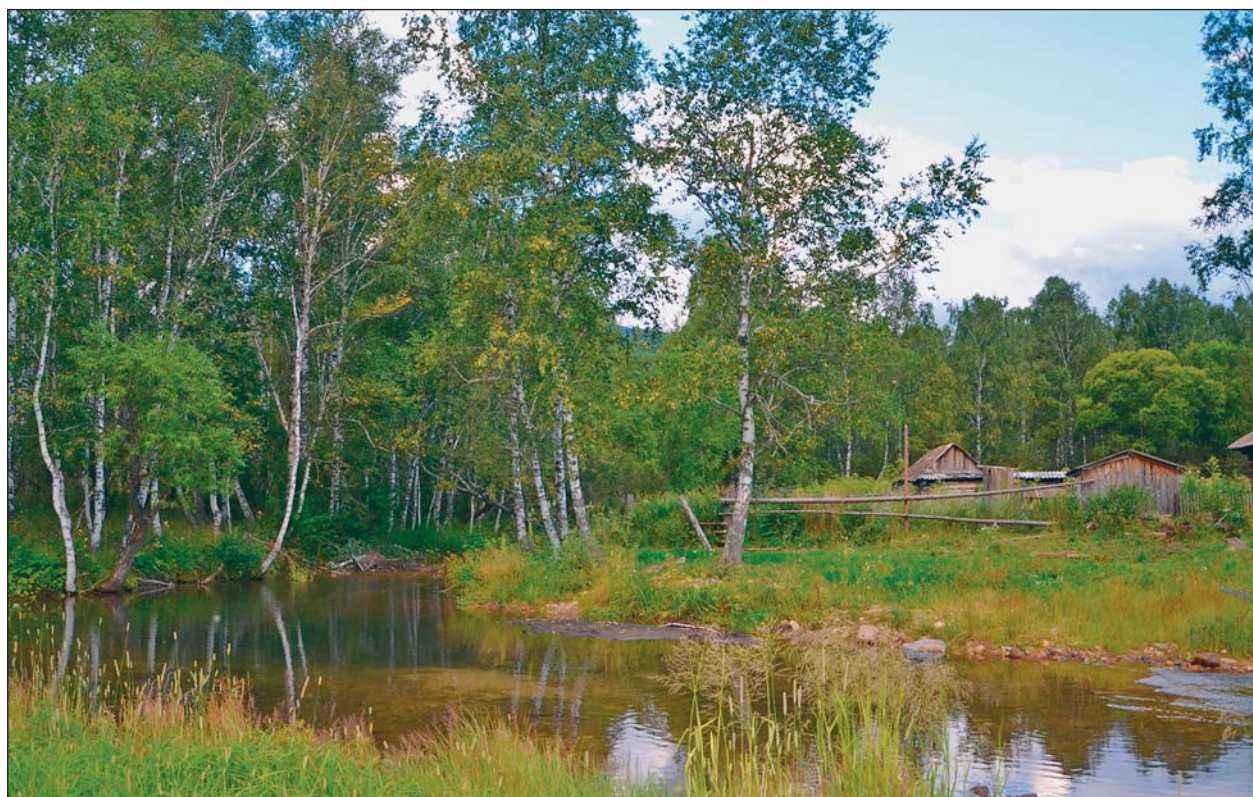
В Алтайском крае (регионе проживания автора) есть только один заповедник — Тигирекский. Экологический познавательный туризм в нем начал развиваться недавно, а возможности для паратуризма пока только обсуждаются. В качестве туристического администрация рекламирует один заповедный экомаршрут — «Большой Тигирек». Поэтому первоначальной задачей нашей экспедиции

* <http://www.zapoved.net/index.php/novosti-turizma/3735-bajkalskij-zapovednik-dostupnaja-sreda>



Тигирекский заповедник. Пещера Страшная.

Фото автора



Окрестности кордона Тигирекского заповедника.

Фото Г.Е.Тыщенко



Тигирекский заповедник. Брод через протоки р.Ини.

Фото автора

стало его тестирование, аналогичное проведенному на осинонской тропе. Но наши планы поменялись из-за нескольких дней обложных дождей и оказавшегося слишком сложным для волонтеров рельефа. На «Большой Тигирек» мы не попали.

Здесь стоит сказать, что по сравнению с байкальским маршрутом состав нашей группы расширился. В нее дополнительно вошли Галина и Сережа Тыщенко, мама и десятилетний сын — волонтеры особой категории маломобильных путешественников: семьи с детьми, а также Игорь Заборских — одноклассник Никиты из Алтайской краевой общеобразовательной школы для лиц с нарушениями зрения. Им и всем волонтерам — участникам тестовых походов, удивительно отважным и оптимистичным людям, — пользуясь случаем, хочется выразить безмерную благодарность.

В Тигирекском заповеднике нам все же удалось собрать интересный и объемный фактический материал, получить массу впечатлений и воодушевиться новыми идеями. Сегодня можно с уверенностью говорить о двух тропах в охранной зоне, по которым возможно проложить пешие паркурные маршруты.

Первая из них — к пещере Страшной. Тропа протяженностью 4,5 км (в одном направлении) начинается у кордона заповедника в с.Тигирек и проходит по системе сельских грунтовых дорог и местных путей. В отличие от Байкальского заповедника, где тропы специально подготовлены сотрудниками и добровольцами, здесь все природ-

ные преграды на дороге (броды, осыпные склоны, кустарниковые заросли и др.) находятся в первоначальном виде. Это определило характер тестового похода — экстремально-спортивный. Экстремальный — потому что для волонтеров многое испытанное доставило острые ощущения, совершенно отличные от повседневных и городских. Спортивный — поскольку вполне соответствует принятой классификации спортивных туристических маршрутов [5]. На тропе есть броды длиной до 10 м и глубиной 0,5 м, участки с грубообломочными осыпями, крутые подъемы и спуски и даже подвесной мост — набор препятствий, несомненно интересный, но значительно более сложный для прохождения, чем осинонская тропа на Байкале. Но ведь и в ординарном туризме маршруты подразделяются на категории сложности.

В конце тропы ее покорители получают настоящий подарок — возможность посетить карстовую пещеру Страшную — региональный памятник природы. С 1970-х годов сотрудниками Института археологии и этнографии СО РАН здесь ведутся археологические раскопки. За это время в 5-метровом культурном слое обнаружены останки 40 видов млекопитающих эпох плейстоцена и голоцена: пещерной гиены и пещерного медведя, мамонта, шерстистого носорога, бизона и др. В этом году случилось открытие: археологи нашли и идентифицировали кости дикобраза. Человек в пещере не жил, но использовал ее как удобный наблюдательный пункт во время охоты и —



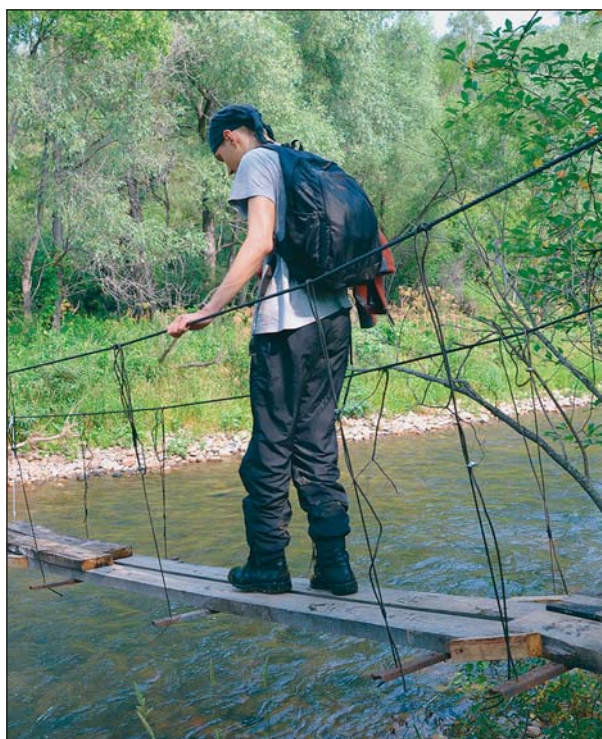
Заповедный Тигирек.

Здесь и далее фото Г.Е.Тыщенко

2 тыс. лет назад — грелся у костра, следы которого видны до сих пор.

Здесь нужно выразить признательность новосибирским ученым. Благодаря им на тропе к пещере появились очень важные элементы туристической инфраструктуры: подвесной мост через непроходимую вброд реку Большой Тигирек, земляные ступени на крутых склонах, деревянные поручни на опасных участках. Перед пещерой и непосредственно в ней сооружены смотровые площадки, где доброжелательные хозяева археологического лагеря проводят удивительные экскурсии с демонстрацией артефактов, знакомят с процессом их получения и первичной обработки.

Вторая тропа — основа для полноценного пешего туристического похода, который мы не планировали, но вынуждены были предпринять. Дорога от с.Тигирек до с.Чинета протяженностью 36 км — единственный наземный путь между этими селами: Тигирек находится в заповеднике, Чинета — последний населенный пункт за его пределами, до которого можно доехать на машине. По дороге курсируют автомобили повышенной проходимости, да и то лишь в сухую погоду. В дождь не ходят даже внедорожники. Мы попали в заповедник



Участники парапохода преодолевают мост через р.Большой Тигирек.



Участники тестового похода по Тигирекскому заповеднику.

летом 2013 г. — в сезон дождей. Ожидаемый ГАЗ-66 не пришел, и мы оказались запертыми в Тигиреке вместе с 30 местными жителями и туристами из Москвы, захавшими сюда на паркетном джипе. В результате, оценив безнадежность прогноза погоды и предчувствуя впечатления от пешего путешествия по низкогорьям Алтая, мы решили реанимировать первоначальные планы. Иными словами, выступить в паратуристический поход — пешком отправиться из Тигирека в Чинету, за пределы основной территории заповедника. Наш путь лежал по его охранной зоне и Чинетинскому комплексу заказнику регионального значения.

Стоит сразу оговориться, что для людей с проблемным здоровьем условия прохождения маршрута оказались близкими к экстремальным. В течение нескольких дней до похода и во время него не прекращались дожди — то проливные, то моросье. Возникали трудности с видимостью тропы даже под ногами. Приходилось прилагать дополнительные физические усилия для удержания равновесия и выносить длительное напряжение. Это обстоятельство, с одной стороны, добавило адреналина и впечатлений участникам, а с другой — позволило оценить возможный максимальный уровень сложности похода. В итоге маршрут занял 12 ходовых часов в течение двух дней (в то время как местные жители оценивают продолжительность пути в 5–8 ч).

Вместо подготовленной тропы под ногами паратуристов оказалась размытая дождями глинистая дорога, местами с участками гранитной крош-

ки, иногда с выходами скальных пород. На склонах держать равновесие было практически невозможно. Наиболее сложные участки нам приходилось обходить по траве. После затяжных дождей дорожные колеи в некоторых местах были заполнены водой до бортов. Там, где по обочине их было не обойти из-за зарослей кустарника, приходилось двигаться вброд — по лужам с полуметровой глубиной и вязким дном.

К превратностям погоды добавилась масса организационных неожиданностей. До выхода дороги к руслу р.Ини (в нашем случае это 8–9 ч пути) на маршруте не оказалось рек, ручьев и вообще каких-либо водных источников. А запаса питьевой воды у нас с собой не было. Но в этом нашлась положительная сторона: волонтеры-паратуристы прошли настоящий курс выживания, собирая дождевую воду с палаток! Это приключение оставило им яркие воспоминания, которые наверняка сохранятся у них на всю жизнь.

Еще одной неожиданностью стало отсутствие на маршруте до выхода к Ине комфортных мест для установки лагеря. Палатки пришлось ставить на склоне, в высокой траве. Как позднее оказалось, на маршруте есть достаточно ровное, живописное и более чем подходящее для туристической стоянки место. Но, к сожалению, оно никак не обозначено и не обустроено (справедливости ради следует отметить, что данная территория не принадлежит заповеднику, хотя часто используется для отдыха по пути в Тигирек). Для удобства туристов, посещающих заповедник, было бы хорошо сделать указа-

тели, а также оборудовать поляну, очистить ее от лишней растительности и соорудить навес — как это принято на многих экологических маршрутах.

Серьезной проблемой маршрута стало отсутствие четко определяемой главной дороги. Это добавило километров в и без того некороткий маршрут. Дорога (или, вернее, сеть направлений) создавалась местными жителями в разное время, в разные погодные условия и с разными целями. Постороннему человеку сложно, а иногда и невозможно выделить генеральное полотно. Случается, что явная дорога постепенно переходит в звериные тропы и теряется в траве. Для использования этого пути в качестве пешеходного маршрута его необходимо маркировать и устанавливать информационные знаки с указанием километража до стоянок, источников воды, населенных пунктов и др.

Особым приключением для волонтеров стала переправа через р.Иня в районе с.Чинета, которая представляет собой систему из трех пешеходных мостов. Первый — длиной 70 м, подвесной на железных опорах с деревянным полотном и перилами. Метровая ширина делает его комфортным для прохождения. При этом с моста открываются живописные виды на широкую долину реки с заливыми лугами в обрамлении могучих ивняков. Настоящий туристическо-экскурсионный объект и целое приключение! Далее малозаметная тропа по лугово-кустарниковому междуречью (используемому местными жителями под пастбище) через 500 м выводит ко второму мосту — через протоку Ини. Он сооружен на сваях из дерева без перил и других ограждений. Длина моста составляет 20 м, ширина — всего полметра. Для прохождения по нему лицам с ограниченными возможностями, очевидно, потребуется помощь сопровождающих. Еще через 200 м следует третий мост на надежных металлических опорах, который выводит непосредственно в село. В целом прохождение по мостам не вызывает особых трудностей. Главной проблемой стало расположение первого моста среди густых древесно-кустарниковых зарослей и отсутствие четко визуализируемого подхода к нему. Незнающему человеку обнаружить этот мост возможно только случайно, набредя на него после

скитаний по заброшенной части с.Чинета. Эта проблема также решается путем установки информационных знаков и указателей на маршруте.

Дальнейший отрезок пути постепенно возвращает путников в привычную жизнь. От Чинеты начинается автомобильная дорога. На такси отсюда можно добраться до с.Краснощекова, далее автобусом до Барнаула, а оттуда — любым транспортом в любую точку мира.

Серьезные выводы

Итак, анализируя материалы волонтерских походов и рассматривая их через призму ранее полученных теоретических выводов, можно прийти к выводу о наличии всех условий для отнесения пройденных маршрутов к категории паратуристических. Маршрут Тигирек—Чинета признан доступным для тех же категорий паратуристов, для которых рекомендована тропа по р.Осиновке в Байкальском заповеднике. Для туристов-колясочников необходимо создание специальных условий, которые в обоих заповедниках в настоящее время не могут быть реализованы по многим причинам. Радиальные тропы к объектам показа — например, к пещере Страшной — необходимо специально тестировать, адаптировать и включать в программы туров.

Конечно, все сказанное относительно Тигирекского заповедника не означает, что завтра по его маршрутам могут отправляться группы отважных туристов-инвалидов. Как и при создании любого качественного туристического продукта (коммерческого или социального) необходимо разработать концепцию маршрута, создать соответствующую инфраструктуру, подготовить программы туров, обучить сотрудников работать с «особыми» туристами. Однако есть уверенность, что проведенные пионерные теоретические изыскания и полученный практический опыт паратуризма послужат базой для таких работ и лягут в основу уникального эколого-туристического продукта заповедников Алтайского региона и других российских особо охраняемых природных территорий. ■

Работа выполнена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда. Проект 13-16-22001.

Литература

1. Андреева И.В. Экологический туризм в заповедниках и национальных парках России: состояние, доступность, технологии развития // Известия Сочинского государственного университета. 2013. №2 (25). С.9—18.
2. Андреева И.В. Геоэкологические основы природного паратуризма // Мир науки, культуры, образования. 2013. №2. С.304—307.
3. Андреева И.В., Андреев Н.Р., Циликаева С.В. и др. О доступности экотроп Байкальского заповедника // Развитие экологического туризма: инициативы и партнерство бизнеса, общества и государства. Улан-Удэ, 2013. С.90—93.
4. Калихман Т.П., Богданов В.Н., Огородникова Л.Ю. Особо охраняемые природные территории Сибирского федерального округа: Атлас. Иркутск, 2012.
5. Единая всероссийская спортивная классификация туристских маршрутов (ЕВСКТМ). М., 1995.

О славянской колонизации Подмосковья

А.Н.Кренке, Н.А.Кренке

Научное «открытие» славянских древностей Подмосковья началось в 1830-х годах. Именно в то время офицеры Военно-топографического депо впервые стали систематически наносить на карту курганы — древнерусские погребальные памятники (рис.1). В 1838 г. А.Д.Чертков — будущий член-корреспондент Императорской Санкт-Петербургской академии наук и глава Общества истории и древностей российских при Московском университете — произвел первые раскопки курганов в усадьбе Толстых в Верхогрязье (ныне д.Грязь на Москве-реке возле Звенигорода) [1]. К концу XIX в. уже были вскрыты многие сотни подмосковных курганов. Стало очевидно, что они относятся приблизительно к XI—XIII вв. и по материальной культуре выделяются среди прочих древнерусских памятников. Об этом писали известные исследователи истории Москвы — И.Е.Забелин и В.И.Сизов [2, 3].

В начале XX в. Д.Н.Анучин — один из ведущих специалистов в антропологии, этнографии и географии России — усомнился в славянской этнической принадлежности людей, захороненных в подмосковных курганах. Основанием тому послужили различия между черепами из этих курганов и из московских городских средневековых кладбищ [4]. Однако вскоре сомнения были отброшены. В 1930 г., после выхода работы А.В.Арциховского, связавшего древнерусские памятники Подмосковья со славянами-вятичами, в науке надолго утвердился термин «курганы вятичей» [5].

Скруплезное исследование вещевых наборов из москворецких курганов, проведенное Т.В.Рав-



Александр Николаевич Кренке, кандидат географических наук, научный сотрудник Института географии РАН. Область научных интересов — дистанционное зондирование, математические методы в экологии и географии.



Николай Александрович Кренке, кандидат исторических наук, старший научный сотрудник Института археологии РАН. Занимается изучением археологических памятников Подмосковья от неолита до средневековья, исследовал культуру пруссов на территории Калининградской области, древнеителменские памятники на Камчатке.

диной в 1960—1970-х годах, показало, что почти все они датируются XII—XIII вв., т.е. не совпадают ни по времени, ни по месту с поселениями летописных вятичей [6]. Так, кто же эти люди, которые жили на Москве-реке в XII в.? Кто создал самобытный набор украшений (перстней, семилопастных височных колец и пр.), найденных в подмосковных курганах? Ответы на эти вопросы важны для древнерусской археологии Подмосковья, а именно — для изучения географии расселения славянских колонистов и системы их землепользования.

Первым ученым, кто акцентировал внимание на необходимости археологического изучения культурных слоев средневековых москворецких поселений, был выдающийся экономист — А.В.Чаянов. В последние два года перед арестом (1928, 1929)

Александр Васильевич жил на даче на Николиной Горе и, лишенный возможности работать по специальности, реализовал себя как археолог. Систематические же исследования поселений начались лишь полвека спустя — в конце XX в. В ходе этих работ были сделаны три значительные открытия.

Во-первых, были обнаружены более древние, чем большинство курганов, поселения — набор находок указывал на вторую половину XI в. [7]. Возникли они незадолго до появления в регионе круговой, т.е. формованной на гончарном круге, посуды. Некоторые ямы от построек содержали исключительно лепную керамику, другие — смесь лепной и раннекруговой. Все эти древнейшие славянские поселения занимают крупные (больше 1 га) участки высокой поймы или первую террасу в долине среднего течения Москвы-реки и нижнего течения ее правого притока — Пахры. К настоящему времени открыто уже более двух десятков подобных памятников.

Во-вторых, были обнаружены во множестве поселения XII—XIII вв. возле известных курганных групп [8—10]. Всего в бассейне Москвы-реки известно уже более 800 курганных групп и одиночных курганов. Специально проведенные разведки показали, что каждому из этих погребальных памятников соответствовало поселение, которое располагалось ниже по склону (ближе к воде) на расстоянии, как правило, менее 100—300 м от курганов, в редчайших случаях — до 500 м. Важно отметить, что практически все эти поселения были маленькими по площади — обычно занимали 1000—2000 м². Иногда при разведках они казались больше, но при более детальных исследованиях выяснялось, что разнос находок вызван поздней распашкой. Сейчас в бассейне Москвы известно уже более 300 поселений XII—XIII вв. Большинство из них расположено на берегах мелких притоков Москвы, Пахры, Истры, таких маленьких рек как р.Язвенка (заповедник «Царицыно»), р.Чертановка (парк «Битцевский лес»), р.Туровка (заповедник «Горки-Ленинские») и др.

В-третьих, под московскими курганами были найдены древние пахотные горизонты [11]. Безусловно, это не стало неожиданностью — в Европе подобные открытия происходили не раз. Однако оказалось, что большинство древнерусских курганов насыпано на заброшенных пашнях. Таким образом, был обнаружен новый тип информационно насыщенных объектов, пригодных для комплексных исследований — археолого-почвоведческих и палеоботанических. По степени эродированности погребенных почв можно судить о том, как долго эксплуатировался участок, а по набору пыльцы — о структуре растительности. Почвы под курганами оказались значительно смытыми, что позволило утверждать: распашка была совсем не «сакральной» — одноразовой, а самой обыкновенной — многолетней. По соотношению пыльцы древесных и травянистых растений



Рис.1. Фрагмент карты окрестностей Москвы 1838 г. (соответствует территории современных городских районов Академический и Котловка). Увеличен район, где обозначены курганы.

было установлено, что ландшафты долин малых рек, где находились древнерусские памятники, можно отнести к «полуоткрытым», т.е. сами долины были практически освобождены от леса, но это были лишь относительно узкие «языки» открытых пространств среди лесных массивов.

К началу XXI в. накопился столь обширный массив данных по древнерусским поселениям и курганам Подмосковья, что возникла острая необходимость в обработке и осмыслении собранной информации. В решении этой научной задачи мы провели сравнительное изучение материальной культуры и анализ пространственного расположения памятников XII—XIII вв., в чем были полезны современные компьютерные технологии с использованием геоинформационных систем*.

Оказалось, что между ранними (XI в.) и поздними (XII—XIII вв.) поселениями существуют значительные отличия. О разнице в их размерах мы уже упоминали, но она наблюдается и в предметах материальной культуры. Для ранних поселений характерны большие горшки-котлы объемом до 20 л (рис.2) и керамика, для изготовления кото-

* Подробнее о методе см.: Берлянт А.М. Виртуальное картографирование // Природа. 2002. №7. С.3—9. — *Примеч. ред.*



Рис.2. Древнерусские горшки из Подмоскoвья: лепной, чуть правленый на гончарном круге горшок XI в. (слева) и круговой горшок XII в.

рой никогда не использовалась белая глина. Поздние поселения и курганы содержат, напротив, небольшие горшки, и многие из них сделаны из беложгущейся глины, что указывает на специфические сырьевые источники, расположенные, скорее всего, на правом берегу Оки.

Важные отличия обнаружены и в женских украшениях из археологических памятников XI в. и XII—XIII вв. — в височных кольцах, которые подвешивались на лентах к головному убору на уровне виска или вплетались в волосы (рис.3). По височным кольцам можно определить, в каком племени восточных славян (северян, вятичей, радимичей), проживавших в бассейнах Десны — верхней Оки, они были распространены. Расхождение линий этих украшений, вероятно, произошло в IX—X вв. Височные украшения, которые носили в конце XI в. в Подмоскoвье, относят к морфологически специализированному, «завершенному» типу (см. рис.3). Эти кольца, имеющие название «типа Сельцо», про-

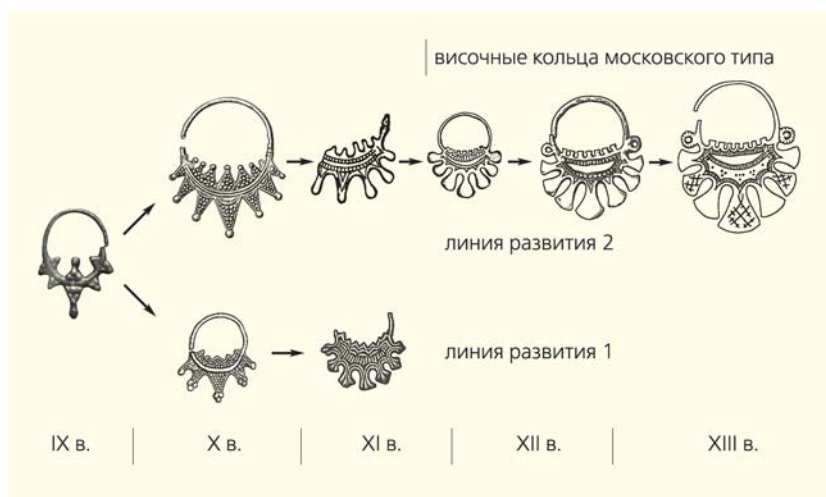


Рис.3. Схема развития височных колец в IX—XIII вв.

исходят от лучевых колец X в. с тремя шариками зерна на концах лучей, которые в XI в. превратились в расчлененную на три части лопасть. Дальнейшего развития этот тип не получил.

Кроме того, налицо важные различия в выборе ландшафта и хозяйственной стратегии: ранние поселения расположены, как правило, в пойменных расширениях наиболее крупных рек региона, а поздние — «разбегаются» по долинам маленьких речек. Трудно представить, что освоение региона происходило в несколько этапов одним и тем же населением. Преемственности противоречат и упомянутые различия в материальной культуре. К тому же крупные (более 40 курганов) кладбища связаны только с поселениями XII—XIII вв., а это означает, что жизнь ранних поселений не продолжалась долго. Вывод, который может быть сделан из данных наблюдений, — мы имеем дело с двумя «волнами» колонизации региона.

Люди первой колонизационной волны пришли на территорию Подмоскoвья в середине — второй половине XI в. Их характерные украшения были найдены вместе с западноевропейскими денариями, подтвердившими правильность датировки. Посуда, которую использовали пришельцы, имеет явное сходство с керамикой раннеславянской роменской культуры, аналогичны и височные украшения. Места их находок охватывают бассейн Москвы-реки широкой дугой с юга и запада. Наиболее близкая зона концентрации подобных находок расположена на берегах Верхней Оки между устьями ее притоков — Протвы и Угры, где есть и более ранние славянские памятники X в. Это дает основание предполагать, что район Верхней Оки был областью, откуда колонизационный поток первой волны шел к Москве-реке. Общая его численность вряд ли превышала 2000—3000 человек. Судя по размерам поселений, они были объединены в несколько крупных коллективов, состоявших из больших семей, которым и нужны горшки-котлы.

Заняли эти люди наиболее легкие для освоения земли — свободные от лесной растительности участки долин Москвы-реки и Пахры. Вероятно, за 200 лет, прошедших с момента окончания жизни на городищах железного века («дыякова типа»; в черте музея-заповедника «Коломенское»), лес еще не полностью восстановился на местах бывших пашен и лугов, где, возможно, паслись одичавшие лошади.

Первопоселенцы XI в. шли по относительно проторенным путям. В IX в. — первой половине XI в. маршруты торговых путей проходили и по самой Москве-реке, и пересекали ее бассейн в меридиональном направле-

нии. Следы этих контактов — несколько кладов и отдельных арабских монет IX—X вв., найденных на обоих берегах в верховьях Москвы-реки в Хотяжах (деревня около Звенигорода). Здесь помимо дирхемов X в. обнаружены еще и скандинавские вещи того же века — подвески «гнездовского типа», орнаментированная застёжка-фибула. Второй пункт концентрации находок дирхемов — территория современной Москвы (Кунцево, Чертолье, Симонов монастырь). В обоих пунктах открыты крупные поселения XI в. — селища Хотяжи 1 и 2, а также Даниловские селища 1 и 2 (территория Данилова монастыря и соседняя с ним).

В то же время состав фауны, определенный по костным остаткам из раскопок, означает, что колонисты «первой волны» столкнулись на берегах Москвы с относительно дикой природой, ресурсы которой они стали интенсивно эксплуатировать. На это указывает большое количество костей диких животных в списках фауны из поселений XI в.: до 45% — в селище Покров 5 на Пахре (определение В.П.Данильченко), 31% — в Хотяжах 1 (определение Н.В.Сердюк).

Важно обратить внимание, что среди поселений XI в. нельзя выделить какое-либо одно, которое резко выделялось бы размерами или «статусными» находками. Можно лишь отметить, что концентрация поселений наблюдается на небольшом отрезке вдоль течения Нижней Пахры от г. Подольска до устья р. Рожайки. Именно здесь на поселении Жданово была найдена такая симптоматичная вещь, как весы в бронзовом футляре для взвешивания монет. Аналогия этому футляру происходит с о. Готланд. На центры «второго порядка» могут претендовать места «сдвоенных» поселений, располагавшихся по обоим берегам речек, — Хотяжи, Даниловские (Москва) и Коломна (рис.4).

Люди «второй волны» славянской колонизации пришли на Москву-реку, видимо, в самом начале XII в. Исходным районом, вероятно, также было правобережье Средней Оки на стыке современных Московской, Калужской и Тульской областей. Точнее, к сожалению, сказать невозможно. Эти люди носили височные украшения второй линии их развития (см. рис.3), а новые, московского типа, создавались уже на территории Москворечья.

Колонистов «второй волны», в первую очередь, притягивали долины малых речек, склоны которых «нарезались» на участки размером в несколько десятков гектаров каждый. Анализ расстояния между ближайшими памятниками показал, что площадь «зоны влияния» отдельного памятника в 50% случаев была менее 8 км². Четко прослеживается избирательность в освоении разных типов ландшафтов. Заселялись земли более пригодные для земледелия. Это особенно хорошо видно в асимметрии освоения берегов Москвы-реки, начиная от границ современного города и далее ниже по течению. Левый берег с болотистыми ландшафтами был заселен гораздо слабее, чем правый.

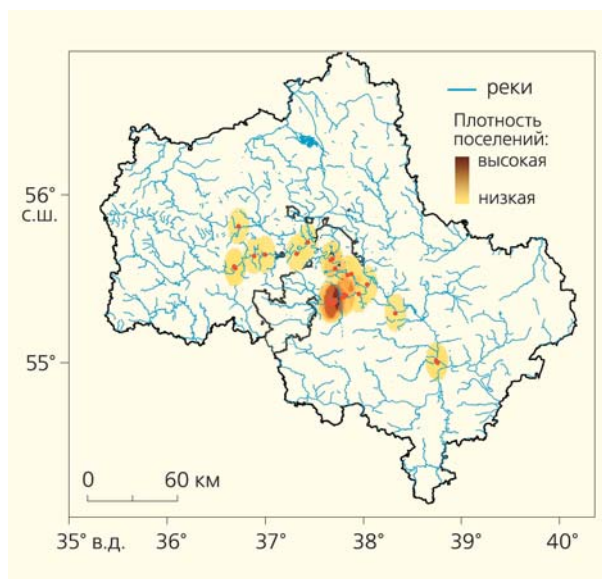


Рис.4. Карта плотности поселений XI в. в бассейне Москвы-реки.

Иногда расстояние между поселениями в пределах одной речной долины было совсем небольшим — 300—400 м по прямой. Типичные примеры — системы поселений в долинах р. Самынки (район Барвихи) и р. Язвенки, изученные наиболее полно. Судя по размерам, они состояли, как правило, из одного—трех дворов и имели отдельное курганное кладбище. Количество курганов в группе указывает на длительность функционирования связанного с ним поселения. Теоретичес-

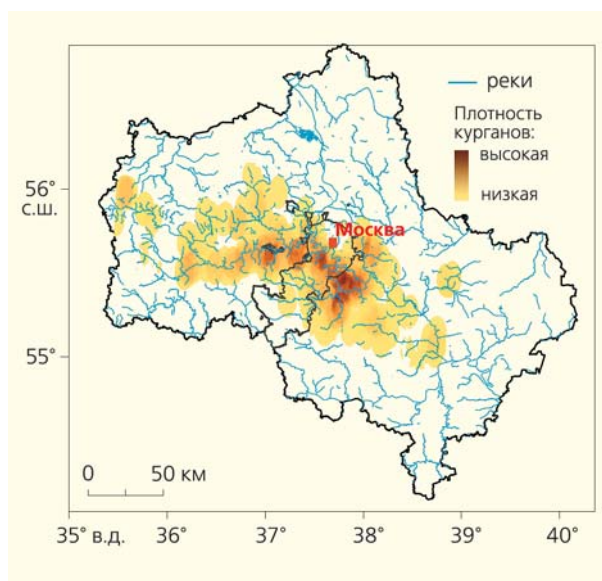


Рис. 5. Карта «интенсивности освоения ландшафта в XII—XIII вв. в бассейне Москвы-реки» по материалам карты курганов (819 курганных групп), построенная с учетом численности курганов в каждой группе.

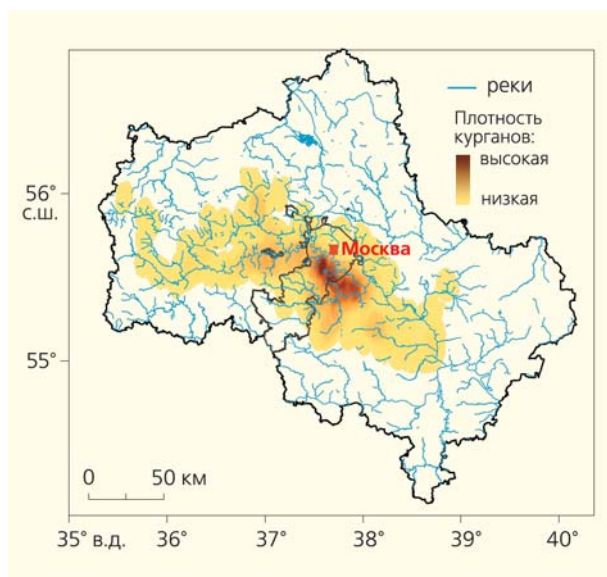


Рис.6. Карта плотности курганных групп в бассейне Москвы-реки (без учета численности курганов в каждой группе).

ки возможна и другая ситуация: большие курганные группы находились вблизи крупных поселений. Однако эту версию не удалось подтвердить конкретными материалами.

Анализ пространственного распределения памятников XII—XIII вв. проводился с помощью разных вариантов геоинформационных технологий. На полученных картах видны области концентрации памятников, а также территории интенсивного освоения ландшафта, где находились длительно существовавшие поселения и курганные могильники (рис.5, 6). Наибольшая плотность обнаружена в междуречье Москвы-реки и Пахры. Размеры этой области довольно компактны — примерно 40×15 км, при этом почти весь бассейн Москвы-реки был так или иначе освоен, за исклю-

чением отдельных болотистых участков левобережья. Видимо, в ареале наибольшей концентрации поселений и происходило формирование своеобразной материальной культуры москворецкого населения. Здесь следует искать остатки мастерских по производству специфических височных колец московского типа и других украшений. Возможно, что находились и места, где осуществлялись торговые контакты, принимались судебные и иные решения.

Примечательно, что Кремлевский замок, построенный в 1156 г. на мысе в устье р.Неглинной (где была Москва, упомянутая в летописи 1147 г., мы не знаем), противостоит области наиболее высокой концентрации памятников сельского населения XII—XIII вв. Область концентрации сельского населения и княжеский город, видимо, составляли биполярную структуру. Эта биполярность ярко проявилась в противоречивом поведении «москволян»/«москвичей» (термины летописи) в 1175 г. и в роковом 1238 г. По свидетельству летописей [12], в обоих случаях под предводительством князя они сначала выступали против врагов, но затем, не вступая в бой, возвращались к своим домам. Прочитируем дословно летописи: «Москволяни же слышавше, оже на нѣ Ярополкъ, и възвратившия възпать блюдѹче домов своихъ» (1175); «Москвичи же повѣгоша, ничего же не видѣвше» (1238).

Летописные обозначения москволяне/москвичи можно с уверенностью считать экзотным, употребленным летописцем, проживавшим вне Москвы. Как себя называли в XII—XIII вв. сами люди, проживавшие на Москве-реке, мы по-прежнему не знаем. Важно подчеркнуть, что все признаки показывают, что на Москве-реке в XII—XIII вв. «кристаллизовалось» новое этническое образование, которое, хотя и имело какие-то вятические корни, но отнюдь не может быть сведено к ним. ■

Литература

1. *Чертков А.Д.* О древних вещах, найденных в 1838 году в Московской губернии, Звенигородского уезда. М., 1838.
2. *Забелин И.Е.* Изыскания о древнейшем первоначальном поселении Москвы // Тр. XVIII Археол. съезда в Москве, 1890 г. Т.3. / Под ред. Графини П.С.Уваровой. М., 1897. С.1—12.
3. *Сизов В.И.* Дьяково городище близ Москвы // Тр. IX Археологического съезда в Вильно, 1893 г. Т.2. М., 1897. С.256—267.
4. *Анучин Д.Н.* Доисторическая Москва. // Москва в её прошлом и настоящем. М., 1909.
5. *Арциховский А.В.* Курганы вятичей, М., 1930.
6. *Равдина Т.В.* Семипластные височные кольца // Проблемы советской археологии. М., 1978. С.181—187.
7. *Шполянский С.В.* Новые данные по хронологии памятников начального этапа славянской колонизации Москворечья // Труды ГИМ. 1999. Вып. 103. С.142—153.
8. Археология парка «Царицыно» / Отв. ред. Н.А.Кренке. М., 2008.
9. Расселение, освоение земель и природная среда в округе Москвы XII—XIII вв. // Культура средневековой Москвы. Исторические ландшафты Т.1. / Отв. ред. Н.А.Кренке, С.З.Чернов. М., 2005.
10. *Юшко А.А.* Московская земля IX—XIV вв. М., 1991.
11. *Александровский А.Л., Кренке Н.А.* Изучение средневековых пахотных горизонтов в Москве и Подмоскowie // Крат. сообщ. Ин-та археологии. 1993. Вып.208. С.20—31.
12. *Кучкин В.А.* Москва в XII — первой половине XIII века // Отечественная история. 1996. №1. С.3—13.

Палеонтологические музейные колоквиумы

Новая форма взаимодействия науки и музеев

С.В.Наугольных,
доктор геолого-минералогических наук
Геологический институт РАН
Москва

Изящно изогнутые руки морской лилии, сверкающая пиритизированная раковина гигантского аммонита и сегменты панциря трилобита, поблескивающие коричневатым хитином, — сколько чудес можно увидеть на палеонтологических выставках и у нас в России, и за рубежом! Придя на «Гемму» — одну из самых известных в России геологических выставок, — мы, возможно, будем вынуждены постоять за билетами, а при открытии Палеонтологического музея в китайском Шеньяне очередь вытянулась на три километра.

Посещение международных палеонтологических выставок привело меня к твердому убеждению, что интерес людей к далекому прошлому Земли и к эволюции ее органического мира не угасает и даже, напротив, неуклонно растет. Завсегдатаи Интернета легко подтвердят эту мысль, опираясь на новостные ленты. Но, как и многие процессы, этот рост проходит нелинейно, а эффекты, его сопровождающие, имеют и позитивный, и негативный оттенок.

Пролог к проблеме

Рост популярности палеонтологии связан с тремя факторами. Во-первых, с расширением доступности чисто фактологических сведений об истории Земли — благодаря распространению палеонтологических знаний среди самых широких слоев населения, особенно — подрастающего поколения. Именно факты, добытые учеными-палеонтологами, помогают формированию научного мировоззрения, появлению у молодых людей твердых жизненных ориентиров, противодействуют мракобесию, клерикализму и псевдонауке, буквально заполонившим нашу жизнь. Во-вторых, сама популяризация палеонтологии способствует поиску новых уникальных местонахождений ископаемых животных и растений. Известен целый ряд важнейших

для науки местонахождений, открытых любителями-коллекционерами и вошедших в «золотой фонд» мировой палеонтологии. В-третьих, общественный интерес к палеонтологии привлекает частных инвесторов к финансированию палеонтологических раскопок, к организации экспедиций и лабораторных исследований, а также к подготовке и публикации печатных трудов. Все эти эффекты, сопровождающие рост популярности палеонтологии, безусловно, положительны.

Но, к сожалению, быстрое развитие любительской палеонтологии, сопровождается и довольно неприятными негативными явлениями. Из них следует назвать определенную профанацию палеонтологических знаний средствами массовой информации, опирающимися на непрофессиональных, поверхностных в суждениях журналистов и репортеров. Казалось бы, чего проще — обратиться к компетентному специалисту на предмет получения консультации или с просьбой отредактировать подготовленный к публикации материал. Однако легкомысленность и незнание того, к кому из ученых следует обратиться (а порой и высокомерие, и самонадеянность) препятствуют такому естественному шагу. Отдельная боль — несанкционированные и неумелые раскопки, проводимые рьяными, но не обладающими необходимыми навыками и компетенцией любителями.

Есть ли какой-нибудь способ противодействовать этим негативным тенденциям?

Прежде всего, непрофессионализму и некомпетентности можно противопоставить острый научно-общественный резонанс, публикации в открытой печати и в тематических интернет-форумах комментариев и критических замечаний, рецензий на работы нерадивых журналистов и горе-популяризаторов.

Наиболее значимые местонахождения ископаемых остатков животных и растений уникальной сохранности и/или обладающие важным научным значением должны превратиться в заказники. Режим их работы должен предусматривать возможность проведения исследований только квалифи-



Уникальная находка участников коллоквиума Т.В.Вареновой и Д.В.Варенова (Самарский областной краеведческий музей им.П.В.Алабина) — практически полностью сохранившаяся колония криптостоматных мшанок рода *Polypora*, найденная во время экскурсии на пермские мшанковые рифы.

цированными палеонтологами и одновременно препятствовать разного рода палеонтологическим браконьерам и «черным копателям».

Уральская проблематика

Проблемы, связанные с необходимостью организованного диалога между профессиональными палеонтологами и любителями, меня непосредственно коснулись в ходе исследований уральских ископаемых флор пермского возраста. В Приуралье — в предгорьях Уральского хребта — располагается целый ряд интереснейших местонахождений древних растений, знаменитых буквально на весь мир.

Эффектные отпечатки листьев папоротников или побегов примитивных хвощевидных привлекают своей красотой многих любителей ископаемых диких винок. Поэтому совершенно неудивительно, что многие любители геологии и палеонтологии, да и просто досужие туристы, прокладывают свои маршруты таким образом, чтобы иметь возможность «поработать» киркой и лопатой на каком-нибудь знаменитом разрезе. Естественно, что при массовых сборах растительных остатков в руки любителей помимо относительно рядового и часто встречающегося материала время от времени попадают образцы уникальные. Как сделать так, чтобы эти редкие и важные для науки образ-

цы были переданы в руки ученых и сохранены для будущих исследований?

Этот вопрос беспокоил меня довольно долго, пока в 2009 г. в Красноуфимске, расположенном на юго-западе Свердловской обл., мы с коллегами не организовали первую встречу академических палеонтологов, коллекционеров-любителей и представителей регионального краеведческого музея.

Во встрече приняли участие Л.Е.Алексейчик, в то время возглавлявшая Красноуфимский краеведческий музей, В.И.Давыдова, заведующая отделом природы этого музея, С.Р.Чистякова, палеонтолог из Свердловского областного краеведческого музея, и О.В.Абросимова, красноуфимский краевед, увлеченный и энергичный коллекционер окаменелостей. Я был представителем Геологического института РАН.

Этот первый экспромт-коллоквиум, который прошел под названием «Геологические памятники Красноуфимска», со всей очевидностью показал эффективность прямого диалога между всеми участниками исследовательской триады: любителями — сотрудниками региональных музеев — академическими палеонтологами [1]. Взаимная заинтересованность и даже, я бы сказал, взаимозависимость позволили нам в очень теплой и дружеской атмосфере обсудить волновавшие нас проблемы. Абросимова смогла глубже понять научную ценность своих находок и точнее определить многие из них; были просмотрены фондовые коллекции музея и выделены наиболее важные, нуждающиеся в особых условиях хранения образцы. Мне удалось получить доступ к новым, еще не описанным растительным остаткам, требовавшим детального изучения. Значительная часть частной коллекции Ольги Владиславовны, включая уникальную по сохранности зубную спираль геликоприона, позже была безвозмездно передана в музей Уральского горного института. Я поделился с коллегами новой литературой, посвященной пермским флорам Урала. К этому надо добавить, что обсуждение музейно-палеонтологических проблем сопровождалось полевыми экскурсиями на самые интересные разрезы нижнепермских отложений, которые в окрестностях Красноуфимска изобилуют эффектными окаменелостями. По существу, мы провели классический совместный мониторинг наиболее значимых палеонтологических памятников Красноуфимского р-на.

Подводя итог этого первого палеонтологического музейного коллоквиума, мы единодушно отметили его успешность. Были рассмотрены наиболее важные разрезы, часть из которых удалось подробно изучить и описать. Собраны богатые коллекции ископаемых растений и беспозвоночных раннепермского возраста. Ну и самое главное: удалось установить непосредственные контакты между наукой и региональными музеями.

Организационная формула

Необходимо отметить, что в работе коллекционеров, живущих в непосредственной близости от интересных и перспективных в палеонтологическом отношении разрезов, есть два больших плюса. Первый и самый очевидный из них — возможность часто посещать эти местонахождения, отслеживать появление новых обнажений, что особенно важно при активной добыче камня в карьерах или при прокладке технологических траншей под коммуникации. Столичным палеонтологам за такими быстрыми изменениями в состоянии обнажений, разумеется, не уследить. Второй плюс — местным любителям палеонтологии, как правило, свойственна глубокая мотивация, искренний интерес к науке и желание сделать редкую находку. Конечно, на эти безусловно хорошие моменты порой накладываются слабая теоретическая подготовка, незнание методики проведения полевых работ, конкретных особенностей и приемов препарирования ископаемых остатков. Но, как показали наши новые музейные коллоквиумы, эти проблемы вполне можно решить.

Опыт проведения первого палеонтологического музейного коллоквиума 2009 г. со всей определенностью показал, что именно эта организационная формула взаимодействия ученых, представителей региональных музеев и любителей-краеведов оптимальна.

Так сказать, по «горячим следам» коллоквиума-2009 летом 2010 г. был организован и проведен — уже в соответствии со всеми академическими канонами — новый палеонтологический музейный коллоквиум, на этот раз в Пермском крае, на базе Кунгурского историко-архитектурного и художественного музея-заповедника, возглавляемого С.М.Мушкаловым, знатоком этнографии и природы Приуралья. Несмотря на очевидный гуманитарный акцент в названии, музей уделяет большое значение изучению геологии и палеонтологии Кунгурского р-на и сопредельных территорий. В самом музее хранится большое фондное собрание нижнепермских растений из знаменитых приуральских местонаждений: Красной Глинки, Матвеева, Крутой Катушки-1, Крутой Катушки-2, Мазуевки и Чекарды-1. Следит за образцовым хранением палеонтологических коллек-



Мастер-класс по освоению техники палеолитической живописи: творческая часть.

ций Л.А.Долгих, посвятившая им несколько интересных публикаций [2, 3].

В ходе работы этого коллоквиума было проведено сессионное заседание, издан сборник научных работ, а после кабинетных дискуссий участники отправились на полевые экскурсии — в Кунгурскую ледяную пещеру по особому, расширенному маршруту и на нижнепермские мшанководорослевые рифы на разрез Чикали. Информация о результатах коллоквиума-2010 была опубликована на страницах «Палеонтологического журнала» [4].

Музейные коллоквиумы 2011 и 2012 гг., также проведенные в Кунгуре, прошли без преувеличений со все более и более нарастающим успехом. Количество участников постоянно росло, статус коллоквиумов де-факто поднялся до международного. Коллоквиум-2012 проведен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Сборники трудов были напечатаны на мелованной бумаге, с высококачественными цветными иллюстрациями и английскими резюме, сопровождающими каждую статью. Подробная информация об этих коллоквиумах опубликована в академическом журнале «Стратиграфия. Геологическая корреляция» [5], а также в Интернете.

Коллоквиум 2013 г.

К 2013 г. формат проведения палеонтологического музейного colloquium несколько изменился. Еще при обсуждении планов среди выступлений участников colloquium звучало сильное беспокойство, связанное с охраной геологических и палеонтологических памятников. Именно природоохранным аспектам деятельности палеонтологов и был посвящен colloquium-2013. Его название — «Объекты палеонтологического и геологического наследия и роль музеев в их изучении и охране» — говорит само за себя.

Этот, уже пятый по счету, colloquium проходил в Кунгуре с 22 по 27 апреля и был вновь организован Геологическим институтом РАН и Кунгурским историко-художественным музеем-заповедником. В colloquium-2013 приняли участие более 70 специалистов из многих учреждений России и зарубежья.

Было представлено 35 докладов, посвященных различным аспектам музееведения в применении к изучению и охране различных объектов геологического и палеонтологического наследия. Подавляющее большинство текстов опубликовано в сборнике статей [6].

Проведение музейного мастер-класса, включенного в программу colloquium и посвященного палеолитической живописи, было открыто докладом А.В.Шаповалова (Государственный Дарвиновский музей, Москва) «Анималистическое искусство и изобразительная деятельность позднего палеолита: взгляд натуралиста». Мастер-класс продолжился практическим занятием с освоением техники живописи палеолита с последующим конкурсом творческих проектов. Лауреаты конкурса (команда В.С.Пенкиной) получили почетный приз — кость мамонта из плейстоценовых отложений Урала.

После завершения сессионных заседаний была проведена полевая экскурсия на нижнепермские (верхнеартинские) рифы, обнажающиеся по правобережью р.Сылвы в разрезе Камень Ермак и близлежащих обнажениях. На закрытии colloquium принята итоговая резолюция, в которой в том числе предлагается присвоить особый статус палеонтологическим коллекциям из утраченных местонахождений, недоступных для проведения повторных сборов, и ходатайствовать о расширении Воркутинского геологического памятника.

В рамках мероприятий colloquium-2013 в Красноуфимском краеведческом музее в ок-

тябре 2013 г. прошел научно-практический семинар «Геолого-палеонтологические памятники Красноуфимска: актуальные проблемы охраны и изучения». Труды семинара также изданы отдельным сборником, в который вошло семь больших статей [7]. После сессионного заседания была проведена полевая экскурсия на отложения артинского яруса в карьере Ключики, знаменитом находками хрящевых рыб пермского периода и других уникальных окаменелостей.



Труды палеонтологических музейных colloquium 2010—2013 гг.

Вектор в будущее

Какое будущее ожидает наши палеонтологические музейные colloquium? Иными словами, к чему мы стремимся, какие новые цели перед собой ставим?

Прежде всего следует отметить, что уже назрела необходимость диверсификации целей и форм проводимых мероприятий. Помимо масштабных colloquium представляется более чем оправданной организация семинаров с более конкретной проблематикой, связанной



Участники палеонтологического музейного коллоквиума «Объекты палеонтологического и геологического наследия и роль музеев в их изучении и охране». Кунгур, 23 апреля 2013 г.

с охраной или мониторингом того или иного геологического или палеонтологического памятника. Еще одно важное направление работы коллоквиумов — организация образовательных и методических семинаров по проектной деятельности школьных музеев и музеев геологических клубов и кружков. Такие семинары проводятся в течение

последних лет на базе музея-лаборатории «Звездная летопись» в Центре образования №287 «Школа здоровья» г.Москвы.

Именно в этих направлениях мы и собираемся двигаться. Кто «мы»? Мы — неравнодушные люди, ратующие за сохранение и изучение геолого-палеонтологического наследия России. ■

Литература

1. *Наугольных С.В.* Геологические памятники Красноуфимска: как сделать первый шаг к созданию Уральского палеонтологического геопарка? // Геология: история, теория, практика. Тез. докл. междунар. конф., посвященной 250-летию Государственного геологического музея им.В.И.Вернадского. М., 2009. С.162—165.
2. *Долгих Л.А.* Пермские членистостебельные в коллекциях Кунгурского историко-архитектурного и художественного музея-заповедника // Палеонтология и эволюция биоразнообразия в истории Земли (в музейном контексте). М., 2012. С.54—58.
3. *Долгих Л.А.* Из истории сборов палеонтологической коллекции Г.Т.Мауэра // Геолого-палеонтологические памятники Красноуфимска: актуальные проблемы охраны и изучения. Красноуфимск, 2013. С.32—39.
4. *Наугольных С.В.* Музейный коллоквиум «Палеонтология и стратиграфия пермской системы в музейных экспозициях и частных коллекциях», г.Кунгур, 28—29 июня 2010 года // Палеонтол. журн. 2011. №2. С.110—112.
5. *Наугольных С.В.* Международный музейный палеонтологический коллоквиум «Эволюция органического мира в палеозое и мезозое (в коллекциях и экспозициях естественноисторических музеев)» // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2012. Т.20. №2. С.122—124.
6. Объекты палеонтологического и геологического наследия и роль музеев в их изучении и охране. Кунгур, 2013.
7. Геолого-палеонтологические памятники Красноуфимска: актуальные проблемы охраны и изучения. Красноуфимск, 2013.

Спорово-пыльцевой анализ: история становления

С.А.Сафарова,

кандидат биологических наук

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН
Москва

Человечество всегда стремилось подчинить себе время и пространство. Людям 21-го столетия подвластны колоссальные расстояния: они вышли в космические просторы. Труднее победить время. О такой победе человек мечтает с глубокой древности. Но пока машины времени не существует, и мы не можем вернуться в прошлое и узнать, что было на Земле тысячи и миллионы лет назад.

Идеи об истории развития Земли возникали уже в Средние века. Арабский писатель Магомед Кацвини, живший в XIII в., в своем сочинении «Чудеса природы» приводит вымышленную и аллегорическую историю путешественника Кидца.

«Однажды я проходил по улицам весьма древнего и удивительно многолюдного города и спросил одного из жителей, когда он основан.

— Действительно, это великий город, — отвечал горожанин, — но мы не знаем, с какой поры он существует.

Пятьсот лет спустя я снова проходил по тому же самому месту и не заметил ни малейших следов населения; я спросил крестьянина, косившего траву на месте прежней столицы, давно ли она разрушена.

— Станный вопрос! — отвечал он. — Эта земля никогда ничем не отличалась от того, какой ты теперь ее видишь!

— Но разве прежде не было здесь богатого города?

— Никогда, — отвечали мне, — по крайней мере мы никогда его не видели, да и отцы наши нам ничего об этом не говорили.

Возвратившись еще через пятьсот лет, путешественник нашел на том же месте море, а на берегу его толпу рыбаков, которые на вопрос, давно ли земля эта покрылась водой, отвечали, что это место всегда было таким же, как теперь...».

Все грандиознейшие физико-географические изменения нашей планеты совершались и теперь совершаются с удивительной постепенностью и медленностью. К сожалению, природа человека и продолжительность его жизни таковы, что в большинстве случаев мы не замечаем самих процессов, а удивляемся только результатам, час-

то приписывая их случайности и различного рода катастрофам.

Летопись нашей планеты нам помогают читать геологи: они нередко обнаруживают в кусках породы окаменевшие раковины, кости животных, отпечатки листьев и куски древесины. Изучение истории Земли, основанное на подобных фактах, началось довольно поздно. Первое упоминание об ископаемых остатках растений принадлежит греческому философу Ксенофану (VI—V вв. до н.э.), который сообщал о «лавровых листьях», заключенных в горных породах о.Парос. Таджикский ученый Ибн-Сина (Авиценна), живший в конце X — начале XI в., приписывал происхождение окаменелостей особой «камнетворной силе», рождающей в недрах земли формы, соответствующие растениям и животным. Современники же Авиценны объясняли эти факты «игрой природы». Только в конце XV в. Леонардо да Винчи впервые высказал мысль, что окаменелости — это остатки когда-то произраставших растений.

Во времена Петра I в Сибири, на территории Красноярского края, были найдены куски дерева, а также «лиственничный окаменелый уголь».

В 1793 г. русский академик П.С.Паллас сообщил об ископаемых находках дерева недалеко от Красноярска у дер.Кубековой и древесных стволов, превратившихся в железняк, у дер.Рыбинской. В том же году Паллас описал отпечатки листьев, найденных в третичных отложениях Камчатки.

К сожалению, только небольшая часть остатков растений доходит до нас в достаточно хорошем состоянии, позволяющем определить их вид. Обнаруживаемые в толщах геологических отложений, они подобны очень древней книге. Некоторые из ее страниц сохранились относительно хорошо и понятны для чтения: на них видны и печатные буквы, и рисунки; на других печать уже стерлась, и общий смысл написанного приходится восстанавливать с трудом по отдельным фразам, а нередко и по отдельным словам.

Известно, что в наши дни специалисты-реставраторы, вооруженные новейшими научными средствами, выявляют первоначальные тексты совершенно испорченных рукописей. Так же обстоит дело и с «книгой природы»: навсегда, казалось бы, исчезнувшие «буквы» геологической летописи

можно восстановить. Здесь на помощь приходят все более совершенные приборы и методы. Используя микроскоп, ученые обнаружили, что в отложениях прошлых эпох растения оставляют не только видимые невооруженным глазом остатки листьев и стеблей, но и массу мельчайших спор и пыльцы. Эти микроскопические ископаемые сохраняются лучше, чем крупные части растения. Изучением таких растительных остатков и занимается палинология (спорово-пыльцевой анализ).

Бродя по лесам и лугам в бурную пору цветения, нетрудно обратить внимание на лужи, подернутые бледновато-желтой пленкой, и на то, как во время порыва ветра над полем поднимается зеленоватая дымка. Это растительный мир рассеивает пыльцу — зачатки будущей жизни.

Способность растений в громадном количестве производить споры и пыльцу поистине изумительна. Одно соцветие дуба дает за лето 500 тыс. пылинки, соцветие щавеля — до 4 млн, соцветие сосны — около 6 млн. Однако для оплодотворения служит только ничтожная их часть. Остальное рассеивается в воздухе, разносится ветром и в дальнейшем оседает на почву, поверхность озер, болот и морей.

Огромные пыльцевые облака могут покрывать целые города. Масштабы, в которых происходит разнос пыльцы, показывает, в частности, такой пример. В 1954 г. жители американского города Давенпорта были свидетелями удивительного явления: над городом прошел дождь голубого цвета. Когда он закончился, всюду остались его следы — голубоватые пятна. Причина этого загадочного явления выяснилась неожиданно просто: в такой цвет дождевую воду окрасила пыльца американского тополя, поднятая в воздух сильным ветром и смешавшаяся с каплями дождя.

А вот другой случай, произошедший недавно, в 2009 г., в Чите. Грянул гром, и вместе с дождем на землю хлынули желтые и зеленые потоки. Синоптики объяснили это необычное явление тем, что с приходом тепла повсеместно и буйно зацвели деревья, кустарники и луговые травы. Сильный ветер поднял

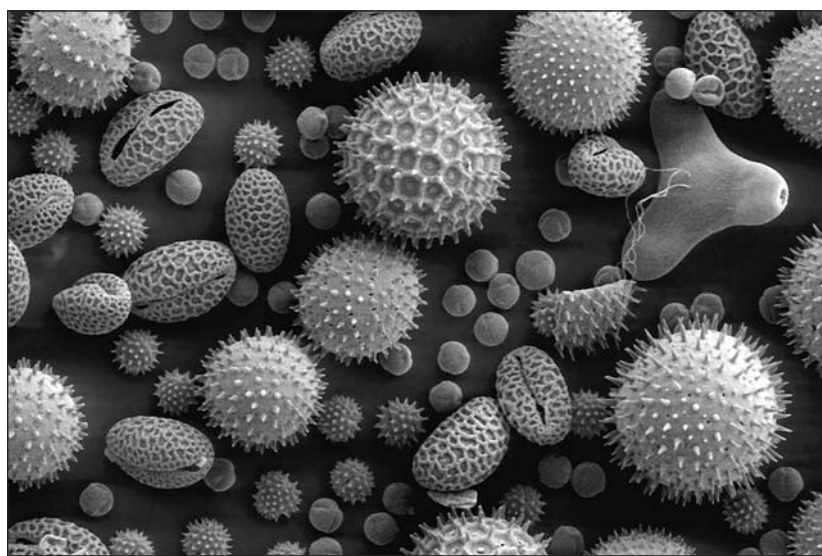


Отпечатки листьев голосеменных растений, сохранившиеся с мезозоя.

<http://www.paleostratmuseum.ru>

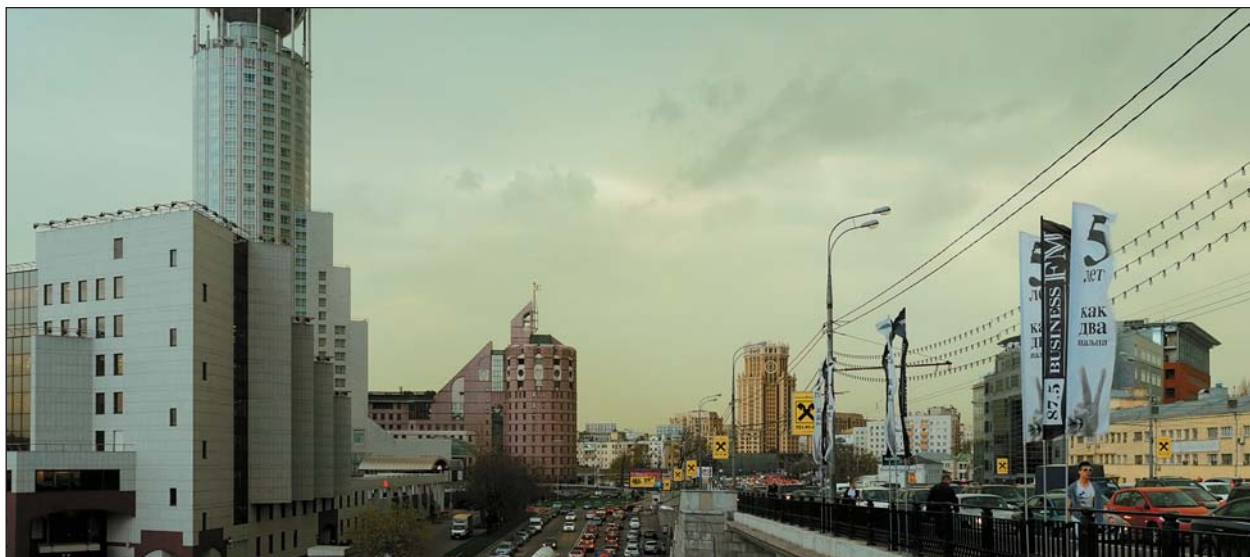
пыльцу в воздух, и она выпала на город вместе с дождем. Пыльцевые облака часто покрывают и Москву, придавая небу над городом весьма необычные оттенки.

Возможность изучать пыльцу растений появилась только в 1675 г., после того как Антони Левенгук изобрел микроскоп. С этого времени перед учеными открылся мир, полный чудес, невидимых простым глазом. Усовершенствование микроскопа позволило человеку понять, что все окружающее ранее познавалось им неполно. Он увидел, что наряду с нашим миром обычных представлений существует другой мир — мир микромасштабов. Позднейшие исследования показали, что растения прошлых эпох имеют в этом мире своих



Пыльца подсолнечника однолетнего (*Helianthus annuus*), ипомеи пурпурной (*Ipomoea purpurea*), сидальцеи мальвоцветковой (*Sidalcea malviflora*), лилии золотистой (*Lilium auratum*), энотеры кустарниковой (*Oenothera fruticosa*) и клещевины обыкновенной (*Ricinus communis*). Увел. 500 раз.

<http://commons.wikimedia.org>



«Зеленые облака» над Москвой в апреле 2012 г.

Фото М.С.Силина

«полномочных представителей». Упав на землю или на дно водоемов, пыльца и споры постепенно покрываются наслоениями пыли, ила, торфа, песка или глины и сохраняются в этих толщах тысячи и миллионы лет.

С появлением микроскопа ботаники начали изучать морфологию пыльцевых зерен с целью понять, как у растений происходит оплодотворение. Судьбой пыльцы, которая рассеялась и погибла, тогда не интересовались. Поэтому работы по морфологии пыльцы, которые продолжались в XVIII и XIX вв., не выходили за рамки чисто ботанических исследований.

Первые находки цветочной пыльцы в ископаемом состоянии имеют более чем столетнюю давность (1854) и принадлежат немецкому ученому К.Эренбергу. Примерно в то же время его соотечественник М.И.Шульце сумел выделить споры из каменного угля с помощью специальной обработки (мацерации).

К более или менее обстоятельному изучению ископаемых пыльцевых зерен приступил швейцарский геолог Д.Фрю. Результаты его работ были опубликованы в 1885 г. в статье «Критические замечания к познанию торфа» [1].

В 1888 г., исследуя осадки озер Швеции, зоолог Ф.Трибом отметил в них обильное присутствие пыльцы сосны и ели. Регулярность этих находок привела его к выводу, что пыльцу и споры необходимо принимать во внимание наряду с прочими руководящими палеонтологическими остатками.

Ботаническое определение ископаемой пыльцы с указанием количественного соотношения видов сделал немецкий ученый К.Вебер в 1896 г. [2].

Все эти работы подготовили переход к систематическому изучению спор и пыльцы в геологических отложениях и положили начало зарождению

новых научных методов исследований — спорово-пыльцевого анализа и палеопалиноморфологии. Наибольший вклад в становление этих научных дисциплин внесли ученые России и Швеции.

Методика спорово-пыльцевого анализа была разработана в Швеции трудами Н.Г.Лагерхейма [3] и его последователя Леннарта фон Поста. Работы этих двух крупных ученых удачно дополнили друг друга. Лагерхейм — разносторонний исследователь, увлекавшийся ботаникой, — хорошо знал растительный мир всех природных зон от северных лесов и тундр Скандинавии до влажных гилей Южной Америки. Геолог фон Пост придерживался строгой систематичности в работе и всегда доводил ее до полного завершения. Оба ученых были представителями шведского правящего класса, однако блестящей карьере высоких правительственных чиновников предпочли малопонятные для окружающих научные занятия.

Окончив Упсальский университет и высшую школу в Стокгольме, Лагерхейм начал изучать бактериологию в Берлине под руководством немецкого микробиолога Роберта Коха. Год, проведенный в его лаборатории, в значительной степени повлиял на дальнейший научный путь шведского ученого. Лагерхейм занимался исследованием пресноводных водорослей, ржавчинных и головневых грибов, лишайников, систематикой растений, различными вопросами ботанической техники. Однако в историю науки он вошел главным образом как один из основоположников спорово-пыльцевого анализа.

Лагерхейм одним из первых начал экспериментальным путем приводить пыльцу живых растений в «ископаемое» состояние, т.е. придавать ей тот вид, какой пыльца приобретает в естественных условиях, находясь много лет в слоях торфа, ила

и т.п. По внешнему виду «живая» пыльца несколько не похожа на ископаемую, поэтому благодаря работам Лагерхейма и других авторов ученые смогли перейти к составлению надежных определителей.

В отличие от Лагерхейма, стремившегося охватить большой круг вопросов, продолжатель его работ по пыльцевому анализу фон Пост посвятил свою жизнь изучению четвертичного периода Швеции. Такой выбор становится понятным из-за огромной роли великих плейстоценовых оледенений в геологической истории его родины: именно на севере страны находился центр, из которого начиналось развитие покровных ледников, наступивших впоследствии на большую часть Европы.

Находки ископаемых спор и пыльцы в торфяных отложениях помогли фон Посту понять характер климатических изменений, связанных с четвертичными оледенениями. Изучая отложения ледниковых и межледниковых эпох, ученый установил 11 фаз эволюции лесов и климата. Кроме того, фон Пост значительно усовершенствовал методику спорово-пыльцевого анализа — от способов обработки образцов до приемов составления пыльцевых диаграмм. Кроме того, он убедительно доказал, что метод спорово-пыльцевого анализа может быть использован для выяснения различных вопросов четвертичной геологии и палеогеографии.

Основоположником спорово-пыльцевого анализа в России стал академик В.Н.Сукачев. Еще в 1903 г., будучи ассистентом кафедры ботаники Санкт-Петербургского лесного института, он обратился к изучению ископаемых спор и пыльцы в торфяниках. Проводя исследования болот и озер в районе г.Бологое, Сукачев нашел в торфе и сапропелях пыльцу ели, сосны, березы, ивы, споры плаунов и различных папоротников, а также попытался установить количественное соотношение видов ископаемых растений. На основании данных пыльцевого анализа Сукачев пришел к выводу, что сосна и ель произрастают в этой местности уже длительное время. Результаты его исследований были опубликованы в 1906 г. [4] и стали основой развития палинологии в нашей стране.

Круг интересов молодого ученого расширился, охватывал новые области ботанической географии, фитоценологии и лесоводства. В 1911 г. Сукачев провел ботаническое исследование растительных остатков пищи из желудка мамонта, найденного на р.Березовке в Якутии [5]. В этой работе, которая в свое время произвела сенсацию в научных кругах, были впервые за все время изучения сибирских мамонтов опубликованы уникальные сведения о растениях, которыми питались эти животные, и сделана попытка реконструировать условия их обитания. Выводы Сукачева получили дополнительное подтверждение в 1954 г., когда Б.А.Тихомиров и Л.А.Куприянова выполнили спорово-пыльцевой анализ образца содержимого желудка того же березовского мамонта [6].



Академик В.Н.Сукачев (1880—1967).

В 1939 г. Сукачев впервые нашел ископаемую пыльцу древесных пород в лессе и лессовидных суглинках. Позднее ученый сосредоточивает свое внимание на исследовании пыльцы в озерных отложениях и разрабатывает так называемый комплексный метод изучения сапропелей, благодаря которому появилась возможность получить чрезвычайно интересные сведения о четвертичной истории растительности Среднего и Южного Урала.

Многие другие научные проблемы, которыми также занимался Сукачев, не позволяли ему посвящать много времени спорово-пыльцевому анализу, но он тем не менее многократно возвращался к этим вопросам. Дальнейшее развитие палинологии в трудах Сукачева сделало его одним из ведущих специалистов в вопросах определения возраста четвертичных отложений и реконструкции ландшафтов плейстоцена.

Примерно в одно время с фон Постом и Сукачевым в России работал В.С.Доктуровский — крупнейший палеоботаник и болотовед. Изучая болота и торфы, он использовал пыльцу как палеофлористический показатель. В частности, Доктуровский пришел к выводу, что ель в России появилась значительно раньше, чем в Скандинавии. В 1915 г. он впервые в России приступил к цифровому количественному учету пыльцевых зерен в торфе. Этот цикл исследований был завершен выходом в 1923 г. обобщающего руководства «Метод анализа пыльцы в торфе» [7]. В том же году Доктуровский совместно с В.В.Кудряшовым опубликовал

ликовал первый в мире определитель пыльцы [8], который был немедленно переведен в Германии на немецкий язык.

Доктуровский внес значительный вклад в изучение межледниковых отложений. Он впервые применил метод спорово-пыльцевого анализа в археологических исследованиях, а в последующие годы приложил много сил для популяризации этого метода в нашей стране. Роль Доктуровского была тем более значительна, что он руководил изучением торфяных месторождений во многих природных зонах страны в связи с работами по осуществлению плана ГОЭЛРО. Ученый также представлял Советский Союз на многих международных конгрессах. За большие заслуги перед советской наукой в 1924 г. Доктуровский был награжден золотой медалью Российского географического общества.

Идеи применения пыльцевого анализа в геологии нашли дальнейшее развитие в работах К.К.Маркова, И.П.Герасимова, Б.М.Даньшина и других ученых.

Новое направление в развитии спорово-пыльцевого анализа в нашей стране было положено работами С.Н.Наумовой (1939, 1949, 1957), А.А.Любер и И.Э.Вальц (1938), а также Н.А.Болховитиной (1952), применившими этот метод для изучения мезозойских и палеозойских отложений. В дальнейшем анализ стал применяться и для изучения протерозойских пород. Эти работы имели большое теоретическое значение, а также получили широкое практическое применение при корреляции угольных пластов, а также при стратиграфическом расчленении протерозойских и нижнекембрийских отложений, крайне бедных руководящими ископаемыми.

С конца 1930-х годов начался новый этап в развитии спорово-пыльцевого анализа. Он был

связан с новым сепарационным методом обогащения исходных проб пыльцой и спорами, разработанным В.П.Гричуком [9]. Эта методика значительно расширила возможности применения спорово-пыльцевого анализа, позволив использовать его не только для изучения торфяников и озерных осадков, но и для исследования минеральных осадочных пород. В настоящее время метод Гричука применяется во всех палинологических лабораториях как в России, так и за рубежом.

Со временем в нашей стране появилось множество специалистов-палинологов. Лаборатории спорово-пыльцевого анализа имеются в ботанических, геологических, географических, нефтяных и многих других научно-исследовательских учреждениях и производственных организациях. Это потребовало создания специальных пособий, руководств, систематических справочников и определителей для подготовки и целенаправленной работы растущего числа палинологов. Крупным событием в отечественной истории пыльцевого анализа стало появление двух первых капитальных руководств: в 1948 г. был издан «Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии» В.П.Гричука и Е.Д.Заклинской [10], а затем — «Пыльцевой анализ» [11], созданный большим коллективом исследователей. Составителей этой книги наградили Государственной премией, а саму ее перевели на французский и многие другие языки.

Сейчас спорово-пыльцевой анализ применяется при изучении отложений всех геологических периодов. Особенно велико его значение при стратиграфии и корреляции морских и континентальных отложений, где споры и пыльца зачастую служат единственным видом руководящих ископаемых. ■

Литература

1. *Früh J.* Kritische Beiträge zur Kenntniss des Torfes // Jahrbuch der K.K. Geologischen Reichsanstalt. 1885. Bd.35. P.677—726.
2. *Weber C.A.* Über die fossile Flora von Honerdingen und das nordwestdeutsche Diluvium // Abb. Naturw. Ver. Bremen. 1896. Bd.13. P.413—468.
3. *Lagerheim G.* Metoder for pollenundersökning // Bot. Notiser. 1902. P.75—78.
4. *Сукачев В.Н.* Материалы по изучению болот и торфяников озерной области // Труды пресн. биол. ст. Имп. СПб об-ва естествоисп. Т.II. СПб., 1906.
5. *Сукачев В.Н.* Некоторые данные доледниковой флоры севера Сибири // Труды геол. музея им. Петра Великого АН. 1911. Т.4. Вып.4.
6. *Тихомиров Б.А., Кутриянова Л.А.* Исследования пыльцы из растительных остатков пищи Березовского мамонта // Доклады АН СССР, Новая серия. 1954. Т.55. №6. С.1313—1315.
7. *Доктуровский В.С.* Метод анализа пыльцы в торфе // Изв. научно-эксперимент. торфяного ин-та. 1923. №5. С.5—24.
8. *Доктуровский В.С., Кудряшов В.В.* Пыльца в торфе // Изв. научно-эксперимент. торфяного ин-та. 1923. №5. С.33—44.
9. *Гричук В.П.* Новый метод обработки осадочных пород для целей пыльцевого анализа // Труды Советской секции Международной ассоциации по изучению четвертичного периода. 1937. Вып.3. С.159—165.
10. *Гричук В.П., Заклинская Е.Д.* Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М., 1948.
11. Пыльцевой анализ / Под ред. И.М.Покровской. М., 1950.

Вспоминная Я.Б.

К 100-летию академика Зельдовича



Яков Борисович Зельдович
(1914—1987)

Российская наука широко отмечает столетие со дня рождения (8 марта 1914 г.) создателя советского ядерного оружия академика Якова Борисовича Зельдовича. Круг научных интересов Я.Б., как звали его ближайшие сотрудники, был поистине широчайшим. Физика горения и взрыва, цепные ядерные реакции, взаимодействие излучения с веществом, наконец, космология и астрофизика, которые вышли на первый план после того, как Я.Б. завершил работы по ядерным проектам.

Прошло несколько международных конференций, посвященных памяти Зельдовича. Итальянский физик Ремо Руффини организовал научный симпозиум на его родине, в Минске, 24 марта состоялась специальная научная сессия Отделения физики РАН, предстоят юбилейные заседания в Институтах химической физики и космических исследований.

Здесь мы расскажем о конференции, прошедшей 20—21 марта в Государственном астрономическом институте им.П.К.Штернберга МГУ (ГАИШ), в том самом зале, где на протяжении многих лет Я.Б. возглавлял знаменитый объединенный астрофизический семинар. На ней почти все ученики и сотрудники Зельдовича выступили с докладами, осветившими современное состояние космических исследований. Ясным лейтмотивом многих вы-

ступлений было плодотворное развитие идей, которые были высказаны Я.Б. в 70—80-х годах прошлого века. Естественно, звучали и воспоминания о наиболее ярких впечатлениях, связанных с общением с выдающимся ученым.

Свой доклад я назвал «Зельдович и Институт Ландау». Существенной частью моего выступления был пересказ воспоминаний академика И.М.Халатникова, публикуемый ниже. Халатников, основатель и первый директор Института теоретической физики им.Л.Д.Ландау (ИТФ) РАН, взаимодействовал с Я.Б. в ядерных проектах с 1946 по 1955 г. и поддерживал с ним тесные отношения в дальнейшем.

Надо сказать, что между Зельдовичем и некоторыми учениками Ландау существовала некоторая ревность, отчасти сказывавшаяся и в их научных отношениях. Так, дружба и даже соперничество существовало между Я.Б. и академиком А.Б.Мигдалом, который в 1971 г. перешел из Курчатовского института в ИТФ РАН.

Наиболее близок к Я.Б. по своему стилю и способности применять современные методы теоретической физики к решению конкретных задач был член-корреспондент РАН Сергей Иванович Анисимов. Из всех сотрудников Института Ландау только у него есть две научные работы, написан-

ные совместно с Зельдовичем [1, 2]. Поучителен рассказ Анисимова о его впечатлениях по первой заграничной поездке Зельдовича в Венгрию на научную конференцию по физике плазмы.

Очень тепло относился Зельдович к Владимиру Алексеевичу Белинскому, соавтору Халатникова и академика Е.М.Лифшица в работах по колебательному режиму вблизи космологической особенности. Я.Б. был оппонентом на докторской защите Белинского. Особенно запомнились мне два ярких эпизода, непосредственным свидетелем которых мне пришлось стать. Так, Зельдович подарил Белинскому только что поправленную им верстку статьи в журнале «Успехи физических наук» (УФН). В ней содержался акrostих «Могучий и громадный, далек астральный лад...», первые буквы которого складывались в «МИГДАЛ», а далее также в форме акrostиха следовало не слишком приличное обращение, исправленное Я.Б. в окончательном варианте. Второй эпизод относится к 1973 г. На конференции в Цахкадзоре (Армения), которой руководил Я.Б., присутствовал и академик А.Д.Сахаров. Вечером после заседаний Зельдович пригласил нас с Белинским за стол, где с ним сидел Сахаров. К этому моменту он еще не был сослан в Горький, но был уже известен своими публикациями, резко критиковавшими советское общественное ус-

тройство. Естественно, разговор за столом не касался политических вопросов, но они как бы висели в воздухе.

Я не стал в докладе подробно останавливаться на взаимоотношениях Я.Б. с его учеником А.А.Старобинским, сотрудником ИТФ РАН (недавно избранным академиком), поскольку доклад самого Старобинского также входил в программу этой конференции.

Были в моем докладе и собственные впечатления о встречах и научном взаимодействии с Я.Б. В свое время я описал их в рецензии на книгу «Знакомый и незнакомый Зельдович» (Я.Б.Зельдович, взгляд в бессмертие // Природа. 1994. №8. С.124), материалы к которой были подобраны сотрудницей редакции журнала «Природа» Н.Д.Морозовой. Сегодня нет необходимости повторять это изложение, его легко найти в Интернете. К 100-летию нашего журнала был создан полный электронный архив «Природы», теперь он размещен также на сайте РАН, его адрес: priroda.ras.ru. Интересующимся имеет смысл обратить внимание на статьи Зельдовича, опубликованные в «Природе», они во многом актуальны и сегодня.

Зельдович, несмотря на чрезвычайную занятость, считал необходимым популяризировать научные достижения и рассматривал это занятие как естественную деятельность ученого.



Участники конференции памяти Я.Б.Зельдовича в конференц-зале ГАИШа. В первом ряду ученики и ближайшие сотрудники Зельдовича: В.М.Липунов, А.А.Старобинский, А.Д.Долгов, С.И.Блинников, И.Д.Новиков, А.М.Черепашук, Г.С.Бисноватый-Коган, Н.И.Шакура, Д.Д.Соколов, Ю.Н.Гнедин, А.В.Тутуков.



В редакции УФН. Слева направо: литературный сотрудник редакции Людмила Ивановна Шубина, Яков Борисович Зельдович, научно-издательский редактор Василий Васильевич Власов, Марина Михайловна Иванина (заведующая редакцией с 1985-го по сентябрь 1988 г.). Лето 1987 г.

Но, конечно, самым любимым журналом Я.Б. оставались «Успехи физических наук», где он был членом редколлегии и опубликовал более 50 научных обзоров. Первый из них, посвященный возможности управляемой ядерной реакции в уране, относится еще к 1940 (!) году [3].

Предлагаемая вниманию читателей небольшая подборка материалов, разумеется, может дать лишь некоторые штрихи к портрету нашего замечательного соотечественника. Интерес к его яркой личности возродит и только что вышедшее новое издание уже упомянутой книги воспоминаний (второе, существенно дополненное, вышло в 2008 г.) [4].

© А.В.Бялко,

доктор физико-математических наук
Москва

Литература

1. *Anisimov S.I., Zel'dovich Ya.B.* Rayleigh—Taylor instability of the interface between the detonation products and a gas in spherical explosion // *Sov. Tech. Phys. Lett.* 1977. V.3. P.445—446.
2. *Anisimov S.I., Zel'dovich Ya.B., Inogamov N.A., Ivanov M.F.* The Taylor instability of contact boundary between expanding detonation products and a surrounding gas // *AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics.* 1983. V.87. P.218—229.
3. *Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б.* Деление и цепной распад урана // *УФН.* 1940. №4. С.329—357.
4. Знакомый и незнакомый Зельдович. М., 1993; Яков Борисович Зельдович. М., 2008; 2014.

Человек универсальных результатов

академик С.С.Герштейн

*Институт физики высоких энергий НИЦ КИ
Протвино*

Академик Яков Борисович Зельдович, столетие со дня рождения которого исполнилось 8 марта, был одним из крупнейших ученых ХХ в. Подобно Л.Д.Ландау, он владел знаниями буквально во всех областях физики и внес фундаментальный вклад во многие из них. Возможно,

он в этом смысле был последний универсал, оставшийся в мире. Ландау говорил, что не знает никого, кроме Зельдовича, кто был бы таким генератором множества блестящих идей, разве только Э.Ферми. К этим словам следует прибавить, что вряд ли еще найдется ученый, который бы столь щедро дарил свои идеи людям: ученикам, коллегам и даже конкурентам. Именно поэтому Зельдо-

© Герштейн С.С., 2014

вич оставил замечательные школы в разных областях науки, а сам, работая над наиболее важными и актуальными тогда проблемами, нередко возвращался к своим прежним работам и ученикам, развивающим их. Как отмечал И.В.Курчатov [1], характерная особенность научного творчества Зельдовича — чрезвычайно широкий диапазон вопросов, которыми тот занимался. Человеком универсальных интересов назвал его А.Д.Сахаров.

Окончив среднюю школу, Я.Б. работал лаборантом в Институте механической обработки полезных ископаемых. Во время экскурсии в Институт химической физики семнадцатилетний Яша произвел своими вопросами столь сильное впечатление на сотрудников института, что ему предложили перейти на работу в ИХФ*. Не имея официального высшего образования, Я.Б. выполнил там ряд блестящих теоретических и экспериментальных работ в области адсорбции, химической кинетики, горения и детонации. В 1936 г. он защитил кандидатскую, а в 1939 г. (в возрасте 25 лет) и докторскую диссертации. Работа по окислению азота, одна из его любимых, в настоящее время приобрела важное экологическое значение (в частности, для сохранения озонового слоя). Подлинную мировую известность принес ему цикл исследований по теории горения и детонации. Как отмечал в своем отзыве Ландау, «эти работы являются лучшими и важнейшими в этой области не только в СССР, но и во всей мировой литературе» [1]. Академик А.Г.Мержанов много позже писал: «В теории горения невозможно выполнить исследование, которое так или иначе не было бы связано с именем Зельдовича» [1]. Во время войны Я.Б. открыл новый тип горения пороха и за несколько месяцев создал внутреннюю баллистику снаряда «Катюши». Это позволило увеличить мощность снаряда (созданного эмпирически) и заложило основы теории ракет на твердом топливе.

Примечательно, что еще на ранней стадии научной деятельности Зельдовича Ландау заметил ее примечательную и очень ценную особенность. В упомянутом выше отзыве он писал: «Характерно для работ Зельдовича широкое использование им, наряду с методами «обычной» теоретической физики, также и гидродинамики. Такое параллельное



Я.Б.Зельдович.

владение обеими областями — крайне редкое среди физиков-теоретиков — является характерной и очень ценной особенностью Зельдовича, делающей для него доступными вопросы, недоступные ни для гидродинамиков, ни для физиков-теоретиков «обычного» типа» [1].

Действительно, параллельное владение несколькими областями науки позволило Я.Б. получить многие результаты, которых не могли достичь узкие специалисты, даже обладавшие высокой квалификацией. Знание ядерной физики и цепных химических реакций позволило Я.Б.Зельдовичу и Ю.Б.Харитону сразу после открытия деления ядра урана и обнаружения сопровождающих его нескольких нейтронов, сформулировать в

1939 г. условия осуществления цепной ядерной реакции деления как величайшего источника энергии на Земле. Эта работа заложила основы новой эпохи в истории человечества, которую недаром сравнивают с началом эпохи освоения огня. То, что Я.Б. имел выдающиеся достижения в самых различных областях физики и мог охватить широкий круг проблем, оказалось неоченимым для атомного проекта СССР. Как отмечали создатели американской атомной и водородной бомбы Э.Теллер и Г.Бете [1], американскому ядерному проекту таких выдающихся ученых, как Зельдович, не хватало. У них были первоклассные специалисты по ядерной физике, но не было газодинамиков, в особенности тех, кто знает ядерные и газодинамические проблемы одновременно. Имея в виду исключительную роль Я.Б. в создании атомной бомбы, участники советского атомного проекта называли его «главным теоретиком атомной бомбы» (по аналогии с тем, что М.В.Келдыша называли «главным теоретиком космонавтики»). Сейчас, когда многие документы атомного проекта рассекречены, стало известно о некоторых конкретных достижениях Я.Б. Известно, что атомную бомбу было приказано для сокращения сроков создания и гарантии от неудачи сделать по чертежам американской атомной бомбы, переданным К.Фуксом**. Перед физиками и конструкторами стояла задача с помощью сходящейся ударной волны, которая возникала при детонации взрывчатого вещества, окружающего плутониевый шар, сжать его, сохраняя сферическую симметрию, до достижения им критической массы

*Поскольку из Института Мехобр Зельдовича отпускать не хотели, распространилась шутка, что его обменяли на форвакуумный насос. Эта шутка воспринималась с юмором самим Я.Б.: «Значит, я уже в то время кое-что стоил».

** Точно так же С.П.Королеву было поручено вначале копировать немецкую ракету Фау-2, а А.Н.Туполеву — создать стратегический бомбардировщик как копию захваченного американского.

ядерного взрыва. Однако еще до испытания атомной бомбы по американскому образцу Л.В.Альтшулер, Е.И.Забабахин, Я.Б.Зельдович и К.К.Крупников на основе анализа, сделанного Я.Б., предложили в 1948—1949 гг. новую оригинальную схему обжата плутониевого заряда. Созданная с использованием этой схемы атомная бомба оказалась в два раза легче и вместе с тем (как это показали испытания 1951 г.) в два раза мощнее американской атомной бомбы, которую они должны были копировать.

Выдающуюся роль сыграл Я.Б. и в создании термоядерного оружия. Как отмечал Сахаров, именно знакомство с работами группы Я.Б. в ИХФ помогло ему придумать идею известной «слойки». А для «обжата» и подрыва «слойки» был специально привлечен Я.Б. Итоговый отчет по РДС-6с («слойке») был подписан в июле 1953 г. тремя авторами: И.Е.Таммом, А.Д.Сахаровым и Я.Б.Зельдовичем. Испытание РДС-6с, которое состоялось 12 августа 1953 г., стало важным этапом в развитии ядерно-оружейной программы СССР [1]. В результате упорного труда коллективы физиков, возглавляемые Зельдовичем и Сахаровым, разработали двухступенчатую конструкцию водородной бомбы, послужившую основой всех последующих усовершенствований термоядерного оружия. В этой конструкции осуществляется «атомное» обжатие термоядерного заряда за счет так называемой радиационной имплозии — электромагнитного излучения, возникающего при взрыве первичной атомной бомбы и направленного со всех сторон на термоядерный заряд. О многих других работах Зельдовича в Арзамасе (КБ-11, ныне Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики) говорится в статье Р.И.Илькаева и других участников атомного проекта [1].

Зельдович всегда занимался самыми актуальными проблемами физики. В начале 50-х годов в связи с открытием новых частиц и их распадов первостепенный интерес приобрела физика элементарных частиц. Я.Б. занялся ею, еще работая на «объекте», стараясь при этом держать сотрудников в курсе новейших открытий. О выдающихся достижениях Я.Б. в этой области много написано (см. [2]). Я упомяну здесь только о некоторых из них, остающихся важнейшими проблемами современной физики. Например, вопрос о сохранении лептонного (или, как называл его Я.Б., «нейтринного») числа, введенного Я.Б. в 1953 г. (и независимо Е.Конопинским и Х.Махмудом), представляет одну из важнейших проблем современной физики. Продолжаются предложенные Я.Б. эксперименты по проверке квантовой электродинамики с использованием все более точных измерений гиромангнитного отношения электронов (и мюонов).

Замечание Я.Б., что эксперименты по проверке КЭД лучше всего было бы проводить на встречных пучках, послужило для Г.И.Будкера стимулом создать первый коллайдер.

Поистине фундаментальное значение для всей современной физики частиц было предсказание Зельдовичем распада заряженного пиона в нейтральный, сделанное им исходя из составного строения пионов. Это предсказание привело к выводу, что в векторном варианте радиоактивного β -распада аналогично электрическому заряду сохраняется «слабый» заряд. Открытие слабого векторного тока и его аналогии с электромагнитным взаимодействием привело к идее, что все элементарные взаимодействия описываются так называемыми *калибровочными* теориями Ч.Янга и Р.Миллса, в которых источниками полей, переносящих взаимодействия, служат *сохраняющиеся заряды*. На основе таких теорий были построены единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий и теория сильных взаимодействий — квантовая электродинамика (см.: Природа. 2010. №1. С.3—14).

С начала 60-х годов интересы Я.Б. начинают смещаться в область астрофизики и космологии, где были сделаны крупнейшие открытия. Он приходит в эту область с уникальным знанием ядерной физики, физики элементарных частиц, химической кинетики, свойств вещества в экстремальных условиях высоких плотностей и температур. Именно благодаря его работам осуществился современный *синтез физики частиц и космологии*. Отсутствие в окружающей среде свободных кварков в концентрациях на много порядков меньших, чем это следовало из оценки, сделанной Я.Б.Зельдовичем, Л.Б.Окунем и С.Б.Пикельнером на основе теории Горячей Вселенной, стало наиболее веским доказательством «пленения» кварков (конфайнмента). Аналогичным образом отсутствие монополей (магнитных зарядов) потребовало изменения сценария развития ранней Вселенной. Полученная из космологических данных оценка верхнего предела массы мюонного нейтрино оказалась на три порядка лучше лабораторных данных (а для тау-нейтрино — на пять). Современные оценки суммарной массы нейтрино, найденные из массового спектра скоплений галактик, оказались еще в тысячу раз лучшими.

Я.Б. стал заниматься космологией незадолго до своего пятидесятилетия (что само по себе уникально). Лучшие творческие годы его были отданы укреплению военного могущества страны. Но именно достижения Зельдовича в космологии принесли ему всемирную славу и определили картину современной науки в этой области. Для описания этих достижений необходима специальная статья. ■

Литература

1. Яков Борисович Зельдович. Воспоминания, письма, документы. М., 2008.
2. *Герштейн С.С.* Работы Я.Б.Зельдовича и современная физика частиц // УФН 2004. Т.174. №8. С.911—918.

Человек осведомленный

академик И.М.Халатников

*Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау РАН
Москва*

Я много общался с Яковом Борисовичем Зельдовичем. Расскажу лишь о нескольких эпизодах, характеризующих эту яркую личность.

Last Friday (Последняя пятница)

Эту историю мне бы хотелось начать с конца. По крайней мере с одного из концов. Но, как это часто бывает, к концу одной истории привязывается начало другой.

В воскресенье 7 января 1962 г. Ландау решил поехать в Дубну к своей племяннице Эллочке, у которой были семейные проблемы: он хотел вмешаться и помочь ей справиться с кризисной ситуацией. Дау, как академику, полагалась академическая машина, но шофер отказался ехать, так как в тот день дорога была очень скользкой, а ехать предстояло более ста километров. Кроме академического у Дау был еще, так сказать, «личный шофер» — Женья, Евгений Михайлович Лифшиц, который всегда безотказно возил Дау всюду по его надобностям. Однако Женья тоже побоялся ехать в Дубну. Это, может быть, был вообще первый случай, когда Женья отказался везти Ландау. Тогда Дау решил позвонить своему ученику Володе Судакову, который работал в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) и к тому времени совместно со мной и Лифшицем сделал несколько хороших работ по гравитации. (Судаков работал в теоротделе ИТЭФа, который возглавлял И.Я.Померанчук. В 1961 г., когда у нас с Лифшицем возникли вопросы по проблемам космологических особенностей, Дау посоветовал нам привлечь Володю. Мы пригласили его и вместе исследовали геодезические линии в гравитационном поле.)

Дау дружил с семьей Судаковых. Он позвонил им, Володе и Вере, с просьбой отвезти его в Дубну. Те не могли отказать Ландау, хотя у Володи был очень небольшой опыт вождения. Они заехали за ним на своей машине, новой «Волге-21», и отправились в Дубну. По дороге они проезжали город Долгопрудный. Там находится Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех) к которому мы все имели отношение. Многие сотрудники Института физпроблем преподавали в Физтехе почти с самого его открытия. Я участ-

вовал в первых приемных экзаменах, однако на работу в Физтех меня не зачислили. Подобная же история случилась и с Г.И.Будкером, сотрудником И.В.Курчатова. Потом, два года спустя, меня все же взяли, я проработал полгода, и меня уволили оттуда на том основании, что у меня нет допуска достаточной степени надежности. Но это другая история.

В районе Долгопрудного Володя, пытаюсь объехать автобус, стоящий у остановки, выехал на встречную полосу. Случилась авария. Он сумел уклониться от прямого лобового столкновения со встречной машиной, так что удар пришелся на боковую правую заднюю сторону «Волги», где как раз сидел Ландау. Протоколов с места происшествия я сам не видел, но рассказывали, что при столкновении дверь машины открылась, и Дау выпал. Тогда-то он и ударился виском. Есть другая версия, что он ударился головой о стойку машины с правой стороны. В целом Ландау не получил серьезных травм, кроме вот этого рокового удара в висок. Ведь Вера тоже сидела на заднем сиденье, рядом с Ландау, а между ними стояла корзина с яйцами, которые везли в Дубну, так как там было плохо с продуктами. Все яйца остались целы.

Дальше началась эпопея спасения Дау. Все это случилось, как я уже говорил, в воскресенье.

А вот что произошло в пятницу, накануне поездки в Дубну. Институты химфизики и физпроблем расположены рядом, их окружает парк. В этом же парке стоят жилые дома сотрудников. Зельдович жил в трехэтажном доме Института химической физики, это примерно в ста — ста пятидесяти метрах от дома Ландау. Они были соседями.

В пятницу, 5 января, Яков Борисович посетил Ландау, чтобы обсудить научные вопросы, которые его в тот момент волновали. Дау никогда никому не отказывал в научных обсуждениях. Несмотря на то что в 1949 г. отношения с Зельдовичем были несколько испорчены, на научных контактах это не сказывалось. В последние годы Ландау говорил мне, что мечтает дожить до времени, когда сможет высказать одному человеку все, что о нем думает. Что именно Ландау о нем думает, он мне не сказал, так что о том, кто этот человек, я могу только догадываться.

Я полагаю, это было связано с тем периодом, когда у них были прерваны отношения и Ландау вообще отказывался иметь дело с Зельдовичем. Ссора произошла на почве совместной приклад-

ной деятельности. Я имею в виду атомный проект.

Ландау, как человек, в 1938 г. прошедший через репрессии и даже проведенный целый год в тюрьме на Лубянке, участвовал в атомном проекте из страха перед Сталиным, который инициировал весь проект и дал задание включить в него Ландау. Дау считал, что участие в проекте защищает его, и было от чего — в конце 1940-х годов уже полным ходом шли и дело врачей, и другие процессы. Но участвовал Дау в этом проекте без большого энтузиазма. Он, безусловно, делал все, что ему поручали, и старался, как и мы все, выполнить задание как можно лучше, но никакой инициативы при этом не проявлял. Тем более что изобретательских талантов, в отличие от Зельдовича, у Дау не было. Он не изобретатель, а аналитик, это совсем другое качество, особенно в технической области применения.

Что же касается Зельдовича, то Дау, наверное, считал, что тот проявлял излишнюю инициативу. Яков Борисович пытался включать Дау в какие-то подпроекты в рамках основных работ, не спрашивая его согласия. Это обижало Ландау. Он считал, что это проявление бестактности и что Зельдович не имеет на это права. Это и стало основой конфликта, приведшего к разрыву и к тому, что Ландау и вся наша группа впоследствии переключилась на развитие новой части проекта, которая как раз тогда образовалась под руководством А.Д.Сахарова и И.Е.Тамма.

Так что и дальнейшие задания мы уже получали, и все расчеты выполняли уже только для них, а отношения с Зельдовичем в рамках атомного проекта были прекращены. Оставался только один вариант, который и я, и Сережа Дьяков, мой очень талантливый, рано ушедший партнер, доделывали для Я.Б.Зельдовича и Ю.Б.Харитона. Таким образом, мы работали на Ландау и Сахарова, продолжая свою основную деятельность, и еще имели свою «маленькую лавочку» для Зельдовича. Затем этот проект тоже закрылся.

В пятницу 5 января 1962 г., которую теперь уже можно назвать последней пятницей Ландау, Зельдович пришел к нему с вопросом. Они уже общались и по-соседски, и по науке, отношения были прерваны только в их «атомной» части. Тем более что сам Зельдович к тому моменту тоже практически свернул свою деятельность в Сарове и занялся астрофизикой.

Поэтому вопрос, который он задал Ландау, был такой: может ли скорость звука в исключительных случаях достигать своего предельного значе-



Я.А.Сморodinский, Л.Д.Ландау и Я.Б.Зельдович.

ния — скорости света? Из теории относительности мы знаем, что скоростей больше скорости света быть не может. А Зельдовичу было очень важно знать: может ли скорость звука в определенной среде все же быть равной скорости света? Возможна ли такая среда, в которой звук бы распространялся со скоростью света?

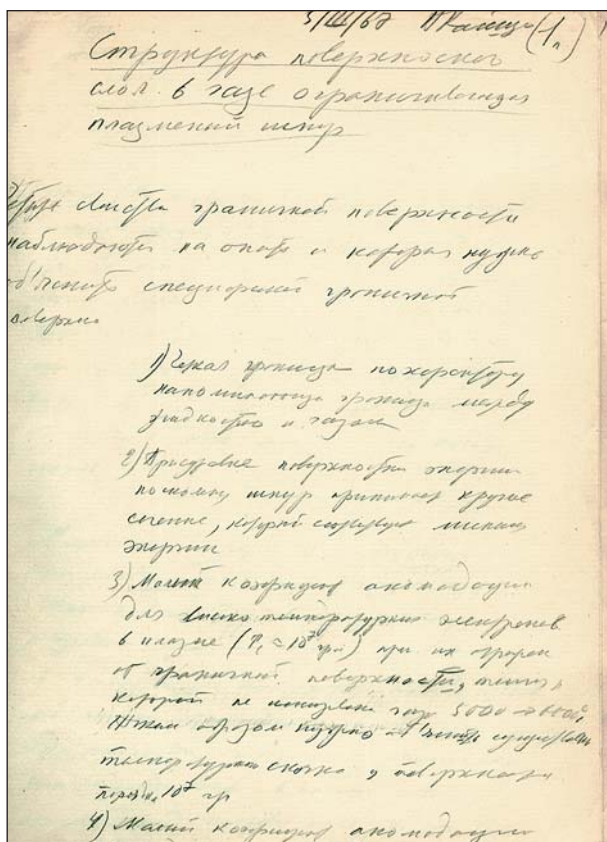
Ландау категорически ответил ему, что это невозможно. Однако сейчас мы рассматриваем некие предельные случаи в космосе, при которых скорость звука может быть равной скорости света. Мы используем такие уравнения состояния, из которых следует равенство скорости звука скорости света.

Но в ту пятницу Дау сказал Зельдовичу, что это невозможно. Что он при этом имел в виду, мы не знаем и никогда не узнаем до конца наших дней. Это была последняя пятница, когда Ландау занимался физикой, и последний разговор Дау о науке со своим учеником. Именно в последнюю пятницу Ландау Зельдович был у него. Почти библейский сюжет...

Миллион для Капицы

После автокатастрофы Ландау в связи с болезнью ушел от дел — формально он числился заведующим теоретическим отделом, но не был в состоянии заниматься физикой, и с 1962 г. обязанности заведующего теоретическим отделом исполнял я. (А с 1965 г. я стал директором Института теоретической физики им.Л.Д.Ландау.) Дау в то время от всех научных разговоров уклонялся, а на все вопросы отвечал: «Сейчас не будем, вот выздоровею, тогда поговорим».

В те годы Петр Леонидович Капица так же, как и многие физики, пытался заниматься возможно-



Рукопись П.Л.Капицы «Структура поверхностного слоя в газе, ограничивающем плазменный шнур». 1967 г.

стью применения атомных достижений ядерной энергии на мирном поле. Речь шла о том, как получить высокотемпературную плазму и удержать ее в магнитном поле. Занимались плазмой в первую очередь Сахаров и Тамм, поддержал идею и Будкер, который занимался этим очень серьезно — так что работы привели к созданию Новосибирского научного центра. (Будкер был учеником и сотрудником Курчатова. У Будкера было труднопроизносимое еврейское имя Герш Ицкович, и Курчатов переименовал его в Андрея Михайловича.)

Капица тоже решил использовать свои знания и достижения в электронике больших мощностей, чтобы получить в электрическом разряде высокие температуры, достаточные для ядерной реакции в смеси дейтерия и трития. Энергетика больших мощностей, которой он занимался в ссылке «на даче», уже принесла большую пользу: по этим разработкам создавались оригинальные генераторы высокочастотного излучения, и вообще энергетика — ценнейшая отрасль народного хозяйства. Так что Капице хотелось тоже внести свой вклад в разработку применения мирного атома.

Сам Капица был человек «наказанный» и долгое время жил в полурепрессированном состоянии у себя на Николиной горе. И он решил обос-

новать эту необходимость развития электроники больших мощностей потенциальной способностью сбивать самолеты электромагнитным излучением. Иными словами, по существу он уже тогда предвидел возможность применения лазерного оружия против самолетов. Самых лазеров тогда еще не было, а идея применения такого излучения у Капицы уже была! Он написал об этом Г.М. Маленкову, его поддержали финансово, и он получил возможность для своих исследований.

Капица, поняв, что конъюнктура сложилась в пользу мирного использования атома, решил, что с помощью электрического разряда он сможет получить необходимые для этого высокие температуры. И Петр Леонидович упорно занимался получением высоких температур в разрядной трубке более 30 лет.

Далее мы перенесемся в 1984 г.

Надо сказать, что идея Капицы была ошибочной. Это понимали многие. Всем из его близкого окружения было очевидно — его занятия бесплодны. В разрядной трубке нельзя получить температуры, необходимые для ядерной реакции в легких элементах, — это температуры порядка ста миллионов градусов. И теоретики не то чтобы говорили ему об этом напрямую (с Капицей это было невозможно), но периодически задавали Петру Леонидовичу наводящие вопросы, ответы на которые привели бы его к пониманию своей неправоты. Но у Капицы произошло своего рода заикание, а огорчать его не хотели — он был немолод, а это было дело 30 лет его жизни.

После ухода Ландау первое время заведующим теоретическим отделом в институте у Капицы был Илья Лифшиц. Одним своим присутствием он украшал институт, Лифшиц был полезен в области физики твердого тела и начал активно развивать физику полимеров, но лично Капице полезным быть не мог. А после ухода И.М.Лифшица в 1983 г. Сергей Капица посоветовал отцу пригласить на должность заведующего теоретическим отделом Зельдовича. Мотивация была такая: Яков Борисович занимался ядерными реакциями, все про это понимает и сможет помочь Капице разобраться с его разрядными трубками, в которых тот хотел получить ядерную реакцию.

В 1983 г. Зельдович перешел работать в теоретический отдел Института физпроблем. Основное направление деятельности института в те годы — физика низких температур, которой он не очень интересовался. Яков Борисович в то время активно занимался астрофизикой, посвящая этому все свое время, многое сделал и многого достиг. Но он стал заведующим и должен был помогать Капице с его трубками.

В то время в Академии наук СССР были приняты ежегодные проверки подведомственных институтов. Эти процедуры проводились под эгидой вице-президента АН СССР В.А.Котельникова, великого радиопизика. Комиссия из авторитетных

ученых, академиков и членов-корреспондентов соответствующего отделения Академии, проверяла институты. По их итогам комиссия писала отчет и сдавала его — и так регулярно все институты подвергались тщательной экспертной проверке (сейчас о необходимости подобных действий много говорят, но это не приносит результатов, об этом можно только мечтать, а тогда это было регулярной практикой и работало очень четко). После чего, уже за подписью Котельникова, заключения по таким отчетам направлялись в институты для устранения недостатков. Обычно это сводилось к небольшим финансовым нарушениям (надо сказать, что комиссия проверяла и научную, и финансовую деятельность институтов).

Одну из комиссий, проверивших Институт физических проблем АН СССР в начале 1980-х годов, возглавлял Р.З.Сагдеев. Он тоже понимал, что Капица идет по ложному пути, но, будучи человеком тактичным, не сказал Петру Леонидовичу о его заблуждениях. Хотя, как человек научно честный, докладывая результаты проверки президенту Академии наук А.П.Александрову и вице-президенту В.А.Котельникову, интересовавшимся работами Капицы, свое пессимистическое отношение и скепсис высказал. На что те в один голос заявили: что же, у нас не найдется миллиона для Капицы?

Тогда это были большие деньги, но Капица был нобелевским лауреатом. Так что, даже несмотря на то что Капица шел по ложному пути, миллион для него у правительства и Академии нашелся.

Зельдович осторожно обсуждал с Капицей его эксперименты. Он понимал, что в разрядной трубке невозможно создать такие высокие температуры и давление, которые необходимы для ядерной реакции. Тем более не существует сил, способных удержать в трубке подобные параметры. Он пытался осторожно объяснить это Капице. При этом возникал естественный вопрос: если в трубке все же созданы такие температуры и идет ядерная реакция, то должны появиться нейтроны. Их уже невозможно удержать в трубке, а значит, их можно зарегистрировать. И где же они тогда? Но Капица на это отвечал, что в трубке возникает «двойной слой», который не пропускает нейтроны наружу. Эту идею он заимствовал из теории жидкого гелия, совсем другой области физики, и это вообще не имеет отношения к нейтронам. Но Капица говорил, что возникает стенка, «двойной слой», который все и блокирует.



Я.Б.Зельдович на одной из конференций. 1980-е годы.

Петр Леонидович вообще очень ревниво относился к своим работам. Его сын, Сергей Капица, лаборатория которого находилась в том же помещении, часто заходил в лабораторию Петра Леонидовича и общался со всеми. Но однажды Сергей начал давать отцу советы, в которых, по-видимому, сквозило некое сомнение. После чего Капица запретил ему входить в свою лабораторию. Надо сказать, что такая практика в институтах, занимающихся секретными разработками, в принципе существует. Человек из, скажем, лаборатории №15 не мог ходить в лабораторию №14, чтобы не знать о разработках других подразделений. В принципе это нормально и принято не только у нас, но и повсюду в мире. Это делается для предотвращения утечки важной научной информации. Но Сергею запретили вход в лабораторию отца только после того, как он стал вникать в существо работы.

И вот на сцене появился Зельдович. Его пускали в лабораторию Капицы. Петр Леонидович знал о его опыте и достижениях в развитии атомного проекта, ждал от него помощи, уважал его мнение и допускал на свою «кухню». И тут Зельдович нарушил негласное табу. По существу, оно было неявным и никогда вслух не высказывалось, но как бы висело в воздухе. Все свои о нем знали и говорили с Петром Леонидовичем очень осторожно. Зельдович же не отличался особой деликатностью, и начал высказывать естественные сомнения. Он определил самое узкое, самое слабое место в рассуждениях и опытах Капицы: где нейтроны? Капица ему рассказал, что они не вылетают, потому что их удерживает «двойной слой», на что Зельдович предложил эксперимент, который самому Капице в голову не приходил. Зельдович

предложил пустить нейтроны на трубку снаружи. Если такой «двойной слой» существует, то нейтроны от источника не пройдут сквозь трубку, потому что «двойной слой» их задержит.

Капица понял, что такой опыт имеет смысл, и согласился его сделать. Вооружился источником нейтронов и поставил эксперимент.

На письменном столе Петра Леонидовича, как у каждого уважающего себя руководителя, стоял традиционный перекидной календарь. Самой последней записью на последней исписанной странице календаря остался набросок этого эксперимента.

Капица поставил эксперимент. И нейтроны, естественно, прошли насквозь — никакого «двойного слоя» там не было. Для Капицы это был удар.

Возможно, идея такого эксперимента приходила в голову и другим сотрудникам и коллегам Капицы. Но они, боясь и представляя себе последствия отрицательного результата для Петра Леонидовича, об этом не говорили. Яков Борисович же, как человек новый, не подумал о серьезных последствиях, и решил, что тут, как и в любой научной дискуссии, можно и нужно говорить все. Но каждая научная дискуссия должна учитывать кроме научного также и человеческий, психологический аспект обстоятельств. Этот эксперимент мог оказаться убийственным для Капицы. Так и произошло. У Капицы случился инсульт, он попал в больницу, где, не приходя в сознание, через какое-то время скончался.

День записи в календаре — четверг. Удар с Петром Леонидовичем случился в ночь на пятницу.

Так история Якова Борисовича Зельдовича пересеклась с историей нашего института, Института физических проблем. Последний разговор с Ландау и последняя запись Капицы. Страсти и сюжет, достойные Шекспира. Великий человек заблуждается, другой великий человек нечаянно говорит ему правду — и тот умирает.

Итальянские встречи

Зельдовича, как человека «осведомленного», т.е. владеющего государственной тайной, после его ухода из проекта в Сарове, естественно, за границу не пускали. И Яков Борисович, ставший уже известным астрофизиком и всемирно знаменитым ученым не только в качестве создателя бомбы, не мог никуда поехать даже на научную конференцию. Но времена менялись, режим смягчался, и руководство Академии наук неоднократно ходатайствовало, чтобы Зельдовича начали пускать на международные конференции.

Сначала его выпустили на несколько дней в Грецию, в Афины, — но к этому я никакого отношения не имел.

У меня было хобби — организовывать международные симпозиумы. Это началось с наших ре-

гулярных совместных советско-американских симпозиумов, которые немало прославили как нашу, так и американскую науку. Кеннет Уилсон под влиянием дискуссий на этих симпозиумах в конце концов решил проблему фазового перехода второго рода и получил Нобелевскую премию. Нетривиальная идея состояла в том, что эту задачу нужно было решать в пространстве с дробной размерностью.

Так что наши симпозиумы оказались необычайно плодотворны. И у нас возникла подобная программа, причем как раз по астрофизике, уже с итальянскими учеными.

С итальянской стороны программу возглавил Ремо Руффини. Это известный астрофизик, ученик Джона Уилера из Принстонского университета, который, в свою очередь, совместно с Бором создал капельную модель ядра.

Руффини успешно работал в США, в Стэнфордском университете, но к тому времени он немного испортил отношения с Ч.Мизнером. Это был наш с Лифшицем и Белинским научный соперник. Ремо обнаружил ошибку в расчетах Мизнера по реликтовым излучениям. Он не сказал об этом самому Мизнеру, но после публикации его работы опубликовал свою, правильную. Красиво это или нет, можно спорить, хотя в науке это допустимо — он работал над той же проблемой, получил свой результат и опубликовал его. Но после этого Ремо решил вернуться в Италию, где ему благоволил великий итальянский физик Эдоардо Амальди, ученик Энрико Ферми.

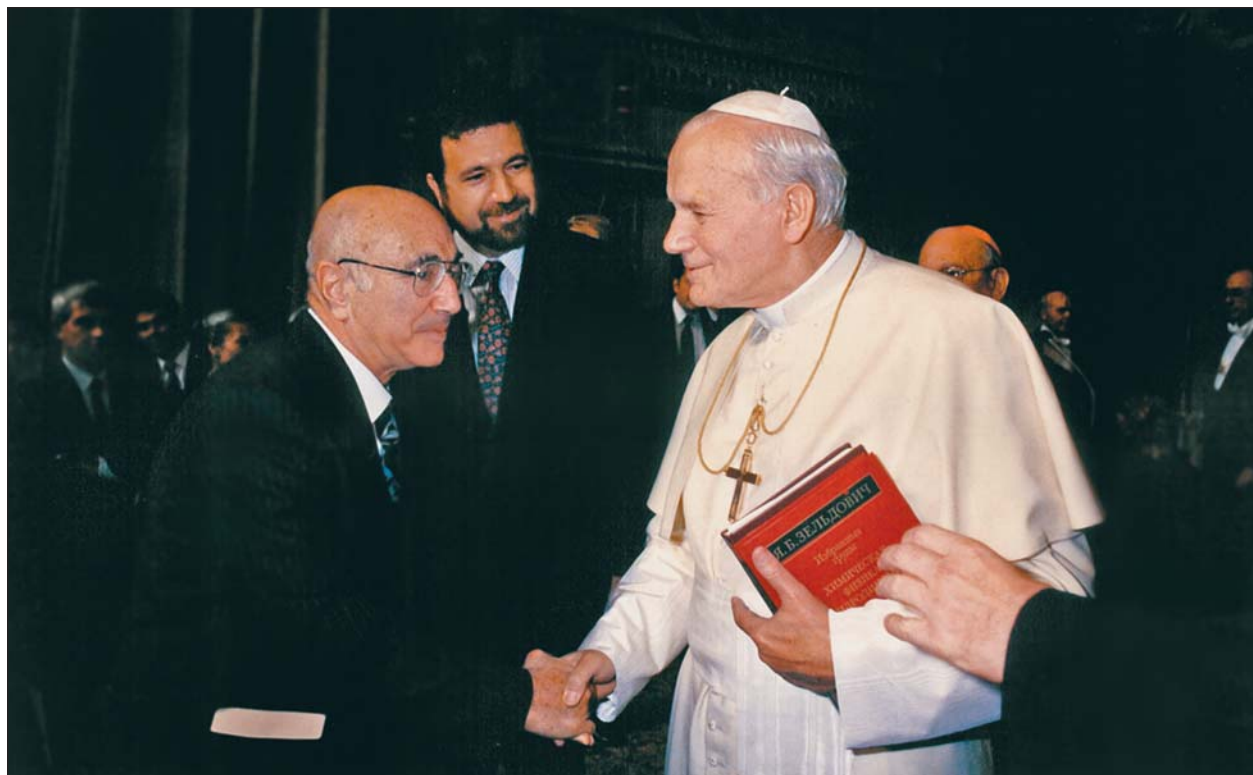
Амальди тоже приезжал в Москву, на мой 70-летний юбилей. Это было в 1989 г. Еще не окончилась холодная война, так что визит состоялся в рамках нашего совместного советско-датского симпозиума с Институтом Нильса Бора. Правда, большую часть делегации составляли американцы, которые из-за холодной войны приезжали в СССР в составе делегации датчан.

Мы же с Руффини организовывали совместные советско-итальянские симпозиумы по астрофизике в Риме. И Зельдович попросил меня включить его в состав делегации.

В этой поездке произошли две очень престижные и значимые встречи. Участников симпозиума принял президент Итальянской Республики. Этот прием проходил в знаменитом здании, президентском дворце Палаццо дель Квиринале.

Вторая встреча была еще более значимой и интересной. Дело в том, что Руффини имел большое влияние в Ватиканской академии. Это ему обеспечил его друг Амальди. И вот Ремо устроил для участников симпозиума визит в Ватикан и встречу с папой римским Иоанном Павлом II. Не все участники получили это приглашение — но Зельдович, естественно, был приглашен.

А у Зельдовича к тому моменту вышел двухтомник его работ по астрофизическим исследованиям. И он привез две огромные книги в пода-



Я.Б.Зельдович вручает папе римскому Иоанну Павлу II свои труды. На заднем плане итальянский физик Ремо Руффини.

рок Иоанну Павлу II. Обычно папе на таких встречах не делали подарков — у меня это был уже второй визит, и я был знаком с протоколом. Мы с Руффини сидели в первом ряду, прямо напротив папы, а Зельдович почему-то оказался не с нами. Он сидел в третьем или четвертом ряду и все время пытался встать и пробежать к Иоанну Павлу II, чтобы вручить ему эти книги. А там была папская гвардия, охрана, и вот эта гвардия все время очень нервничала, что кто-то из неизвестных посетителей пытается вскочить и прорваться к папе. Но в конце концов Зельдович добился своего и вручил Иоанну Павлу II два тома. Тот принял книги, пожал ему руку и тепло поблагодарил.

Заплывы с нитроглицерином

Зельдович как-то рассказывал мне, как ездил отдыхать в кремлевский санаторий в Ялте и много там плавал. И хвалился, что, хоть у него тогда побаливало сердце, он принимал нитроглицерин и плавал по несколько километров, не щадя своего здоровья.

А вообще Яков Борисович гордился своей физической формой. Я неоднократно наблюдал, как они со своим другом А.Б.Мигдалом в холле Института физпроблем после семинара Ландау мерились силой, пытаясь положить согнутую в локте руку. Эти две яркие личности соревновались

во всем, увлекались поэзией и часто обменивались острыми шуточными эпиграммами, которые быстро становились известными в кругу друзей-физиков.

Нобелевский вопрос

Часто возникает вопрос: получил бы Зельдович Нобелевскую премию, если бы дожил, и за какую именно работу? У него, безусловно, было много выдающихся трудов. Среди них есть одна, очень важная, ее результат назван эффектом Зельдовича—Сюняева. Это некое явление, связанное с черным излучением, — тонкий, малый эффект, показывающий, как влияет окружающее пространство на черное излучение.

За эту работу Яков Борисович посмертно получил премию Фридмана. Когда рассматривалось вручение этой премии, я был председателем комиссии — и мы тогда в виде исключения включили Зельдовича посмертно, хотя раньше это не практиковалось. Не исключено, что, если бы Яков Борисович прожил дольше, он бы получил за это и Нобелевскую премию. Но тут очень важно найти правильную формулировку, за что именно давать премию. А такая формулировка появилась лишь относительно недавно, после того как удалось провести наблюдения этого эффекта, — только тогда его смогли вполне оценить. ■

Наставник молодежи

Б.В.Комберг,

*доктор физико-математических наук
Институт физических наук им. П.Н.Лебедева РАН
Москва*

С то лет со дня рождения выдающегося физика XX в., основателя советской школы релятивистской астрофизики и яркого неординарного человека академика Якова Борисовича Зельдовича исполнилось 8 марта 2014 г. И хотя со дня его скоропостижной кончины 2 декабря 1987 г. прошло уже больше 25 лет, годы работы под его руководством — сначала в Институте прикладной математики (ИПМ) АН СССР (1964—1974), а затем в Институте космических исследований (ИКИ) АН СССР (1974—1979) — остаются для меня незабываемыми и с годами все более «очевидными и невероятными».

Впервые о Якове Борисовиче я услышал в ГАИШе (Государственном астрономическом институте им. П.К.Штернберга Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова) от И.С.Шкловского при каком-то разговоре в его кабинете, в 61-й комнате. Было это в 1963 г., когда я начал писать дипломную работу по спиновым поправкам в синхротронном излучении под руководством В.Л.Гинзбурга в Физическом институте им. П.Н.Лебедева АН СССР (ФИАН). Защитив диплом на кафедре астрономии в ГАИШе, я остался «нераспределенным», так как меня не взяли в п/я («почтовый ящик» — т.е. закрытую номерную научно-исследовательскую организацию) на лазерную тематику (скорее всего, из-за 5-го пункта), а астрономических мест для меня в Москве не нашлось. К моему счастью, незадолго до этого в ГАИШ для разговора с Игорем Новиковым, который после окончания аспирантуры (у А.Л.Зельманова) работал там ученым секретарем, пришел Яков Борисович для обсуждения своей работы по «полузамкнутым мирам». Компетентия Новикова в этом вопросе впечатлила Я.Б., и он предложил Игорю перейти на работу к нему в отдел, который создавался по решению президента Академии наук М.В.Келдыша в ИПМ. С переходом из ГАИША в ИПМ у Новикова возникли некоторые проблемы, которые быстро разрешились после телефонного разговора Якова Борисовича с ректором МГУ академиком И.Г.Петровским.

Так в 1963 г. появился отдел релятивистской астрофизики, в котором кроме самого Я.Б. были

еще А.Г.Дорошкевич, вернувшийся с ним в Москву, а теперь еще и И.Д.Новиков. Так как в отделе были незаполненные штаты, то Игорь предложил мне и Лёне Грищуку попытать счастья и пройти собеседование с Я.Б. Прежде чем решиться на такой ответственный шаг, мы с Грищуком решили посоветоваться с профессором С.Б.Пикельнером, который горячо одобрил эту идею, но предупредил нас, что Я.Б. в разговоре может допускать непарламентские выражения. («Святой Мона», как звали С.Б. в ГАИШе, думал, что это может нас с Лёней напугать...) Собеседование с Я.Б. состоялось с неожиданным результатом: я его прошел, а Лёня — нет. (Возможно, тут сыграл роль разговор с Я.Б. о моем дипломе у Гинзбурга.) Забегая вперед, скажу, что впоследствии у Л.П.Грищука было несколько важных работ с Я.Б., в 1982 г. Зельдович стал по совместительству заведующим теоретическим отделом в ГАИШе, а Лёня — его заместителем.

Итак, в памятный для меня день 22 апреля 1964 г. после некоторой «заминки» с моей анкетой состоялся мой приход в отдел Якова Борисовича третьим его сотрудником.

Я.Б. тогда было 50 лет, он поражал неумемной энергией, обширными знаниями, эрудицией и физической интуицией, четкостью мысли и слов, а также каким-то детским нетерпением в получении ответов на поставленные вопросы. При этом он еще успевал впитывать новые понятия и знания из смежных для него областей. Я как-то спросил его, почему он после работы над атомным проектом решил заняться именно астрофизикой? Я.Б. ответил, что для этого были две причины: во-первых, он рассчитывал «отдохнуть» в науке после многолетней плановой работы на военных и, во-вторых, лучше разобраться в X главе второго тома Ландау и Лифшица, посвященной тяготению. Однако, заметил он, «отдохнуть» не получается из-за большой конкуренции среди астрофизиков — она заставляет все время торопиться.

Отдел быстро разрастался за счет аспирантов из Московского физико-технического института и МГУ. Стали проводиться рабочие семинары, на которых надо было делать рефераты статей из зарубежных журналов, которые Я.Б. лично отмечал ручкой прямо в оглавлении. Всячески приветствовалась и инициатива. Заключались научные пари, когда проигравший выставлял бутылку нар-

зана с наклейкой о причине проигрыша. Случалось, хотя и редко, что бутылку приходилось ставить и шефу. Причем в особых важных спорах Я.Б. выставлял коньяк.

Семинары проводились в нашей небольшой комнате на втором этаже ИПМ, куда набивалось много народа, в том числе и приезжих. Было еще неудобство с выписыванием многочисленных пропусков на проход в здание. Поэтому по договоренности Якова Борисовича с Гинзбургом и Шкловским было решено организовать Общественный астрофизический семинар (ОАС) в ГАИШе. Секретарем семинара попросили быть меня. Яков Борисович всегда внимательно следил за формированием повесток и их рассылкой по многим адресам. Заседания проходили по четвергам через неделю. Первое заседание ОАС состоялось 28 апреля 1966 г., а последнее при моем секретарстве — в 1979 г., когда я попросил Я.Б. меня от этой обязанности освободить. (Все 236 повесток семинара я сохранил в своем архиве. Они дают наглядное представление о проблемах астрофизики в те годы.) Хотя начинался семинар с тремя сопредседателями, но триумvirаты, как известно, неустойчивы: очень скоро ОАС стал семинаром Зельдовича и собирал полные залы слушателей из разных городов СССР и зарубежных стран. (Рассказ о семинаре — это отдельная и интересная тема со своими взлетами и падениями, фаворитами и неудачниками.)

Возвращаясь к научному темпераменту Я.Б., который стремился развить в сотрудниках наступательный стиль, мне вспоминается, как он, даже находясь в отпуске, присылал нам письма с укорами относительно медлительности в работе и упущенных возможностях. Он жаловался, что на новые темы ему приходится брать новых сотрудников, так как старых не сдвинуть с места. Яков Борисович спешил наверстать в науке время, когда он был от науки оторван на оборонные задачи. Такая его азартная, нетерпеливая позиция иногда приводила к блестящим результатам, а иногда вела по ложному пути. Не всегда удавалось выдерживать напор и не поддаваться на заманчивые перспективы. Я это знаю по себе, когда после обнаружения первой джоины квазаров Я.Б. предложил мне построить для квазаров функцию светимости и поискать для переменных квазаров «цефеидную» зависимость между светимостью и характерными временами переменности. Мне удалось, правда, убедить Я.Б., что для достоверных выводов нет пока достаточного



Я.Б.Зельдович и И.С.Шкловский.

количества данных. С другой стороны, когда мы написали по моему предложению статью о синхротронном излучении протонов и послали ее в «Астрономический журнал», Я.Б. неожиданно забрал ее из редакции, сказав, что она не представляет интереса. (Сейчас на эту тему публикуется много работ.) Вспоминаю, как Я.Б. прямо у доски показал, как можно объяснить наблюдаемые «сверхсветовые» скорости. Так, как выяснилось позже, он объяснил ошибочный результат Т.Меттьюза об очень быстром исчезновении оптической туманности вокруг одного из квазаров. Позже М.Рис схожим образом проинтерпретировал наблюдаемые «сверхсветовые» скорости парсековых радиовыбросов из активных ядер галактик (Я.Б. не посчитал нужным публиковать свой результат как очевидный).

Яков Борисович был демократичным руководителем и готов был обсуждать научные проблемы с любым интересующимся, вне зависимости от регалий и званий. Но, если разговор был ему неинтересен, он мог его и оборвать. Не любил Я.Б., когда поставленные им задачи решались, по его мнению, слишком медленно. Тогда он сам получал нужный ответ или привлекал к решению более активных сотрудников. А «провинившегося» мог некоторое время как бы не замечать. Когда он уезжал в отпуск, то иногда, повторю, присылал в отдел письма, в которых выражал недовольство медлительностью в решении тех или иных «горячих» задач. Вот, к примеру, какое письмо в конце 1972 г. прислал Яков Борисович в космологическую группу 11-го отдела (И.Д.Новикову, А.Г.Дорошкевичу, В.Н.Лукашу, А.Г.Полнареву, С.Ф.Шандарину).

Ваша группа находится в кризисном положении. Не поняв этого, вы не сможете преодолеть

кризис. Ниже я многое утрирую сознательно, о некоторых положительных моментах умалчиваю, но вам нужно понять прежде всего то, что плохо.

Вы мало думаете о том, что на самом деле происходит в Природе. Вы не в курсе чужих работ — литературы по наблюдениям и первичной обработке. Поэтому и не появляются работы по выяснению того, что на самом деле. Примеры: нуклеосинтез. Знаете только про He^4 , что его первично меньше 40–50%. А тем временем Пиблс и др. выяснили, что D и Li^7 тоже первичные, получили отсюда интересные оценки. Дальше: статистика скоплений галактик, рентгеновский космический фон, флуктуации температуры реликта, излучение и другие свойства ядер галактик.

Читаете ли вы оригинальные статьи? У вас недостаток сведений перекрывается дешевым скепсисом: «такую-то величину нельзя точно измерить, вот 20 лет назад ее измеряли и ошиблись». И получается, что сведения 20-летней давности мешают вам чувствовать новое. Мысли обращены на доказательство невозможности, а не на поиски путей вперед...

Почему не доказаны оценки на вклад гравитационных волн [гравитационных волн] по флуктуациям реликта и по пекулярным движениям (Докур, Рис)? Поставлен уже около 10 лет назад вопрос о белых дырах (очень приятно, что обогнали Немана) — но есть ли они, как они выглядят — до сих пор не выяснили. Держим как фигу в кармане — может быть, подарим сторонникам сверхплотных тел?

Тепловой режим «блинов» было бы естественно сделать в вашей группе. Однако в споре о рентгеновском излучении от них помощи от группы не последовало. По сравнению с перечисленными вопросами результаты (не отрицаю — положительные) по проверке теории «блинов», по миксмастеру, по синхротронному гравизлучению — недостаточны. Математической сверхглубины, новых методов тоже нет. И наконец, стиль работы — вялый, не боевитый. Посылка в печать короткой заметки — о происхождении вращения галактик — растягивается на год, а многое и вообще не оформлено.

Если не будет перелома — будет вам плохо! Не потому плохо, что буду вас осуждать и порицать, применять адммеры [административные меры]. Нет, этого я делать не буду. Плохо будет потому, что жизнь, открытия, связь с наблюдениями — все это пройдет мимо. Будут идти годы. Вы будете дискутировать с людьми того же профиля, оторванными от реальной астрофизики, — такие люди найдутся и у нас, и в других группах, и за границей. Вы даже будете побеждать их в спорах, и вам будет казаться, что вы в гуще событий. Но настоящая жизнь будет идти мимо. Из юношей, подающих надежды, вы... превратитесь в ученых мужей (может быть,

и со степенями), от которых уже не ждут ярких результатов.

В школе, в вузе можно быть отличником, не имея характера, самостоятельности. Здесь, в ИПМ или в аспирантуре, без самостоятельности, без продумывания тематики, на чужом горбу только с послушанием в рай не въедешь. Надо читать литературу, думать о прочитанном, выбирать важное. Планировать возможные опыты, не опускать руки, не исчерпав всего остроумия, всей фантазии.

Иначе окажетесь на краю даже не пропасти, а илистого болота, которое засосет, если не начнете шевелиться во всю силу. И еще одно — ощутите себя группой, объедините силы и мозги.

С приветом, Я.Б.Зельдович

Вот такие послания изредка получали мы от продолжающего и в отпуске мыслить о науке нашего неутомимого шефа. И они, безусловно, нас взбадривали.

Я.Б. был щедр на разбрасывание идей среди своих учеников, не гоняясь за авторством. Он говорил, что не ставит свою подпись под работой, если его вклад меньше 2/3. Однако по отношению к успехам других групп он был ревнив и настраивал сотрудников на победы в «соревновании». Он в шутку говорил, что для руководителя научного коллектива мало, чтобы была успешная работа внутри. Надо еще чтобы в соседнем таком же коллективе дела шли не так успешно.

О блестящих научных результатах Якова Борисовича и его учеников говорит авторитет, который имела его группа среди астрофизиков всего мира. И это был заслуженный авторитет. Но меня в Я.Б. даже больше восхищало его отношение к научным промахам. Дело в том, что Яков Борисович всегда подчеркивал и анализировал свои промахи в научных прогнозах. Это не были ошибки. Просто при недостатке наблюдательных данных на «развилках» гипотез Я.Б. не всегда выбирал дорогу, которая вела к успеху. На своих промахах он учил сотрудников, оберегая их от повторений ошибочных выводов. Примеров этому можно привести несколько. Не получилась теория излучения квазаров на основе модели устойчивости «сверхзвезды». Поняв ошибочность этого пути, Яков Борисович даже написал стишок, который начинался так:

Модель квазара не прошла,
Ну что ж! Тем хуже для квазара...
Душа моя еще полна
Виденьем огненного шара.

Не прошла его гипотеза о том, что импульсное излучение от радиопульсаров обусловлено колебаниями белых карликов. Вывод этот Я.Б. сделал, основываясь на том, что периоды у первых пульсаров попадали в область допустимых частот для колебаний белых карликов.

До обнаружения реликтового радиоизлучения Яков Борисович придерживался модели «холод-

ного начала», исходя из ошибочных данных относительно доли He в некоторых типах звезд, и обоснованно критиковал Георгия Гамова за его гипотезу «о горячем начале», при котором, по его мнению, можно было получить наблюдаемый химический состав Вселенной до образования звезд. Если бы не эта настроенность Я.Б. на «холодное начало», то, возможно, работа И.Д.Новикова и А.Г.Дорошкевича, вышедшая в «Докладах Академии наук» в 1964 г. и посвященная расчету интенсивности излучения пыли в модели «горячего начала», имела бы большее значение для обнаружения в 1965 г. реликтового радиоизлучения (хотя об этой статье и упоминалось в нобелевской речи, прочитанной после вручения в 1978 г. американцам А.Пензиасу и Р.Вильсону за открытие реликтового излучения).

Корил Я.Б. себя и за то, что «прозевал» процесс испарения черных дыр Хокинга и отказался подавать в «Доклады Академии наук» работу Э.Б.Глинера, который вводил странное уравнение состояния. Позже А.Х.Гус (Гут) использовал его в гипотезе об инфляции в ранней Вселенной, что потом Я.Б. принял с восторгом.

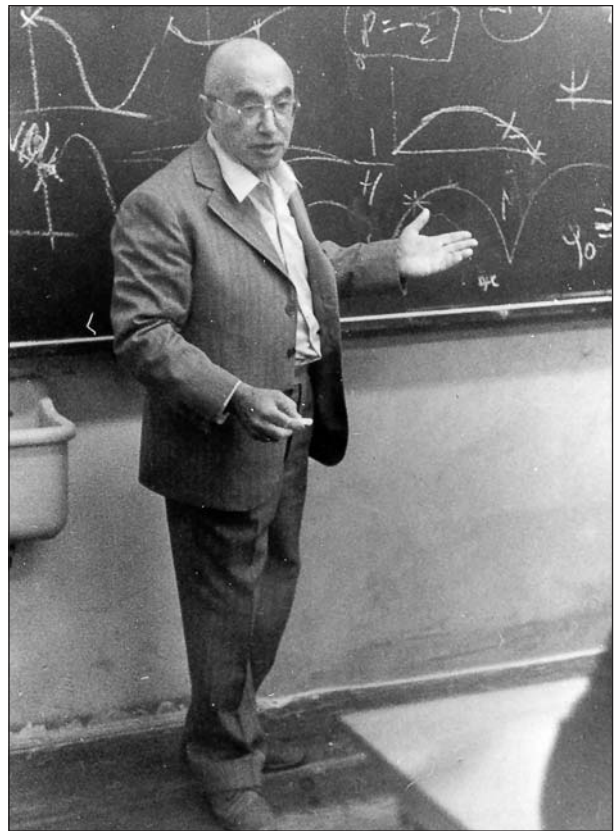
На наших глазах Яков Борисович укорял Виктория Шварцмана за его, по мнению Я.Б., недостоверный вывод о характерном масштабе крупномасштабной структуры в 250 Мпк (при $H_0 = 50$), который был получен по всего 50 самым ярким галактикам в центрах богатых скоплений.

Надо сказать, что «ранний» астрофизик Зельдович стоял на позиции «бритвы Оккама»: в природе реализуются не все варианты, а потому не надо вводить лишние сущности. Однако, учась на своих промахах, «поздний» Я.Б. уже допускал возможность разных предположений, если только они не противоречат законам физики.

По «гамбургскому счету» отдел Зельдовича в 70–80-х годах XX в. занимал передовые позиции на мировом уровне, что отразилось в монографиях, написанных совместно с Новиковым. Это «Релятивистская астрофизика» (1967), «Теория тяготения и эволюция звезд» (1971), «Строение и эволюция Вселенной» (1975).

В отделе Якова Борисовича впервые была понята роль аккреции в образовании компактных объектов как звездные массы (работы Н.И.Шакуры, Р.А.Сюняева, В.Ф.Шварцмана), так и сверхмассивных тел в центрах галактик. В частности, в работе с Новиковым, опубликованной в «Докладах Академии наук» в 1964 г., они впервые дали оценку массы квазара, исходя из представления об эддингтоновской светимости при сферической аккреции. Вместе с О.Х.Гусейновым было показано, что при коллапсе массивной звезды следует ожидать мощного нейтринного излучения.

Андрей Дмитриевич Сахаров первым в 1965 г. отметил возможность появления звуковых стоячих волн в межгалактической среде при смене уравнения состояния. Но после обнаружения



Яков Борисович читает лекцию в ГАИШе. Начало 1980-х.

в 1965 г. реликтового излучения Я.Б. осознал, что выводы Сахарова можно применить и для случая «горячего начала», поскольку при расширении Вселенной происходит ее остывание. Так в научный обиход было введено понятие «сахаровских осцилляций», о которых в 1970 г. писал Зельдович (совместно с Р.А.Сюняевым) в журнале «Astrophysics and Space Sciences».

Несколько раньше (в 1969 г.) Яков Борисович вместе с Сюняевым рассматривали эффект рассеяния реликтовых квантов на горячем газе в центральных областях богатых скоплений, что позволяет обнаруживать рентгеновские скопления галактик в радиодиапазоне. И хотя этот же эффект — «помеха» при обнаружении мелкомасштабных первичных флуктуаций микроволнового фона, с его помощью удастся находить далекие богатые скопления галактик, которые в оптических обзорах были пропущены. Внес Я.Б. неоценимый вклад и в проблему формирования крупномасштабной структуры Вселенной, показав в 1970 г., что неустойчивость гравитирующего бездиссипативного газа приводит к появлению уплощенных структур — знаменитых «блинов» Зельдовича.

Внес свой вклад Яков Борисович и в анализ природы квантового рождения нашей Вселенной, предположив вместе с Е.Р.Гаррисоном, что спектр

первичных квантовых флуктуаций плоский. Эти идеи вместе с ним развивали его ученики и сотрудники Л.П.Гришук и А.А.Старобинский.

Вернусь к рассказу об отделе Я.Б. в ИПМ. Он разрастался за счет прихода талантливых аспирантов (Г.С.Бисноватого-Когана, В.М.Чечеткина, Р.А.Сюняева, В.Ф.Шварцмана, Н.И.Шакуры, четы Рузмайкиных, А.Ф.Илларионова, В.Н.Лукаша, С.Ф.Шандарина, А.Г.Полнарева, М.М.Баско, А.Н.Шварца, В.М.Дашевского и др.). После защиты часть оставалась в отделе, а других Яков Борисович пристраивал в другие астрономические организации. Возражали в отделе и центробежные тенденции. Особенно это сказывалось на взаимоотношениях между Сюняевым и Новиковым. Карьерные устремления Сюняева стали приводить к конфликтным ситуациям, особенно когда он стремился оградить «свой огород» от работы в нем других сотрудников. Раньше внутри отдела этого не наблюдалось. После защиты в 1967 г. кандидатской диссертации Сюняев стал форсировать написание докторской. Но Новиков к тому времени еще не был доктором, и поэтому Я.Б. стал его торопить с защитой. Она состоялась в декабре 1970 г., и оппонентами по предложению Якова Борисовича были В.Л.Гинзбург, С.Б.Пикельнер и А.Д.Сахаров. После успешной защиты докторской диссертации Новиковым дорога для Сюняева была открыта, но тут против такой спешки стал возражать Шкловский. Назревал конфликт, и я спросил у Я.Б., зачем он во всем потворствует требованиям Сюняева. На это Яков Борисович то ли в шутку, то ли всерьез ответил, что «Сюняеву проще

дать, чем не давать». После защиты докторской в 1973 г. Сюняев, естественно, начал думать о выдвижении в члены-корреспонденты АН СССР. Прежние попытки Я.Б. провести в Академию наук одновременно и Новикова, и Сюняева успехом не увенчались. Надо было выбирать, кого «проталкивать» первым.

Примерно за год до этого в Москву вернулись из Новосибирска Р.З.Сагдеев и А.А.Галеев, которых Я.Б. пригласил к нам в отдел читать лекции по плазме. Вскоре Сагдеев был назначен вместо академика И.Г.Петрова директором ИКИ АН СССР и стал уговаривать Я.Б. перейти из ИПМ к нему. Сначала Я.Б. согласился на переход в Институт космических исследований всем отделом, однако потом передумал и принял решение «почковаться», т.е. отправить туда молодых сотрудников, и предложил этот вариант сначала Новикову. Но с этим не согласился Сюняев, так как он хотел в ИКИ получить сектор. Тогда возник вариант, чтобы Новикова оставить в Институте прикладной математики, так как близкие к нему сотрудники не хотели переходить в ИКИ. Но против сектора в ИПМ стал возражать заместитель директора ИПМ А.Н.Тихонов, и было принято решение об организации в ИКИ двух секторов — Новикова и Сюняева. В результате мы в 1974 г. оказались в Институте космических исследований, а Я.Б. с несколькими сотрудниками (Дорошкевич, Чечеткин) остался в ИПМ, оставив за собой руководство и частью отдела, перешедшего в ИКИ. В 1979 г. началась очередная компания по выдвижению в Академию наук, и Я.Б. на ученом Совете ИКИ на этот раз сделал выбор в пользу Сюняева. Сотрудники всего отдела, включая и сектор Сюняева, стали против такого решения возражать и высказали свои соображения Якову Борисовичу. Сначала Я.Б. воспринял наши доводы с пониманием, но после возвращения из командировки Сюняева изменил свое мнение — стал говорить о «бунте на корабле» и отказался от руководства нашим сектором. Попытки Н.С.Кардашева, Тамары Бреус, Алика Фридмана, Виктории Шварцмана и др. сгладить конфликт к успеху не привели.

Дирекция ИКИ стала искать разные варианты разрешения конфликта — встал вопрос о переходе в другой отдел. По предложению Сагдеева и Кардашева, одобренному заведующим 3-м отделом Шкловским, было принято решение перевести нас в его отдел, что и было осуществлено в 1979 г. Шкловский говорил: «Я.Б. сделал мне прекрасный подарок». Вот тогда я и подал в отставку с поста секретаря ОАС, что вызвало, как мне показалось, раздражение у Я.Б. Но я объяснил, что в такой ситуации мне трудно выполнять свои обязанности (тем более что и взаимоотношения Якова Борисовича с Иосифом Самойловичем оставляли желать лучшего).

С годами, прошедшими с тех пор, горечь от охлаждения к нам Якова Борисовича поутихла,



Я.Б.Зельдович в спортлагере Института прикладной математики. 1973 г.

а воспоминания о дружной работе в ИПМ становятся все ярче. Не забывается, как Я.Б. приглашал нас для разговоров к себе домой на Воробьевы горы, а гостеприимная Варвара Павловна старалась нас подкармливать. Как Яков Борисович считал своим долгом провожать в последний путь наших родных. Как нас пригласили на 60-летие Я.Б., где старые соратники Якова Борисовича разыгрывали «живые шарады», а на дверях одной из комнат была табличка «внукохранилище».

Неожиданный и скоропостижный уход Якова Борисовича у меня как-то прочно связался с гибелью в Специальной астрофизической обсерватории (САО) АН СССР одного из его любимых учеников Виктория Шварцмана. Я.Б. высоко ценил своего талантливого ученика и после защиты кандидатской посоветовал Викторию поехать работать в САО (она располагается в станице Зеленчукской в Карачаево-Черкессии) к Ю.Н.Парийскому. (Викторий не стал просить Я.Б. помочь с пропиской в Москве, как это делали многие другие ученики Якова Борисовича.) Шварцман в САО развил бурную деятельность по созданию оптического прибора с предельно высоким временным разрешением (до 10 нс) — «МАНИЯ». У него появилась идея доказать существование черных дыр по очень быстрому колебанию блеска вблизи гравитационного радиуса. Прибор был создан за пять лет, но, кроме верхних пределов, ничего обнаружить не удалось, и от идеи пришлось отказаться, перейдя к наблюдениям оптических импульсов от пульсаров Крабе и вспышек от звезд. Его попытка обнаружить «дүхи», т.е. «обратное» изображение объекта в замкнутой Вселенной, также не удалась. Зато он получил по наблюдениям ярчайших галактик в центрах скоплений характерный масштаб крупномасштабной структуры. Правда, анализ был проведен всего по 50 галактикам, и результат встретил резкую критику Я.Б. В довершение всего Викторий в конфликте между Сюняевым и Новиковым однозначно принял сторону нас и Новикова, о чем открыто говорил Якову Борисовичу. Отношения между учителем и учеником стали натянутыми, а после их поездки на конференцию в Венгрию вообще испортились. Викторий мне показывал письмо от Сюняева, в котором последний в дипломатических выражениях ставил условием защиты Шварцманом докторской его отказ от поддержки Новикова перед Я.Б. Все эти события наложились на болезненное психическое состояние Виктория, которому друзья и врачи советовали согласиться на лечение, чего он боялся. Закончилось все трагедией. Яков Борисович тяжело переживал гибель Шварцмана. (Еще года за три до этих событий Я.Б. говорил мне, чтобы мы как-то посодействовали Викторию с переездом из САО в Москву.) Узнав, что я вернулся из САО и привез копии писем Виктория к коллегам, к матери и жене, Яков Борисович попросил у меня их прочитать. И у меня до сих пор стоит перед



Я.Б.Зельдович и А.Д.Сахаров на Международной конференции по квантовой гравитации. Москва, 1987 г.

глазами сгорбленная фигура Я.Б., сидящего за столом в конференц-зале ГАИША, читающего, обхватив голову руками, эти прощальные письма своего ученика.

В заключение остается только добавить: мне неслыханно повезло, что я почти случайно попал в отдел Якова Борисовича и больше 10 лет имел возможность наблюдать вблизи этого незаурядного, яркого ученого и человека. Были взлеты и падения в наших взаимоотношениях, которые в силу разных весовых категорий определялись не мной, но я всегда старался в меру своих сил быть благодарным и объективным в своем отношении к Якову Борисовичу, понимая, что и он не всегда свободен в своих поступках. Это особенно проявлялось в его взаимоотношениях с Андреем Дмитриевичем Сахаровым, которого Яков Борисович безмерно уважал и по-своему защищал, никогда не подписывая коллективных писем против него. И хотя Я.Б. не всегда откликнулся на просьбы Андрея Дмитриевича и не одобрял ряда его поступков, однако эти их идейные разногласия не мешали уважительному отношению друг к другу. И я запомнил, что на похоронах Якова Борисовича в Президиуме Академии наук Андрей Дмитриевич сказал: «За 40 лет между нами были разные периоды — но это все пена в потоке жизни...». Пена, как известно, опадает. А поток жизни остается, и наша задача всегда хранить память о наших наставниках и передавать свой и их опыт молодым, чтобы этот поток не иссякал. ■

Гамма-мониторинг космоса

Г.С.Бисноватый-Коган,

доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН

Отмечая в этом году 100 лет со дня рождения великого советского физика Якова Борисовича Зельдовича, мы вспоминаем его как одного из главных создателей советского ядерного оружия и человека, внесшего фундаментальный вклад во многие области современной физики и астрофизики. Мне посчастливилось быть одним из первых аспирантов Я.Б. по астрофизике и на протяжении 15 лет тесно взаимодействовать с ним. Огромную роль для меня сыграли еженедельные, а иногда и более частые семинары нашей небольшой астрофизической группы в Институте прикладной математики РАН, которые обычно сводились к подробной лекции Я.Б. по самым различным вопросам астрофизики и космологии. Без всякого преувеличения могу сказать, что о всех проблемах космологии, формирования крупномасштабной структуры Вселенной, физики нейтрино и многое другое я впервые узнал на этих семинарах, а постоянное обсуждение и необходимость активного участия в них обеспечивало знаниями, вполне достаточными для начала самостоятельной работы в этих областях. В наших работах с Я.Б. исследовались свойства релятивистской плазмы, и был обнаружен верхний предел температуры оптически прозрачной релятивистской плазмы с рождением электронно-позитронных пар. В других работах, совместно с В.М.Чечеткиным и З.Ф.Сеидовым и др., было рассмотрено образование неравновесного слоя в оболочках нейтронных звезд, их роль в нуклеосинтезе и в нестационарных процессах на нейтронных звездах, а также взаимодействие нейтрино с ядрами в различных ядерных моделях, что оказалось важным для анализа экспериментов по детектированию нейтрино от сверхновых. Мы все время чувствовали постоянную поддержку Я.Б., как научными советами и обсуждениями, так и в плане помощи для участия в конференциях, получения устных выступлений и др. Я.Б. часто существенно помогал при написании статьи, отказываясь затем становиться соавтором. Вспоминаю самый яркий пример, когда он собственноручно написал введение к нашей с Чечеткиным статье в *Astrophys. Space Science* (1974), но категорически запретил включать себя в соавторы.

Я.Б. учил нас не замыкаться в узком кругу какой-либо частной задачи, а думать о проблеме в целом

и постоянно расширять круг своих интересов. Главное, как он говорил, это понять, что же происходит на самом деле. Проблемой детектирования гамма-излучения высоких энергий я начал заниматься в последний год жизни Зельдовича, когда в Институте космических исследований шла работа над созданием спутника «Гамма-1», предназначенного для детектирования гамма-квантов с энергией от 50 МэВ до 5 ГэВ.

Новая концепция гамма-мониторинга

В классической области гамма-астрономии высоких энергий (от нескольких десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт) атмосфера непрозрачна, поэтому наблюдения возможны только из космоса. Благодаря специализированным спутникам — *Cos B* (работавшему в 1975—1982 гг.), Комптонской гамма-обсерватории (прибору EGRET — *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope* — Телескоп для эксперимента в области жесткого гамма-излучения, 1991—2000 гг.), *AGILE* (*Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero* — Легкий космический телескоп для построения изображений в гамма-диапазоне, с 2007 г.), Космической обсерватории им.Э.Ферми (с 2008 г.) — были открыты диффузный фон, точечные и протяженные источники высокоэнергетического гамма-излучения. Большинство точечных источников (если не все они) связаны с компактными объектами, нейтронными звездами и черными дырами звездной массы внутри Галактики, а также с активными ядрами галактик, в которых расположены сверхмассивные черные дыры. Протяженные источники представлены плотными молекулярными облаками, в которых рождаются гамма-кванты при взаимодействии их вещества с космическими лучами. Те же источники в далеких галактиках создают, по-видимому, и изотропный диффузный фон в этой области энергий.

Гамма-астрономия высоких энергий берет на учет каждый отдельный квант, для которого в индивидуальном порядке находятся энергия и направление, откуда он приходит. Поток частиц, регистрируемых гамма-телескопом, довольно мал, так что время между приходами квантов превышает время задержки прибора, в течение которого регистрация невозможна. В этих условиях

разумнее всего иметь прибор с максимально возможной апертурой, чтобы обнаруживать все падающие на него кванты. Для каждого кванта необходимо определить направление прилета и тем или иным образом измерить энергию.

Первые два упомянутых выше космических гамма-телескопа, к которым можно добавить российский спутник с телескопом «Гамма-1», регистрировали направление прихода кванта, прослеживая его движение с помощью искровых камер, в двух последних вместо искровых камер использовались позиционно-чувствительные кремниевые пластины. В обоих вариантах контролировались траектории электронно-позитронной пары, рожденной энергичным гамма-квантом, от места его конверсии до попадания в калориметр.

Запуск аппарата «Гамма-1» получился неудачным — отказали искровые камеры, которые должны были фиксировать траектории полета электрона и позитрона. В результате оказалось практически невозможным определить направление прилета кванта. Для измерения энергии устанавливался массивный калориметр, позволявший измерять энергию кванта с точностью до 5–10%, но по чисто геометрическим причинам препятствующий увеличению апертуры телескопа (рис.1).

Следует, однако, иметь в виду, что для многих научных задач важнее сам факт регистрации гамма-кванта, энергию которого можно знать и менее точно (с погрешностью до ~20%). Это относится практически ко всем точечным гамма-источникам, когда наблюдаются большие колебания потока, поэтому построение непрерывной по времени кривой блеска было бы гораздо более информативным, чем более строгие, но эпизодические измерения спектра. Более того, при большой апертуре подобный телескоп мог бы следить одновременно за многими источни-

ками на небе, что увеличивало бы его эффективную чувствительность. Непрерывные наблюдения больших участков неба особенно критичны для коротких событий типа космических гамма-всплесков, направление на которые заранее неизвестно.

В 1993 г. была предложена новая конструкция телескопа для регистрации космического гамма-излучения высоких энергий [1, 2], получившая название ЦИГАМ (CYGAM — Cylindrical Gamma Monitor, Цилиндрический гамма-монитор, рис.2). В ней отсутствовал калориметр, что сразу позволяет почти на порядок увеличить апертуру телескопа. Поле зрения прибора составило бы шесть стерadians, т.е. одновременно была бы видна примерно половина небесной сферы. Стенки цилиндра, представляющего в сечении восьмиугольник, должны состоять из конвертора, в котором жесткий гамма-квант переходит в пару электрон—позитрон, и позиционно-чувствительного слоя, регистрирующего пролет заряженных частиц. После конверсии родившиеся частицы летят под углом друг к другу, который уменьшается с ростом энергии исходного гамма-кванта — по величине угла разлета она и определяется. Такой метод имеет ограничение по энергии, доступной для измерений: при энергии кванта, превышающей примерно 40 ГэВ, угол станет слишком малым и позиционно-чувствительный счетчик на противоположной стороне цилиндра не сможет разрешить координаты частиц пары. Предел можно поднять, если повысить точность определения координат прилетающих частиц или увеличить угол между траекториями частиц во время полета между стенками цилиндра (например, за счет создания внутри магнитного поля). Схема регистрации жесткого гамма-кванта на приборе ЦИГАМ представлена на рис.3.

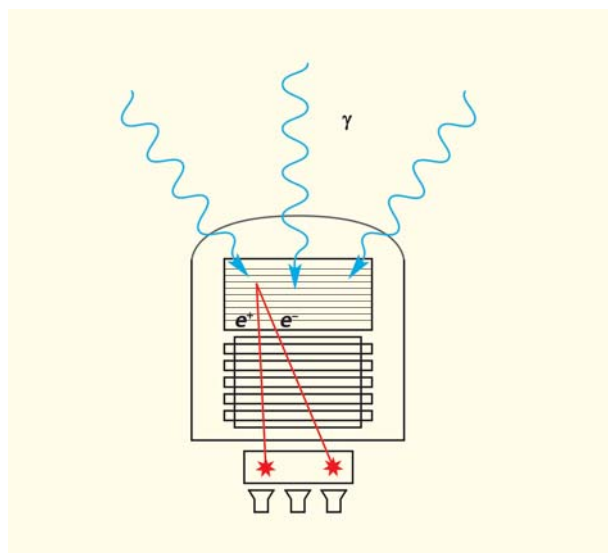


Рис.1. Традиционная схема гамма-телескопа (EGRET) [3].

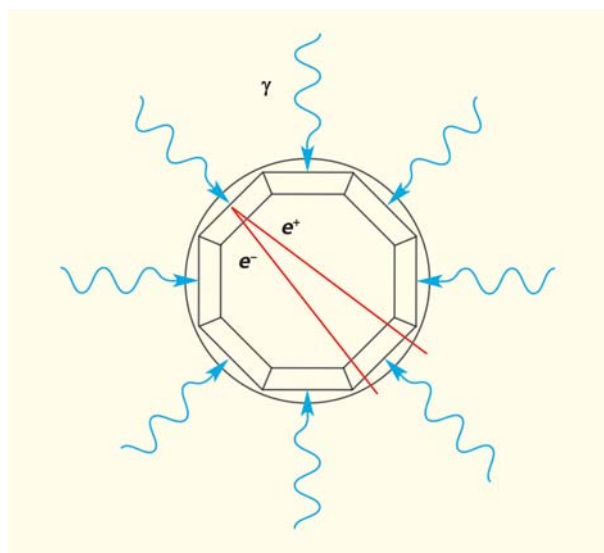


Рис.2. Схема телескопа ЦИГАМ [3].

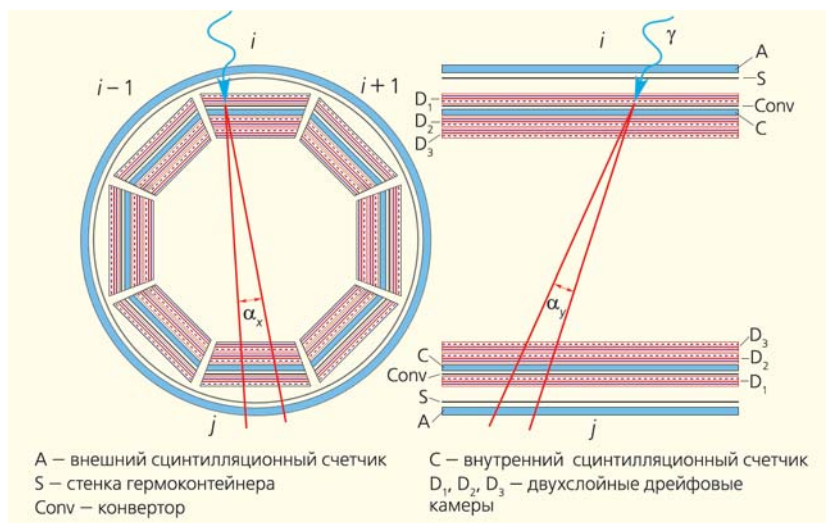


Рис.3. Детальная схема регистрации жесткого гамма-кванта на телескопе ЦИГАМ [3]. Внешняя оболочка служит конвертором, проходя через который гамма-квант рождает электронно-позитронную пару. Примеры пересечения позиционно-чувствительных детекторов при влете и вылете из цилиндра показаны для прямого (вид в торец цилиндра) и косо падения кванта (вид сбоку цилиндра).

Предложенная конструкция прибора должна быть легче за счет отсутствия калориметра и меньшей толщины стенок прибора по сравнению с толщиной слоя искровых камер или кремниевых пластин (стрипов). Наилучшее угловое разрешение, определяемое на основании расчетов Монте-Карло, составляет 25' (угловых минут) при энергии кванта в 1 ГэВ. Сравнить результаты моделирования для ЦИГАМа методом Монте-Карло с характеристиками прибора ЭГРЕТ позволяет приведенная таблица.

Более совершенный прибор LAT (Large Area Telescope — Телескоп большой площади) обсерватории им.Э.Ферми примерно в 20 раз более чувствителен за счет увеличения площади (8000 см²), телесного угла (2 стер), и спектрального диапазона (0.03—300 ГэВ), но его телесный угол зрения в три раза меньше, чем у ЦИГАМа. Это дает последнему преимущество в проведении обзоров, в возможно-

сти непрерывного наблюдения большого числа источников, а также при обнаружении жесткого гамма-излучения вспыхивающих источников, включая космические гамма-всплески. Немаловажен фактор экономичности — вес предлагаемого телескопа в три раза меньше, чем у прибора LAT. Но самое главное преимущество ЦИГАМа — возможность построения почти всех его деталей в России, что может простимулировать развитие не только астрофизики высоких энергий, но и высоких технологий во всей промышленности. Прогресс собственной промышленности для создания спутников и приборов внеатмосферной астрономии — главный приоритет всех без исключения развитых стран, превалирующий над общечеловеческими ценностями по накоплению знаний о Вселенной. Характерным примером последних лет служит отказ Великобритании от участия в проекте INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory — Международная астрофизическая лаборатории в области гамма-излучений), что создало существенную брешь в бюджете этого проекта, заланную Россией, данная область науки которой приходила в упадок. Но никакие проценты наблюдательного времени не могут компенсировать упущенные возможности по модернизации экспериментальной базы внутри страны из-за траты денег на поддержку космической науки в Европе. Другой пример — создание итальянского спутника AGILE, который будучи существенно слабее международной лаборатории им.Э.Ферми, сделал гораздо больше для прогресса науки непосредственно в Италии.

Вариант проекта ЦИГАМ, представленный в 1993 г. и детализированный в публикации 2003 г.

[3], в качестве позиционно-чувствительных детекторов предлагал использовать дрейфовые камеры, технология производства которых отработана в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне (он был готов участвовать в данном проекте). К сожалению, проект так и остался на бумаге в зачаточном состоянии, хотя преимущества его казались очевидными. В настоящее время технология производства кремниевых стрипов получила большое развитие (увы, не в нашей стране), так

Таблица

Основные характеристики телескопов EGRET и ЦИГАМ

Параметр	EGRET	ЦИГАМ
Энергетический диапазон, ГэВ	0.03–20	1–40
Максимальная эффективная площадь, см ²	1500 (0.5–1 ГэВ)	2000 (3–10 ГэВ)
Поле зрения, стер	0.6	6
Максимальный геометрический фактор, см ² стер	1050	8500
Угловое разрешение	2.6° (100 МэВ) 1.0° (1000 МэВ)	0.4° (1000 МэВ)
Энергетическое разрешение, %	20	—
Размеры, м	∅ 1.65×2.25	∅ 2×2
Вес, кг	1830	~1000

что окончательный выбор устройств может быть сделан после принципиальных решений по реализации проекта.

Небо в высокоэнергичных гамма-лучах

Наблюдение с помощью телескопа ЦИГАМ позволило бы существенно продвинуться в исследовании как диффузного излучения Галактики (рис.4), так и компактных источников. Среди последних самые загадочные — космические гамма-всплески, природа которых до сих пор не ясна до конца. Основная доля излучения гамма-всплесков приходится на диапазон от 100 кэВ до 1 МэВ, но в ря-

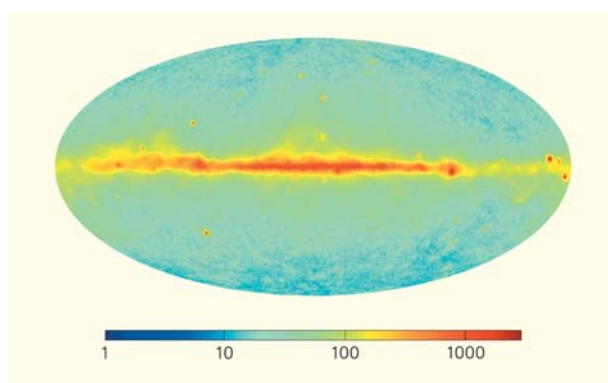


Рис.4. Карта диффузного излучения Галактики в области энергий от 200 МэВ до 100 ГэВ по наблюдениям телескопа LAT [4]. Карта дана в галактических координатах с галактическим центром посередине.

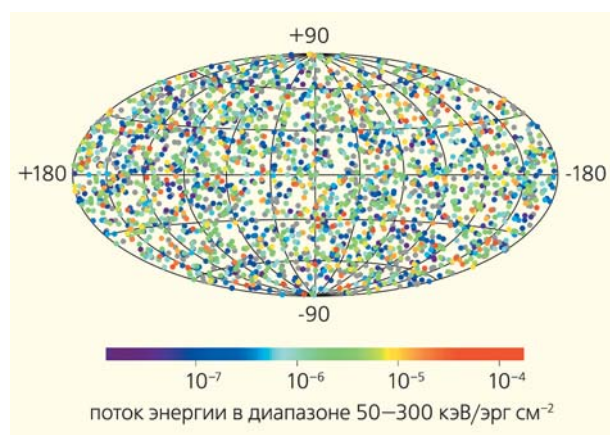


Рис.5. Распределение космических гамма-всплесков на карте звездного неба по данным эксперимента BATSE. Отсутствует какая-либо ярко выраженная концентрация источников к галактической плоскости или к центру Галактики. Нет и концентрации источников в направлении известных ассоциаций астрофизических объектов. Распределение гамма-всплесков изотропно.

<http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/skymap>;
<http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr09.htm>

де случаев наблюдается излучение в области гигаэлектронвольт, причем, как правило, более продолжительное. Распределение по небу (изотропное) всплесков по данным прибора BATSE (Burst and Transient Source Experiment — Эксперимент по вспыхивающим и нестационарным источникам) на Комптоновской гамма-обсерватории приведено на рис.5. 35 космических гамма-всплесков, зарегистрированных прибором LAT, приведены в каталоге 2013 г. [5]. На рис.6 дан пример самого продолжительного излучения гамма-всплеска в жесткой области, зарегистрированного прибором EGRET.

Следующий тип объектов, излучающих в жесткой гамма-области, — радиопульсары. Более 100 радиопульсаров наблюдалось прибором LAT [6], причем около половины из них были открыты впервые в жесткой гамма-области, в которой излучается основная доля энергии электромагнитного спектра радиопульсаров. Схематическая картина формирования гамма-импульса и кривая блеска одного из самых ярких в данной области спектра пульсара Геминга по данным EGRET представлены на рис.7 и 8.

Активные ядра галактик стали самой многочисленной группой отождествленных источников, обладающих к тому же наибольшей светимостью. Их жесткое излучение, видимо, идет от релятивистских выбросов системы «центральная сверхмассивная черная дыра + окружающий ее аккреционный диск». Механизм образования жесткого гамма-излучения таких объектов не вполне ясен, как и не решена до конца проблема ускорения частиц в этих выбросах.

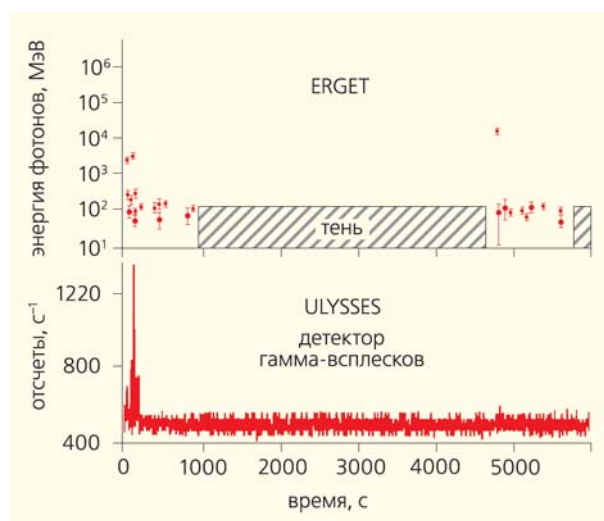


Рис.6. Гамма-всплеск 17 февраля 1994 г., зарегистрированный гамма-телескопом высоких энергий EGRET (сверху) и гамма детектором низких энергий на спутнике ULYSSES (снизу). Высокоэнергичное гамма-излучение продолжается до 1.5 часов после начального всплеска в области малых энергий.

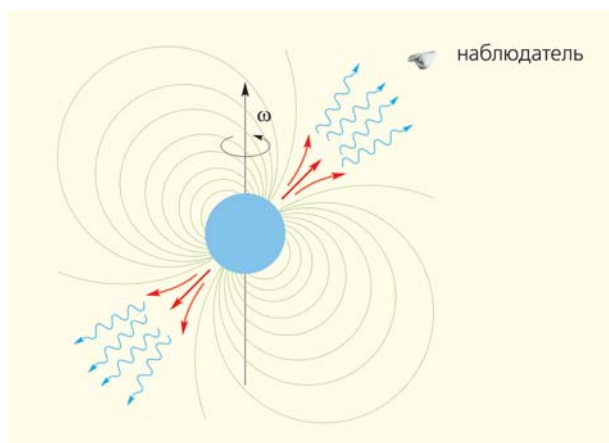


Рис.7. Модель пульсара как вращающейся нейтронной звезды с наклонным дипольным магнитным полем [3].

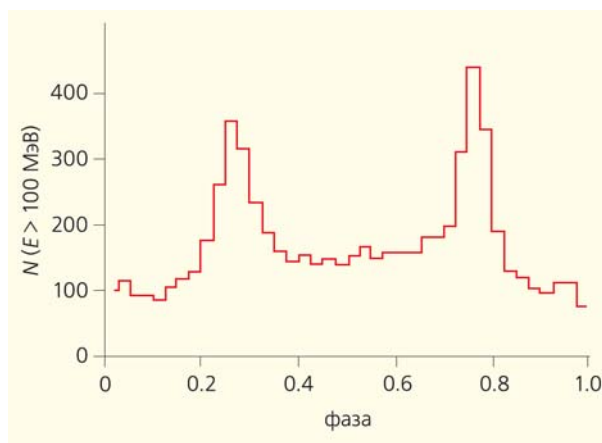


Рис.8. Фазовая кривая блеска гамма-пульсара Геминга по данным EGRET [3].

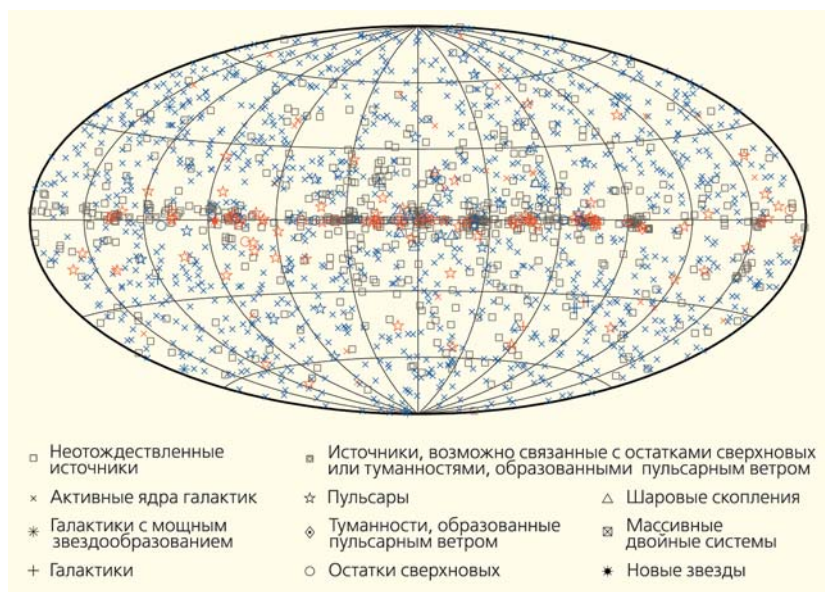


Рис.9. Распределение на небе всех точечных источников, открытых прибором LAT к 2012 г. [7].

Несомненный интерес представляют также наблюдения молодых остатков сверхновых, нестационарных новых и вспыхивающих звезд. Жесткое гамма-излучение наблюдается в солнечных вспышках, что свидетельствует о возможности его генерации во многих звездах нашей Галактики. Использование телескопа с большой апертурой особенно важно для обнаружения жесткого гамма-излучения от космических гамма-всплесков. Можно ожидать как открытия новых источников, так и отождествления в оптическом или радио-диапазонах гамма-источников неизвестной природы. Распределение на небе всех точечных источников, открытых прибором LAT к 2012 г., представлено на рис.9 из каталога [7]. ■

Литература

1. *Bisnovaty-Kogan G.S., Leikov N.G.* Concept of an all-directional high-energy cosmic gamma ray telescope // *Astrophysics and Space Science*. 1993. V.204. №2. P.181—189.
2. *Leikov N.G., Bisnovaty-Kogan G.S.* Cylindrical gamma-ray monitor (CYGAM) concept // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 1994. V.92. №2. P.679—681.
3. *Акимов В.В., Бисноватый-Коган Г.С., Лейков Н.С.* Цилиндрический гамма-монитор CYGAM. Новая концепция гамма-телескопа высоких энергий. Информационный буклет. М., 2003.
4. *Ackermann M., Ajello M., Atwood W.B. et al.* Fermi LAT observations of the diffuse gamma-ray emission: implications for cosmic rays and the interstellar medium // *ApJ*. 2012. V.750. №1. P.3—35.
5. *Ackermann M., Ajello M., Asano K. et al.* The First Fermi-LAT Gamma-Ray Burst Catalog // *ApJ Suppl.* 2013. V.209. №1. P.11—101.
6. *Abdo A.A., Ajello M., Allafort A. et al.* The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-Ray Pulsars // *ApJ Suppl.* 2013. V.208. №2. P.17—76.
7. *Nolan P.L., Abdo A.A., Ackermann M. et al.* Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog // *ApJ Suppl.* 2012. V.199. №2. P.31—77.

Лауреат премии Абеля 2014 г. — Я.Г.Синай

Как известно, личные проблемы Альфреда Нобеля в отношениях с математикой (математиком) лишили «царицу всех наук» заслуженной номинации среди прочих дисциплин Нобелевской премии. Эта несправедливость была устранена лишь в XXI в., когда правительство Норвегии в 2002 г. учредило Абелевскую премию (англ. *Abel Prize*) по математике. Свое название она получила в честь знаменитого норвежского математика Нильса Хенрика Абеля, чье двухсотлетие отмечалось в том году. Собственно, саму идею этой премии продвигал еще сто лет назад другой норвежский математик, Софус Ли, но его смерть и политические пертурбации в Норвегии помешали реализовать ее. А теперь, начиная с 2003 г., премия, размер которой оставляет 6 млн норвежских крон (750 тыс. евро, или 1.06 млн долл. США), присуждается ежегодно. Лауреата премии Абеля, быстро завоевавшей признание как аналог Нобелевской, определяет международный комитет из пяти крупнейших математиков, назначенных Международным математическим союзом и Европейским математическим обществом. Норвежская академия наук и литературы объявляет лауреата и вручает премию в Атриуме юридического факультета Университета Осло, где прежде вручалась Нобелевская премия мира. В этом году лауреатом уже во второй раз стал наш соотечественник, академик Я.Г.Синай (первый — М.Л.Громов). Поэтому, хотя математика и не входит в число наших постоянных рубрик, редакция не смогла пропустить такое событие.

Двадцать шестого марта в Осло президент Норвежской академии наук объявил имя лауреата премии Абеля за 2014 г. Им стал выдающийся ученый, представляющий Россию и США, Яков Григорьевич Синай «за фундаментальный вклад в изучение динамических систем, эргодическую теорию и математическую физику». Торжественное вручение премии состоялось 20 мая.

Ученик Колмогорова

Я.Г.Синай родился в Москве 21 сентября 1935 г. в семье микробиологов. В 1957 г. окончил механико-математический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, там же защитил кандидатскую (1960), а вскоре и докторскую (1963) диссертации. С 1971 г. сотрудничает с Институтом теоретической физики им.Л.Д.Ландау, оставаясь на своей должности и теперь, хотя с 1993 г. является профессором математики Принстонского университета (США, штат Нью-Джерси). В 1991 г. избран действительным членом РАН.

Яков Григорьевич — один из самых знаменитых учеников Андрея Николаевича Колмогорова, ученика Николая Николаевича Лузина, который был основателем московской математической школы, разросшейся подобно могучему раскидистому дереву. Колмогоров по праву считается одним



Я.Г.Синай

из самых выдающихся не только математиков, но и ученых XX в. Он вырастил свою громадную школу, в которой кроме Синай прославились многие академики и профессора (назовем лишь одного из них — Владимира Игоревича Арнольда). Создал свою совершенно замечательную школу и Яков Григорьевич, а многие его последователи — свои, став профессорами в разных университетах (один, но очень наглядный пример — филдсовский лауреат Григорий Александрович Маргулис). Синай — выдающийся педагог. Он сохраняет присущий русской математической школе принцип дарения, идущий от его учителя Колмогорова: наставник щедро дарит свои идеи ученикам. В ситуации, когда запад-

ные ученые обычно публикуют совместные статьи со своими учениками, и это справедливо (постановка задачи и идея решения часто бывает решающим вкладом), русская традиция состоит в том, чтобы эту постановку и начальный импульс ученику дарить. И Синай, без преувеличения, — очень щедрый даритель.

В последнее время Яков Григорьевич в основном воспитывает учеников в Принстонском университете. Математический факультет Принстона — один из величайших математических факультетов мира, где работает много филдсовских лауреатов. И Синай в этой математической гвар-

дии занимает почетное место. Но каждую весну и лето Синай возвращается в Россию, и тогда интенсивно работает его Московский летний семинар, имеющий уже многолетнюю историю.

Как известно, Колмогоров внес фундаментальный вклад в самые разные области математики. Особенно знамениты его труды по теории вероятностей и динамическим системам. На стыке этих двух областей с математической физикой и работает всю жизнь Яков Григорьевич.

Детерминизм и вероятность

Теория вероятностей изучает случайные события. Например, вы подбрасываете монетку и случайно выпадают орел или решка. Один из главных результатов теории вероятностей — закон больших чисел, доказанный Колмогоровым. Он состоит в том, что в среднем число выпаданий орла или решки при большом числе испытаний будет одинаковым. Но последняя фраза еще далека от строгой математической формулировки. Одно из главных достижений Колмогорова состояло в том, что этому наивному утверждению он придал точный математический смысл, а затем доказал то, что получилось.

Теория дифференциальных уравнений, или динамических систем, на первый взгляд занимается противоположными задачами. Она исследует так называемые детерминированные, вполне предсказуемые процессы. Исаак Ньютон был первым, кто понял, что дифференциальные уравнения описывают большинство процессов, происходящих в природе с течением времени — например, полет планет. С помощью созданной им теории таких уравнений Ньютон описал вращение планет вокруг Солнца и, в частности, доказал открытые ранее на опыте законы Кеплера, включая и то, что все планеты движутся вокруг Солнца по плоским орбитам, имеющим форму эллипса.

В конце XVIII в. математики начали понимать, что дифференциальные уравнения обладают так называемым свойством единственности решений. Если мы знаем в какой-то момент времени состояние процесса (например, положение планеты и ее скорость), мы можем предсказать в бесконечное время в будущем, а также реконструировать на бесконечное время в прошлом судьбу этой планеты, ее полет, траекторию.

Более того, Пьер Лаплас понял, что этот же принцип детерминизма относится не только к движению планет, но и к движению микроскопических объектов, например молекул. Свойство единственности решений дифференциальных уравнений универсально. И в своем трактате о теории вероятностей Лаплас написал: «Ум, которому были бы известны для какого-либо данного момента все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составных час-

тей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движение величайших тел Вселенной наравне с движениями легчайших атомов; не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверно, и будущее, так же как и прошедшее, предстало бы пред его взором».

Это гораздо больше, чем математический результат. Это философия, которая осмысливает развитие всей Вселенной вокруг нас, — лапласовский детерминизм. Философия, несмотря на патетику Лапласа, довольно унылая. Она состоит в том, что мы живем в мире, в котором все предсказано. Если бы некий великий ум знал начальные скорости и положения всех молекул и всех остальных тел во Вселенной, он бы спокойно предсказал будущее и восстановил прошлое.

Но такого великого ума не существует. А главное — последующее развитие науки это философию опровергло. В XIX в. казалось, что нет более противоположных ветвей математики, чем дифференциальные уравнения и теория вероятностей. Но развитие математики в XX в. показало, что это две тесно переплетенные области. И в понимание этих связей, которые изучает так называемая эргодическая теория, Синай внес решающий вклад.

Но сначала вспомним о некоторых юношеских работах Синая.

Ранние работы: энтропия

Ричард Фейнман писал, что многообразие законов природы не является удручающе необозримым. Происходит это оттого, что разные процессы описываются одними и теми же математическими формулами. То же самое можно сказать и о дифференциальных уравнениях. Их разнообразие кажется совершенно бесконечным, но только на первый взгляд — существует подход, который позволяет многие дифференциальные уравнения считать одинаковыми. Грубо говоря, такие уравнения получают друг из друга заменой координат, и потому, несмотря на внешние различия, имеют глубокое внутреннее сходство и почти тождество. Возникает вопрос: как узнать, одинаковы ли два дифференциальных уравнения? Чтобы ответить на этот вопрос, математики изучают так называемые инварианты. Это некие характеристики дифференциальных уравнений, которые не меняются, когда мы делаем замены координат. Если мы увидели два дифференциальных уравнения, непохожих на вид, и инвариант, который мы открыли, вычислен для них и принимает разные значения, значит, никакие замены координат превратят одно уравнение в другое не могут.

Кроме дифференциальных уравнений есть еще отображения. Если функция сопоставляет одним числам другие, то отображение сопоставляет одним точкам другие. Например, в школе изучают

отображения плоскости — повороты, переносы, растяжения, но можно изучать гораздо более сложные отображения плоскости, например, взять прямую комплексных чисел: $z = x + iy$ и рассматривать отображения $p(z) = z^2$ или $p(z) = z^2 + c$. Динамические системы изучают не только дифференциальные уравнения, но и итерации (последовательное применение) отображений. Написать итерационный квадрат отображения p — все равно что взять отображение p и применить его не к z , а к образу точки z под действием отображения p : $p^2(z) = p(p(z))$. Хорошее упражнение — написать, какой многочлен и какой степени при этом получится. В теории динамических систем рассматривается отображение p , примененное k раз, и исследуется, что происходит с точкой: $p^k(z)$, $k = 1, 2, \dots$, когда k стремится к бесконечности.

В теории отображений очень популярен так называемый сдвиг Бернулли, который можно понимать как математическую формализацию истории бросания монеты. Мы бросаем монету и записываем выпадания орлов и решек. Теперь представьте себе, что мы кидаем не монету, а скажем, шестигранную кость. И она выпадает на одну из шести граней. Мы записываем историю этих бросаний. Глядя на получившиеся последовательности, легко придумать отображение (так называемые отображения сдвига на одну позицию), которое я не буду описывать подробно; оно называется сдвигом Бернулли.

Долго стоял вопрос о том, разные это или одинаковые динамические системы: сдвиги Бернулли в последовательности из двух и из шести символов. Колмогоров придумал инвариант, который называется «энтропия» и который позволил доказать, что эти две динамические системы — разные. Другими словами, сдвиг Бернулли для последовательности из двух и из шести символов (у Колмогорова было три символа вместо шести) — разные, неэквивалентные динамические системы.

Юный Яков Синай, будучи аспирантом Колмогорова, принял активное участие в разработке теории нового инварианта, и этот инвариант вошел в теорию динамических систем, буквально пронизав ее насквозь, под названием «энтропия Колмогорова—Синай».

«Капля Минлоса—Синай»

В начале 1960-х годов Р.А.Минлос и Я.Г.Синай создали математическую модель конденсации паров газа с образованием больших капель жидкости (от испарений — к дождю). Модель исходит из дифференциальных уравнений, описывающих движение молекул, т.е. стартует с микроскопического уровня, но выводы должна делать макроскопические. Она должна описать появление капель, хорошо заметных наблюдателю без помощи каких-либо приборов. Одно из ключевых соображе-

ний объясняло, почему микроскопические капельки, слившись вместе, не рассыпаются снова на микроскопические капли: им мешает поверхностное натяжение. В фольклоре этот цикл работ называется «капля Минлоса—Синай».

Эргодическая теория

Следующий важный цикл работ Синай относится к эргодической теории. Здесь опять стоит сделать шаг назад и рассказать, как эта теория появилась.

С точки зрения Лапласа, движение молекул окружающего нас воздуха описывается дифференциальными уравнениями. Сидя в комнате, мы дышим воздухом, поведение которого представляет собой решение дифференциального уравнения в пространстве с очень-очень большим количеством координат. Вопрос: почему мы дышим однородным воздухом? Почему давление в правом верхнем углу комнаты и в противоположном, левом нижнем, одно и то же? Ведь молекулы в одном углу совсем не знают, что делается в другом. Почему же они ведут себя одинаково?

Австрийский физик Людвиг Больцман в конце XIX в. попытался осмыслить этот вопрос и придумал так называемую эргодическую теорию. Он предположил, что решения очень сложных дифференциальных уравнений ведут себя вероятностным образом. На геометрическом языке это предположение выглядит так. Решение дифференциального уравнения — описание движения точки в пространстве. Это пространство, называемое фазовым, может иметь очень много координат (очень большую размерность). Больцман предположил, что если мы подождем достаточно долгое время, то решение сложного дифференциального уравнения успеет побывать во всех областях фазового пространства. Так, вся совокупность молекул в комнате изображается одной точкой в фазовом пространстве колоссальной размерности. Эта точка побывает во всех частях фазового пространства и каждую из них будет навещать с частотой, пропорциональной ее размеру. Можно представить себе следующую иллюстрацию: имеется объем в пространстве (условно говоря, комната), и там очень-очень быстро движется одна точка, которая, конечно, в каждый момент времени занимает какое-то определенное положение. Но по прошествии достаточно долгого времени она успеет побывать в каждом кубическом дециметре комнаты. А если мы дадим ей еще больше времени, она успеет побывать в каждом кубическом сантиметре. Если еще дольше ждать — в каждом кубическом миллиметре. И так далее...

Эргодическая теория точно формализует, что значит это утверждение, которое выше введено на интуитивном уровне, и превращает его в теорему. Впрочем, Больцман сформулировал только концепции и гипотезы, но ни одной теоремы в эрго-

дической теории не доказал. Можно сказать, что он был своего рода провидцем.

Формализацию эргодической теории произвели в 1930-е годы Джордж Давид Биргофф и Джон фон Нейман, которые впервые сформулировали аккуратные теоремы и доказали их при определенных условиях. Оказалось, что они справедливы не для всякой динамической системы, а лишь для такой, которая сохраняет так называемый фазовый объем. Можно уподобить движение точек, описываемое дифференциальным уравнением, движению молекул в потоке газа или движению частиц воды в гидродинамической струе. Так вот, газ сжимаем, а вода — нет. Динамические системы, сохраняющие объем, похожи на течение воды, а не на течение газа. Именно для таких динамических систем Биргофф и фон Нейман доказали эргодическую теорему.

Эта теорема перебрасывает мост между теорией вероятностей и динамическими системами. Рассмотрим мысленный эксперимент из теории вероятностей: на стол, на котором стоят большие и маленькие тарелки, случайным образом бросают монеты. Теория вероятностей утверждает, что после большого числа бросаний число монет на каждой тарелке будет пропорционально ее площади. А вот что говорит теория динамических систем: точка, движущаяся под действием эргодического дифференциального уравнения, посещает каждый участок фазового пространства с такой же частотой, с какой туда попадала бы случайно брошенная «монетка».

На динамическую систему для того, чтобы она обладала свойством эргодичности, нужно налагать весьма трудно проверяемые условия. Вовсе не все динамические системы обладают эргодическим поведением, т.е. способностью побывать в любом уголке фазового пространства. Вопрос: правда ли, что системы газовой динамики таким свойством обладают?

Этой проблемой занялся молодой Яков Синай. Одновременно над теорией динамических систем работало славное поколение ученых — Аносов и Арнольд в России, Стив Смейл в США. Смейл приезжал в Россию и оказал очень сильное влияние на наших ученых (и сам писал о том, какое сильное влияние они оказали на него). В частности, одна из задач, поставленных Смейлом, состояла в том, чтобы доказать (что бы это ни означало) структурную устойчивость геодезического потока* на многообразии отрицательной кривизны. Обдумывая эту задачу, Дмитрий Викторович Аносов создал теорию так называемых гиперболических динамических систем. Геодезический поток, о котором шла речь, —

* Геодезическая линия на поверхности — кратчайшая линия между двумя точками. Знакомая всем геодезия занимается измерением расстояний на земле и может считаться «отдаленным предком» геодезических потоков.

один из важных, но далеко не единственный пример гиперболической системы.

Синай был первым, кто применил методы гиперболической теории к гипотезе Больцмана и к задачам газовой динамики. Он настолько сильно продвинул доказательство эргодической гипотезы Больцмана, что она называется теперь эргодической гипотезой Больцмана—Синай (над ней в настоящее время работают его последователи, и эта задача, решенная не до конца, исследована сейчас очень глубоко).

Меры Синай—Рюэлля—Боуэна

Не все динамические системы похожи на поток воды и сохраняют фазовый объем. Многие из них похожи на бушевание ветра, несущего облака пыли, или на движение распыленного вещества во Вселенной. Это распыленное вещество может с течением времени собираться в скопления, группироваться и образовывать фигуры гораздо меньшего размера, чем то пространство, в котором началось движение. Первоначально равномерно распыленное во Вселенной вещество может порождать весьма плотные скопления, и есть смысл говорить о массе разных частей этих скоплений.

Эта картина иллюстрирует то, что математики называют предельной инвариантной мерой для динамической системы. Одна из самых знаменитых и тоже интенсивно изучаемых мер — так называемая мера Синай—Рюэлля—Боуэна. Яков Григорьевич был одним из трех создателей этой концепции, и она тоже оказалась центральной для теории динамических систем.

Общая вера современных математиков состоит в том, что большинство динамических систем демонстрируют одновременно детерминистское и вероятностное поведение. Детерминистское поведение управляет выходом всех частиц на то множество, на то скопление материи, на котором сосредоточена мера Синай—Рюэлля—Боуэна. Это скопление называется аттрактором. Теория вероятностей, в свою очередь, управляет движением уже по этому скоплению материи — по аттрактору.

Проблема турбулентности

Когда мы слышим спокойный голос бортпроводника: «Наш самолет вошел в зону турбулентности, пристегните ремни», это значит, что самолет вошел в зону воздушных вихрей, которые клубятся, сталкиваются и мешают полету. Примерно так же выглядит турбулентное течение жидкости. В последнее время Яков Григорьевич приложил много усилий к занятиям математической гидродинамикой.

Течение жидкости описывается так называемым уравнением Навье—Стокса, дифференци-

альным уравнением с частными производными. Его исследование Институт Клея назвал одной из семи ведущих проблем XXI в., и она входит в число так называемых millennium prize problems, за решение которых объявлена миллионная премия. Проблема состоит в следующем: начать с довольно компактных уравнений Навье—Стокса и с их помощью объяснить совершенно загадочное явление турбулентности, которое тоже в каком-то смысле противоречит детерминистской философии Лапласа. Представим себе следующий эксперимент: возьмем жидкость в сосуде и будем ее медленно разгонять. Например, сосуд может быть зазором между двумя цилиндрами, в котором залита жидкость. Один цилиндр неподвижен, а другой начинает постепенно раскручиваться, разгоняясь до очень большой скорости. Этот процесс можно описать дифференциальным уравнением, но только в бесконечномерном пространстве. В соответствии с теорией существования и единственности при двух экспериментах, производимых в тождественном режиме, моделируется одно и то же решение дифференциального уравнения, поэтому картина должна наблюдаться одна и та же. Между тем сначала действительно эта гипотеза подтверждается (т.е. при двух экспериментах развитие течения примерно одно и то же: есть аккуратные струи, которые легко проследить и описать), но затем появляются мелкие вихри, начинается хаос, и две картины течения при двух практически тождественных экспериментах оказываются абсолютно различными между собой.

Турбулентным может быть течение не только жидкости, но и газа. На рисунке показано возникновение турбулентности при обтекании крыла потоком воздуха. Как объяснить это явление? Гипотеза, сформулированная академиком Арнольдом, состояла в том, что уравнение Навье—Стокса — бесконечномерная гиперболическая система (как видите, все связано в теории динамических систем). Эта гипотеза до сих пор не доказана. Один из ключевых вопросов относится к уравнению, описывающему движение идеальной жидкости (без вязкости). Такой упрощенный вариант уравнения Навье—Стокса называется уравнением Эйлера. Вопрос состоит в следующем: верно ли, что решения уравнения Эйлера в определенном смысле уходят на бесконечность за конечное время?

Яков Григорьевич ответил на близкий вопрос. Если продолжить решение уравнения Эйлера в комплексную область, то там у них возникают особенности. Это результат последнего времени, и он тоже имеет не только математическую, но и физическую и философскую интерпретацию. Надо подчеркнуть, что Яков Григорьевич всю жизнь работает в тесном контакте с физиками.



Возникновение турбулентности. Разрез крыла дан светлым силуэтом. Вверху показано спокойное, так называемое ламинарное, обтекание крыла относительно медленным потоком воздуха. Внизу изображен завихренный, бурный, турбулентный поток, возникающий при быстром обтекании. Зона турбулентности — за крылом.

Гражданская позиция

В заключение несколько слов о гражданском мужестве Якова Григорьевича Синая. В конце 60-х годов математик Александр Сергеевич Есенин-Вольпин (сын поэта) был отправлен в сумасшедший дом за диссидентство (оппозиционную политическую активность). 99 математиков подписали письмо в его защиту. Все они попали в «черный список», и карьеры многих из них были «заморожены». Среди них был и Синай.

В 90-е годы Яков Григорьевич был одним из создателей Независимого Московского университета, который он впоследствии очень сильно поддерживал. Независимый университет стал одним из центров кристаллизации математической жизни Москвы, и в этом — большая заслуга Я.Г.Синая.

© Ю.С.Ильяшенко,
доктор физико-математических наук,
Московский государственный университет
им.М.В.Ломоносова
Корнельский университет США

Материал подготовлен при поддержке департамента образования города Москвы и основан на беседе, которую провела с автором Наталья Иванова-Гладилицыкова.

Поиски потомков Великого МОНГОЛА

Р.А.Фандо,

кандидат биологических наук

Институт истории естествознания и техники им.С.И.Вавилова РАН
Москва

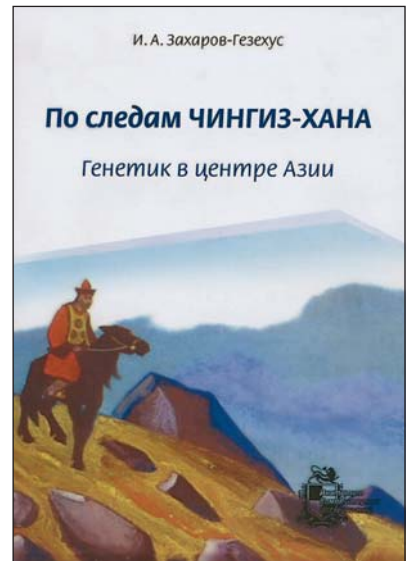
Имя Ильи Артемьевича Захарова-Гезехуса известно не только биологам, а его статьи и выступления в средствах массовой информации всегда привлекают широкую общественность, так как в них в доступной форме он рассказывает о тайнах генов и достижениях современной генетики. Несмотря на множество научных регалий и членство в Российской академии наук, Илья Артемьевич — очень скромный и простой человек, интересующийся помимо своего основного ремесла вопросами истории, этнографии, изобразительного искусства, литературы и религиоведения. Вся многогранность его личности отражается и на содержании его многочисленных научно-популярных произведений. Особого внимания заслуживает последняя книга автора, которую он написал после многолетних исследований генетического состава населения Тувы и Алтая.

Интерес к Азии возник у автора еще в далеком детстве, когда он в годы войны вместе с мамой, искусствоведом, сотрудником Эрмитажа, жил в Китайском дворце в Ораниенбауме под Ленинградом — это был единственный из пригородных дворцов, не разрушенный немецкими оккупантами. Будучи десятилетним мальчиком, он был поражен красотой китайского фарфора, хранившегося в запасниках музея.

Затем было увлечение китайской и индийской культурой,

философией буддизма и мировоззрением Сарвепалли Радхакришна. Поэтому дальнейшие путешествия Ильи Артемьевича по просторам Азии представляли собой не только сборы исследовательского материала, но и погружение в атмосферу особой культуры, обычаев и быта, знакомство со сказочной природой, и, как замечает сам автор, поиск «своей Шамбалы». Неслучайно в книге рассказ об особенностях генотипов азиатских популяций человека сопровождается красочными описаниями земли Тувы, столица которой находится в географическом центре Азии.

История изучения потомков Чингиз-хана началась с публикации целого коллектива ученых в «American Journal of Human Genetics», в которой высказывалось предположение, что Великий монгол оставил после себя около 16 млн потомков, проживающих на территории от Желтого до Каспийского моря. Выдвинуть подобную гипотезу позволил анализ Y-хромосом мужчин монголоидной расы. Как известно, только эта хромосома передается по мужской линии — от отца к сыну, затем к внуку и т.д. Мужчины, принадлежащие к разным народностям или родам, несколько отличаются составом ДНК в Y-хромосоме, т.е. обладают определенным генетическим кодом, сравнимым, например, со штрих-кодом различных товаров в магазине. Американские генетики обнаружили характерную вариацию Y-хромосомы у представителей 16 народнос-



И.А.Захаров-Гезехус. ПО СЛЕДАМ ЧИНГИЗ-ХАНА. ГЕНЕТИК В ЦЕНТРЕ АЗИИ.

М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 84 с.

тей, проживающих на огромной территории и составляющих в общей сложности 16 млн человек. С использованием генетических методов было рассчитано, что годы жизни прародителя этих народов соответствуют времени жизни Чингиз-хана (1162—1227), а распространение данной вариации совпало с территорией, завоеванной Великим монголом и его потомками.

К сожалению, из поля зрения авторов упомянутой статьи выпало монголо- и тюркоязычное население территории современной России. Восполнить этот пробел сумел Захаров-Гезехус, изучив Y-хромосомы у калмыков, ногайцев, бурятов, алтайских казахов, тувинцев, хакасов, якутов, эвенов и эвенков, т.е. тех народов, которые жили на территории Монгольской империи. Достаточно оригинальным оказался биологический материал, собранный для анализа: это были волосы с волосяными луковицами, из которых в дальнейшем выделялась ДНК. Процесс сбора и обработки материалов напоминал тончайшую работу ювелира, с которой успешно справились ученые из Института общей генетики им.Н.И.Вавилова РАН.

Действительно ли найденная среди монголоидов вариация Y-хромосомы принадлежала к роду Чингиз-хана? Этот вопрос долго волновал исследователей, и на него нельзя было дать однозначный ответ. Но разгадка происхождения тайного кода все-таки нашлась, и для этого вообще никуда не нужно было выезжать. Обладателем уникального генотипа оказался ученый секретарь Института общей генетики Серикбай Абилов. Полученные результаты были ошеломляющими, они и пролили свет на тайну найденной среди разных народов вариации Y-хромосомы.

Книга еще раз ярко демонстрирует, что поиск научной истины сродни работе опытного детектива. Никогда не знаешь, где и когда начнется

раскрытие чего-то загадочного и тайного. И никогда не догадаться, к чему выведут тебя собранные факты. А самый лучший детективный роман даже после прочтения оставит в тайне имя убийцы, что также характерно для книги Захарова-Гезехуса: перед читателями возникает несколько версий, объясняющих происхождение данной вариации у азиатских этносов. И заходит все так далеко, что сам начинаешь подозревать о наличии у себя «хромосомы чингизидов» (это вполне совпадает с приведенными в книге примерами предполагаемых потомков «великого завоевателя» среди русского населения).

Особую атмосферу придают книге главы «Лошади Чингиз-хана» и «Собаки Монголии и Тувы». Автор рассказывает нам об особой породе алтайских чубарых лошадей с характерными черными пятнами на белой коже, напоминающими окраску леопарда. Кони именно такой масти подбирались для гонцов Чингиз-хана. Описываемые в книге тувинские овчарки мало известны европейским кинологами. С древних времен кроме функций пастухов и сторожей, местным собакам приходилось выполнять еще и своеобразную роль людоедов, а точнее трупоедов. В Монголии (как и в Туве) всех умерших не предавали земле, а отвозили в степь на съедение птицам и зверям. Если же труп долго оставался несъеденным, это означало, что высшие силы гневятся на покойного. Неслучайно для тувинцев собака считается сакральным животным, так же как и лошадь. Даже в новую колыбель ребенка местные жители сначала укладывали собаку, чтобы она изгоняла нечистую силу. К сожалению, на протяжении многих десятилетий происходило истребление тувинской овчарки. Причины, приведшие к такому положению дел, автор книги пытается объяснить, используя воспоминания местных тувинцев. Захаров-Гезехус сам неоднократно

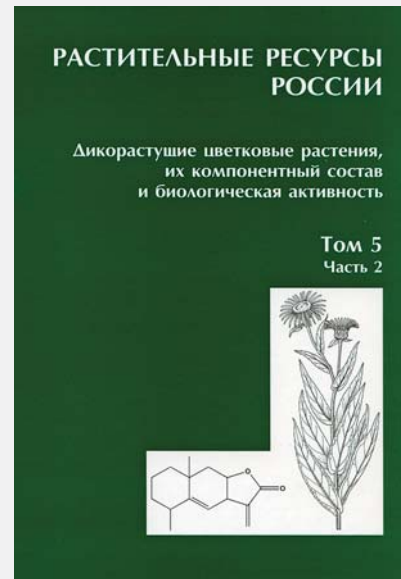
выступал на кызыльском радио и телевидении с призывами сохранить уникальную породу тувинской овчарки. Только благодаря энтузиастам порода была восстановлена в Москве и реинтродуцирована на историческую родину.

Чтение книги вызывает удивление — как автору удалось соединить в книге все вместе: людей, лошадей, собак... А может быть, такая связь тянется уже тысячелетиями? Возможно, это единение человека с природой — и есть ключ к пониманию тайны загадочной азиатской души. Данная работа Ильи Артемьевича ценна не только открытием для читателей новых сведений по генетическому составу популяций, в большей степени населяющих территорию Тувы. Это своеобразная иллюстрированная энциклопедия (книга содержит 30 цветных рисунков и фотографий) истории и быта местного населения. Автор, познав мудрость великого народа, искренне полюбит тувинцев. «Меня восхищают тувинские женщины, — пишет Захаров-Гезехус, — несколько из тех, с кем я познакомился, проявляют в науке или в литературе выдающиеся способности, отличаются завидной настойчивостью и целеустремленностью, позволившими им преодолевать всякие житейские трудности. Честь и хвала им!» (с.78). Такое бережное и трепетное отношение к народностям делает для сохранения их традиций и обычаев гораздо больше, чем административные и законодательные меры. Когда во всем мире многие мелкие народы теряют самоидентификацию, утрачиваются основы национальной культуры, так актуально звучат слова Ильи Артемьевича: «Тува — один из немногих регионов России, где имеет место естественный прирост населения. Оскудение этому народу не грозит» (с.78), «Могу сказать, что у тувинцев древняя и богатая история и, я надеюсь, превосходное будущее» (там же). ■

Ботаника

РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ РОССИИ: ДИКОРАСТУЩИЕ ЦВЕТКОВЫЕ РАСТЕНИЯ, ИХ КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ. Т.5. СЕМЕЙСТВО ASTERACEAE (COMPOSITAE). ЧАСТЬ 2. РОДЫ *ECHINOPS* — *YOUNGIA* / Отв. ред. А.Л.Буданцев. СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 312 с.

Второй частью пятого тома сводки «Растительные ресурсы России» завершается обзор компонентного состава и биологической активности растений семейства Asteraceae. В книге приведены сведения (на основе обобщения данных отечественной и иностранной литературы) по 246 видам из 67 родов. Из них наиболее разнообразно по числу видов представлены роды *Saussurea* (33 вида), *Senecio* (24 вида), *Inula* (12 видов), *Serratula* (11 видов), *Ligularia* (9 видов) и *Lactuca* (7 видов). Порядок описания тот же, что и в предшествующих томах сводки. Внутри семейства роды (а внутри родов виды) расположены в алфавитном порядке. Характеристика видов начинается с краткой ботанико-географической справки, включающей латинские и русские названия, жизненную форму, размеры, географическое распространение по принятой схеме (карта) и экологическую приуроченность. Латинские названия видов даны в соответствии со сводкой С.К.Чернова (1995), с учетом данных более поздних монографий. Химические компоненты сгруппированы по классам природных соединений, для каждого из них указан орган или часть растения, в которых оно было обнаружено. Сведения о биологической активности приведены как для индивидуальных соединений, так и для их групп, фракций и смесей на основе клинических испытаний или результатов экспериментальных исследований.

**Зоология**

С.В.Барышникова. КРИВОУСЫЕ КРОХОТКИ-МОЛИ (LEPIDOPTERA, BUCCULATRICIDAE) ФАУНЫ РОССИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ / Определители по фауне России, издаваемые Зоологическим институтом РАН. Вып.175. СПб.; М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 160 с.



Первая отечественная фундаментальная сводка по насекомым, принадлежащим малоизученному семейству минирующих молей — кривоусым крохоткам-молям (Bucculatricidae), среди которых есть серьезные вредители сельского и лесного хозяйства. Автор провел таксономическую ревизию около трети (28) от общего числа представленных в фауне России видов, типовые экземпляры которых хранятся в коллекции Зоологического института РАН. В общей части книги приведены очерки по морфологии, биологии, распространению, филогении и систематике семейства. Специальная часть включает определительные таблицы и подробные характеристики всех видов (объединенных в 13 группы) рода *Bucculatrix* из фауны России и сопредельных территорий. При диагностике представителей этого семейства в качестве важнейших используются признаки строения гениталий самца и самки.



Во времена СССР Арал был одним из наиболее хорошо изученных морей страны. Высыхание Аральского моря началось в 1961 г. Резкое уменьшение притока речной воды было вызвано главным образом ее отбором на нужды ирригации в бассейнах рек Амударьи и Сырдарьи. К настоящему времени общее понижение уровня поверхности составило почти 27 м. В результате этого море перестало существовать как единое целое, разделившись на несколько отдельных водоемов, связанных периодически пересыхающими протоками. Суммарная площадь свободной водной поверхности уменьшилась в 7–8 раз, объем вод сократился в 12–13 раз (море потеряло более 90% своего объема в условно-естественном состоянии), а соленость возросла многократно — Арал вошел в число самых соленых крупных водоемов планеты. В результате в отдельных частях Аральского моря полностью изменился характер биологических сообществ. Произошло катастрофическое по масштабу смещение береговой линии. Сегодняшний Арал имеет мало общего с тем, каким он был 50 лет назад. Это яркий пример крупномасштабных последствий антропогенного воздействия на огромный водоем. К сожалению, работы по исследованию Аральского моря были полностью свернуты в начале 1990-х годов. Современные трудности изучения Арала связаны с тем, что ранее находившиеся у моря гидрометеорологические станции оказались на суше, а многие районы стали труднодоступными. Поэтому данные космического мониторинга могут быть дополнены лишь экспедиционными работами, масштаб которых в значительной мере определяется долгосрочной программой исследований, разработанной по инициативе Института океанологии им.П.П.Ширшова РАН.

В книге (подготовленной сотрудниками института и специалистами из Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова, научных организаций Узбекистана, Казахстана, Украины и одним ученым из Испании) описаны изменения гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических систем Аральского моря в первом десятилетии XXI в. Основу фактического материала составили данные 12 экспедиций, выполненных в 2002–2010 гг., а также информация, полученная средствами дистанционного спутникового зондирования. Дан краткий обзор состояния моря до начала его высыхания и основных этапов его деградация. Подробно описано современное гидрологическое состояние Арала: структура и изменчивость термохалинных полей, физические свойства вод, циркуляционный режим и водообмен между отдельными частями моря. Приведены сведения о метеорологических изменениях на его побережье. Выполнены оценки стабилизации Аральского моря. Рассмотрены современный ионно-солевой состав вод моря и его изменения, даны оценки масс минералов, осевших на дно в ходе осолонения. Описаны современные альгоценозы и бентосные сообщества Арала и их изменения в последние годы, видовой состав фито- и зоопланктона. Особое внимание уделено популяции эвригалобийного рачка *Artemia*. Приведены сведения о ландшафтах осушившегося дна моря.

Нептунизм и плутонизм — истоки учений

В.Г.Кузнецов,

доктор геолого-минералогических наук

Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина
Москва

В геологии конца XVIII — начала XIX в. существовали и конкурировали два главных учения, две концепции — нептунизм и плутонизм. О них сообщают учебники по общей и исторической геологии. И, естественно, более подробно они рассматриваются в учебниках и специальной литературе по истории геологии [1, 2].

Одним из авторов идеи и главой школы нептунистов был профессор геогнозии Фрейбергской горной академии Абрахам Готлиб Вернер (1750—1817). Суть учения заключалась в том, что все горные породы образовались в водной среде. Осаждение материала происходило как механически, так и, особенно для кристаллических пород (по современным представлениям, в том числе и магматических), химическим путем. Кристаллические породы при этом, как правило, формировались раньше и слагали основания разрезов. Более молодые вулканы имели другое происхождение, но их, по мнению нептунистов, было существенно меньше и значительной роли они не играли. Среди выдающихся ученых того периода последователем «водных» идей был, в частности, Ж.Ламарк.

Первые же высказывания о роли вулканизма восходят к А.Моро (1687—1764), однако в достаточно разработанной форме концепция плутонизма связана с шотландским естествоиспытателем Джеймсом Хаттоном (1726—1797). В русской литературе он чаще фигурирует как Геттон. Суть этого учения в том, что геологические процессы связаны с внутренней энергией Земли. Даже осадки, на глазах современников накапливающиеся в реках, озерах, и морях, превращаются в породы только под действием этого внутреннего тепла. Другими словами, не только процессы, позднее названные тектоническими, но и образование пород обусловлено глубинным теплом Земли.



Абрахам Готлиб Вернер.



Джеймс Хаттон.

Сами по себе две эти конкурирующие концепции представляют лишь исторический интерес. Любопытно другое: откуда, на основании каких наблюдений взялись такие представления. Ведь идеи возникают не абстрактно. Были какие-то объекты, которые заставили задуматься и предложить соответствующее объяснение.

Надо сказать, что благодарные потомки сохранили объекты, на которых базировались, основывались и которыми аргументировались суждения Вернера и Хаттона. В Германии и Шотландии эти места отмечены памятными знаками, содержащими краткое описание сути геологических обнажений и выводов, которые по ним сделали соответствующие ученые. К сожалению, по техническим (съемка 1977 г.) и метеорологическим причинам фотографии немецкого объекта далеки от совершенства. Фото обнажения в Шотландии сделано в 2013 г. и любезно представлено мне О.В.Сивальневой, которой я искренне признателен.

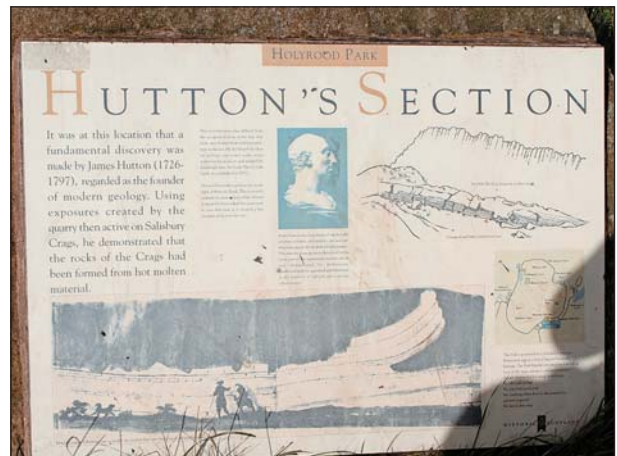
У выхода горных пород в выемке автомобильной дороги вблизи небольшого городка Хонштайн в долине реки Эльбы, юго-восточнее Дрездена, стоит знак «Памятник природы» (изображе-



Обнажение песчаников и гранитов у г.Хонштейн (Германия). Слева — налегание гранитов на песчаники, справа — табличка с объяснением геологического строения объекта (перевод в тексте).

ние совы). На табличке приводится современная геологическая интерпретация: «Древний гранит Лаузитц во время горообразовательных движений был надвинут на первоначально наслоенные меловые песчаники. Вследствие этого образовалось перевернутое напластование». Немецкие ученые уточняют, что это гранодиориты, а осадочные породы представлены песчаниками и гравелитами верхнего турона. Во времена Вернера о надвигах ничего не знали. А вот пример — кристаллические породы залегают на однозначно осадочных образованиях, следовательно, и они имеют осадочное происхождение.

Второй интересующий нас объект находится на окраине Эдинбурга, в основании высокого останца Salisbury Crags, на котором построен за-



Обнажение в основании останца Salisbury Crags на окраине Эдинбурга. Вверху — мемориальная табличка (перевод в тексте), внизу слева — согласное залегание силла на песчаниках нижнего карбона, справа — смятие и частичное поглощение песчаников породами силла.

мок — одна из основных достопримечательностей шотландской столицы. Изучение этого места, (вернее одного из мест) дало Хаттону основание выработать и сформулировать свои представления. Объект этот — Разрез Хаттона (Hutton Section) — тоже стал мемориальным. На табличке также дано краткое объяснение идеи ученого, который, судя по приведенному тексту, стал, как и В.Скотт и Дж.Уатт, национальным героем Шотландии: «Это место, где Джеймсом Хаттоном, основателем современной геологии, было сделано фундаментальное открытие. Используя обнажение, созданное действующим тогда карьером, он показал, что породы Salisbury Crags были сформированы из горячего расплава».

В более профессиональном описании подтверждается, что интерпретация этого разреза была важным аргументом в дискуссии с вернерианскими представлениями [3]. Здесь обнажается силл (пластовая интрузия) основной гипабис-

сальной породы — тешенита, который залегает на белых и красных прибрежно-морских и лагунных обломочных породах Cementstone Group нижнего карбона. В одних случаях эти отложения смяты, местами наблюдаются их перевернутое залегание и частичное поглощение силлом. В других случаях залегание согласное, причем на контакте отмечается тонкий (в 1 см) прослой стекла — продукта охлаждения расплава на границе с осадочными породами. Выше тешенит обладает уже кристаллической структурой. Вверх по разрезу силла размер кристаллов увеличивается. Осадочные породы над силлом не нарушены и параллельно наслоены.

Интереснейший феномен. Практически однотипный характер разреза — налегание магматических пород (как это ясно сейчас, интрузивных в одном случае и эффузивных в другом) на осадочные. А какая разная, по сути дела противоположная, геологическая интерпретация! ■

Литература

1. *Высоцкий Б.П.* Проблемы истории и методологии геологических наук. М., 1977.
2. *Хаин В.Е., Рябухин А.Г.* История и методология геологических наук. М., 1997.
3. *McAdams A.D., Clarkson E.N.K.* Lothian Geology. An Excursion Guide. Edinburg, 1996.

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь

Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы

О.О.АСТАХОВА

М.Б.БУРЗИН

Т.С.КЛЮВИТКИНА

К.Л.СОРОКИНА

Н.В.УЛЬЯНОВА

О.И.ШУТОВА

Выпускающий редактор

Л.П.БЕЛЯНОВА

Литературный редактор

Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор

Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией

И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Перевод:

С.В.ЧУДОВ

Корректоры:

М.В.КУТКИНА

Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:

А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

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

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56

E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 21.05.2014
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать
Заказ 252
Набрано и сверстано в редакции

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