

ISSN 0032-874X

# ПРИРОДА

5 17



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

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

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

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Если бы мезозойские морские ящеры не вымерли в меловом периоде, то среди потомков плиозаврид мог бы в процессе эволюции появиться такой неоплиозавр, конвергентно схожий с кашалотом. См. в номере: **Архангельский М.С., Нелихов А.Е. Эффект мезозойской бабочки, или Эволюция, которой не было.**

Рисунок А.А.Сменцарёва

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ. Рыбалка с бакланами на оз.Поян. См. в номере: **Обозова Т.А. Подготовка молодых бакланов для рыбного промысла в Китае.**

Фото автора



«Наука»

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

**В НОМЕРЕ:**

### 3 Ю. Н. Ефремов

#### Загадки странной галактики NGC 6946

Уединенная спиральная галактика NGC 6946 демонстрирует высокий темп звездообразования (обычно наблюдающийся у галактик, находящихся в тесном соседстве друг с другом), необычное распределение магнитного поля и газовых облаков, объекты странных форм. Что из этих особенностей поддается объяснению, а что еще предстоит понять?

### 11 А. Д. Чернин, Л. Н. Бердников, А. С. Расторгуев

#### Большая наука астрономия

Астрономию делают большой наукой не только гигантские установки и огромные коллективы исследователей, но и «большие» астрономы, которых, в свою очередь, делают таковыми их открытия. Пользуясь юбилейным поводом, расскажем о достижениях Юрия Николаевича Ефремова.

### 18 Р. М. Семенов, В. В. Кашковский, М. Н. Лопатин

#### Прогноз землетрясений. Почему молчат ученые?

Несмотря на то, что сейчас известно большое количество предвестников землетрясений, катастрофические события продолжают происходить неожиданно не только для населения, но и для специалистов-сейсмологов, а в случае не оправдавшегося прогноза ущерб от него может превзойти ущерб от самого землетрясения.

### 29 А. З. Миндубаев, А. Д. Волошина, Ш. З. Валидов, Д. Г. Яхваров

#### Биодеградация белого фосфора

Белый фосфор — один из самых опасных загрязнителей окружающей среды. Недавно удалось впервые получить культуры микроорганизмов, которые растут в средах с высокой концентрацией белого фосфора, по-видимому, окисляя ядовитое вещество до фосфата, необходимого им для жизнедеятельности. Это первый в мире пример включения белого фосфора в биосферный круговорот.

### 44 Т. А. Обозова

#### Подготовка молодых бакланов для рыбного промысла в Китае

Ловля рыбы с помощью бакланов — традиционный народный промысел, существующий в Китае много столетий. Опрос рыбаков в трех юго-восточных регионах страны позволил описать все этапы разведения и подготовки молодых птиц, а также выявить, какие возрастные особенности врожденного поведения бакланов используют китайские рыбаки.

### 52 А. А. Галанин, В. А. Шишков, И. В. Климова

#### Фульгуриты: «автографы молний» в песчаных дюнах Якутии

Якутские тукуланы преподносят исследователям немало сюрпризов. И одним из них стали многочисленные скопления фульгуритов — уникальных природных образований, формирующихся при ударе молний в грунт.

### 61 В. И. Приходько

#### Вымирание сахалинской кабарги

Промышленные лесозаготовки, выбросы химического завода, браконьерство и лесные пожары привели к разрушению мест обитания сахалинской кабарги, уменьшению ее кормовой базы и сокращению ее численности до 220–250 особей. Через двадцать лет этот островной подвид копытных может исчезнуть.

## Научные сообщения

### 69 О. Ю. Цупко

#### Гравитационное линзирование сверхновой

## Времена и люди

### 74 УЧЕНЫЙ ПЕРВОГО РЯДА

Памяти Л. Д. Фаддеева

Л. Д. Фаддеев

#### Научное мировоззрение и «Природа» (75)

М. А. Семенов-Тянь-Шанский

#### О нашем учителе (77)

### 86

## Новости науки

Модель с Q-шаром в центре нашей Галактики. С. В. Троцкий (86). Необычное окисление наночастиц кремния в атмосфере кислорода. Ю. А. Успенский, С. В. Лепешкин, В. С. Батурин, А. Р. Оганов (87). На севере Сибири открыта новая крупная магматическая провинция. Р. В. Веселовский (88).

## В конце номера

### 90 М. С. Архангельский, А. Е. Нелихов

#### Эффект мезозойской бабочки, или Эволюция, которой не было

## CONTENTS:

### 3 **Yu.N.Efremov** **Mysteries of the Strange Galaxy NGC 6946**

*The solitary spiral galaxy NGC 6946 shows a high rate of star formation (usually observed in galaxies in close proximity to each other), an unusual distribution of magnetic field and gas clouds, objects of strange shapes. Which of these features can be explained, and which still remain to be understood?*

### 11 **A.D.Chernin, L.N.Berdnikov, A.S.Rastorguev**

#### **Big Science Astronomy**

*Astronomy is made a big science not only by giant installations and huge research teams, but also by «big» astronomers, who in turn are made such by their discoveries. Taking advantage of the jubilee occasion, let's talk about the achievements of Yuri Nikolaevich Efremov.*

### 18 **R.M.Semenov, V.V.Kashkovsk, M.N.Lopatin**

#### **Earthquake Prediction. Why Do the Scientists Keep Silent?**

*Despite the fact that a large number of earthquake precursors are known now, catastrophic events continue to happen unexpectedly not only for the population, but for professional seismologists, too. And in cases that fall short of predictions, the damage can surpass the one after the earthquake itself.*

### 29 **A.Z.Mindubaev, A.D.Voloshina, Sh.Z.Validov, D.G.Yakhvarov**

#### **Biodegradation of White Phosphorus**

*White phosphorus is one of the most dangerous pollutants. For the first time, we succeeded to obtain cultures of microorganisms that grow in media with high concentration of white phosphorus, probably oxidizing the poisonous substance to phosphate, necessary for life. This is the first example of white phosphorus involvement into the biosphere exchange cycle.*

### 44 **T.A.Obozova**

#### **Young Cormorant Training for Fishery in China**

*Cormorant fishing is a traditional folk craft that exists in China for many centuries. Interviewing of fishermen from three south-eastern regions of the country has allowed to describe all stages of young birds breeding and training, and to reveal which age peculiarities of cormorant innate behavior are used by Chinese fishermen.*

### 52 **A.A.Galanin, V.A.Shishkov, I.V.Klimova**

#### **Fulgurites: «Lightning Autographs» in Yakutia Sand Dunes**

*Yakut tukulans spring many surprises on the researchers. And one of them are numerous accumulations of fulgurites — unique natural formations, evolving when lightning strikes the subsoil.*

### 61 **V.I.Prihod'ko**

#### **Extinction of Sakhalin Musk Deer**

*Industrial tree felling, chemical effluents, poaching and forest fires led to the destruction of Sakhalin musk deer habitats, decrease in food reserve, and depletion in numbers to 220–250 deers. This island subspecies of ungulates may vanish in twenty years.*

## Scientific Communications

### 69 **O.Yu.Tsupko**

#### **Gravitational Lensing of a Supernova**

## Times and People

### 74 **A SCIENTIST OF THE FIRST ROW**

*In Memory of L.D.Faddeev*

**L.D.Faddeev**

#### **Scientific Worldview and «Priroda» (75)**

**Semenov-Tian-Shansky**

#### **About Our Teacher (77)**

### 86

## Science News

*A Model with Q-ball in the Centre of Our Galaxy. S.V.Troitsky (86). Unusual Oxidation of Silicon Nanoparticles under Oxygen Atmosphere. Yu.A.Uspenskii, S.V.Lepeshkin, V.S.Baturin, A.R.Oganov (87). New Large Igneous Province Discovered in Northern Siberia. R.V.Veselovsky (88).*

## End of the Issue

### 90 **M.S.Arkhangel'sky, A.E.Nelikhov**

#### **Mesozoic Butterfly Effect, or The Evolution That Never Happened**

# Загадки странной галактики NGC 6946

Ю.Н.Ефремов

Звездная система NGC 6946 входит в первую дюжину самых близких к нам спиральных галактик, и уже поэтому неудивительно, что она пристально изучается астрономами. Очень удачен для исследований наклон ее диска к «плоскости» небесной сферы — он относительно невелик (около  $38^\circ$ ). Но не только соседство и удобство наблюдений стимулируют научный интерес: галактика оказалась уникальной сразу в нескольких отношениях.

## Редкостные черты

Необычно положение NGC 6946 в пространстве — вдали от всех других галактик (не считая, конечно, нескольких ее карликовых спутников), в малонаселенной области — в так называемом Местном войде (Local void). Более известна другая особенность этой галактики: с 1917 по 2008 г. в ней зарегистрировано девять вспышек сверхновых звезд. Это рекордное количество таких вспышек, наблюдавшихся в какой-либо галактике, — и свидетельство высокого темпа образования в NGC 6946 самых массивных звезд, которые на поздних стадиях эволюции, после выгорания в их недрах ядерного топлива, очень быстро, за несколько дней, резко увеличивают свою яркость и затем медленно угасают, превращаясь в нейтронные звезды или черные дыры.

Свое прозвище Фейерверк эта галактика получила, однако, не из-за частых вспышек сверхновых, а за обилие ярких областей ионизированного водорода HII (рис.1). Данный факт тоже указы-



**Юрий Николаевич Ефремов**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела изучения Галактики и переменных звезд Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — звездообразование, строение нашей Галактики и других галактик, звездные группировки, история астрономии, борьба с лженаукой.

*В мае Юрий Николаевич, наш давний и постоянный автор (имеющий более 30 публикаций в «Природе», первая из которых датирована 1962 годом!), отмечает 80-летие. Редакция сердечно поздравляет юбиляра и желает ему новых научных успехов и, разумеется, новых ярких статей.*

**Ключевые слова:** галактики, спиральные рукава галактик, звездные комплексы, звездные скопления.

**Key words:** galaxies, spiral arms of galaxies, star complexes, star clusters.

вает на многочисленность в NGC 6946 массивных звезд (по массе превышающих восемь солнечных), которые способны не только взрываться, как сверхновые, но и ионизировать своим излучением соседние водородные облака. А их обилие, в свою очередь, объясняется высоким темпом современного (т.е. в последние несколько миллионов лет) звездообразования в этой галактике. Массивные звезды ведь живут недолго, немногие десятки миллионов лет: неэкономно растрачивая на огромную яркую светимость и высокую температуру поверхности свои запасы ядерного топлива, они заканчивают свою яркую жизнь, вспыхивая как сверхновые звезды...

Конечно, следует задаться и следующим вопросом: почему же в этой изолированной галактике наблюдаются признаки интенсивного звез-





Рис.1. Галактика NGC 6946 (слева, изображение получено на телескопе Subaru; линия, проходящая через ее центр, показывает большую ось галактики) и ее центральная область (справа). Подчеркнут красный цвет областей НII, излучающих в линии водорода  $H_{\alpha}$  — их обилие и яркость объясняют прозвище Фейерверк, закрепившееся за этой галактикой.

дообразования — обычно оно стимулируется наличием близких соседей, приливными воздействиями их тяготения. Однако эта галактика задает и более трудные загадки.

Уникальной особенностью NGC 6946 оказывается также то, что, хотя магнитное поле в ней и концентрируется в широких рукавах, эти магнитные рукава расположены между наблюдаемыми в оптике звездными спиральными рукавами, а не внутри них, как это наблюдается во всех других спиральных галактиках, где магнитное поле исследовалось. Сами оптические рукава здесь тоже широкие и размытые, трудно даже сказать, сколько же их — четыре или пять. Области НII разбросаны по всей галактике, в том числе и посередине рукавов, тогда как в обычных спиральных галактиках они сосредотачиваются вдоль внутренних краев рукавов, указывая на положение молодых горячих звезд, ионизирующих соседний водород (и тем самым на градиент возрастов звезд поперек рукава).

Молодые звезды в спиральных рукавах многих галактик образуются в результате уплотнения газа волной плотности на внутреннем крае рукава; обращаясь вокруг центра галактики быстрее, чем волна плотности, к внешнему краю рукава звезды приходят несколько постаревшими. Обнаружение такого градиента в одном из рукавов галактики Андромеды стало в свое время важным подтверждением теории рукавов как всегалактических волн плотности в HI-дисках (дисках нейтрального водорода) спиральных галактик. Эти волны вращаются вокруг центра галактик с постоянной угловой скоростью, тогда как скорости обращения и газа, и звезд изменяются с расстоянием от центра.

При низком разрешении NGC 6946 лохматые спиральные рукава в ней выглядят похожими на наблюдающиеся в далеких «шерстистых» (woolly) галактиках, описанных в статье Брюса и Дебры Эльмегринов [1]. Такие галактики имеют большие красные смещения ( $z$  в интервале 1.4–1.8) — следовательно, они находятся очень далеко (рис.2).

Среди близких спиральных галактик наша NGC 6946, может быть, не случайно выглядит пришельцем издалека; точнее говоря, ее внешний вид может быть как-то связан с ее локализацией в области с малой плотностью галактик.

Эта галактика отличается и большим количеством «дыр» в газовом слое ее диска — они видны как в радиодиапазоне (на длине волны 21 см), так и в инфракрасных лучах, в которых

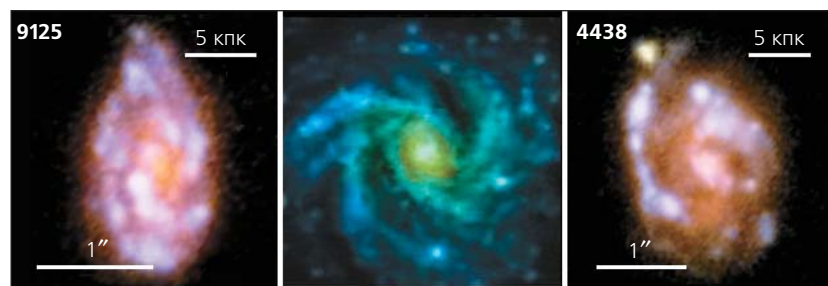


Рис.2. Галактика NGC 6946 (в центре) при специально ухудшенном разрешении напоминает очень далекие «шерстистые» галактики (слева и справа).

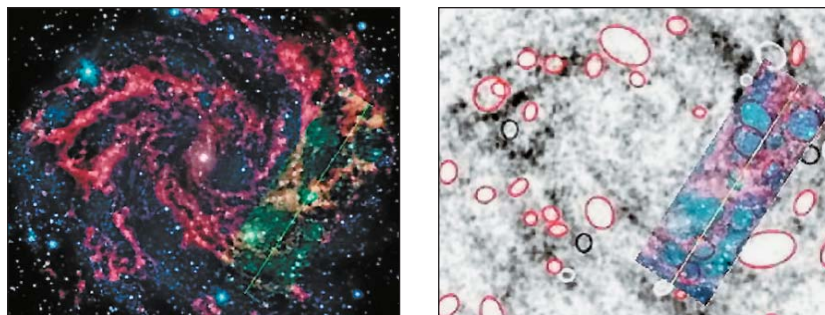


Рис.3. NGC 6946 в ближней инфракрасной области спектра (слева) и на волне 21 см нейтрального водорода HI (справа). Красные овалы отмечают «дыры», области пониженной плотности в HI-диске галактики. Они видны и на ИК-изображении, что означает низкую плотность в дырах не только нейтрального водорода, но и теплой пыли. На оба изображения наложено (в правом нижнем углу) положение щели спектрографа БТА, при котором получены спектрограммы, показанные на рис.7 слева.

излучает чуть теплая пыль, тоже концентрирующаяся в диске галактики (рис.3).

### Родословная дыр

Некоторые из этих дыр (holes) в газовом диске NGC 6946 огромны, диаметр наибольшей из них составляет ~2 кпк. Такие размеры значительно превышают толщину газовых дисков галактик. Обычно считается, что подобные дыры были образованы источниками давления, действовавшими внутри их зародышей (прежде всего горячими звездами и неоднократными вспышками сверхновых), однако следы их активности внутри дыр встречаются очень редко. Так или иначе, давление на окружающий газ и, соответственно, увеличение диаметра дыры прекращаются, когда ее диаметр становится близким к эффективной толщине газового диска галактики, который вряд ли больше сотни-другой парсек — а диаметр многих дыр существенно больше. Эта проблема известна и для большинства других спиральных галактик. В качестве локализованных источников давления, которые могут разгонять газ, образуя дыры в HI-дисках галактик (помимо сверхновых и звездного ветра от горячих звезд), давно уже рассматриваются столкновения с межга-

лактическими газовыми облаками [2] или с карликовыми галактиками [3], но убедительных оценок частоты столкновения такого рода объектов с большими галактиками до сих пор нет.

На наш взгляд, наиболее убедительное объяснение происхождения большинства дыр в газовых дисках галактик уже давно дал Б.Эльмегрин, который предположил, что специальную причину формирования дыр искать не нужно [4]. Дело в том, что турбулентность в межзвездном газе и фрактальная структура его облаков сами по себе уже подразумевают наличие больших и малых дыр в газовых дисках галактик,

не требуя существования отдельного механизма для их формирования. Эта идея не была развита дальше и нуждается в подтверждениях. Так или иначе, сравнение моделей Эльмегрин с областью на западе NGC 6946 (а запад на астрономических картинках *всегда* справа — ибо астрономы стараются наблюдать свои объекты, когда они в меридиане, т.е. на юге, и имеют максимальную высоту над горизонтом) показывает несомненную схожесть наблюдаемой и теоретической картин (рис.4).

Этот рисунок показывает, что распределение HI (слева) и газовых облаков, излучающих в дальнем инфракрасном диапазоне (в центре), очень похоже. Видно также, что гигантские дыры в распределении HI включают в себя как небольшие газовые облака, так и свободное пространство между ними.

С другой стороны, как много лет назад заключил К.Хейлес, не исключено, что «агент, ответственный за существование крупных дыр [в газовых дисках галактик] может представлять новый, неизвестный вид астрономических объектов» [5]. Приходится констатировать, что в природе как больших, так и малых дыр до сих пор много непонятного. Почему, например, дыры в газовом диске близкой спиральной галактики M81 столь многочисленны и, кроме того, почему все они очень малы?

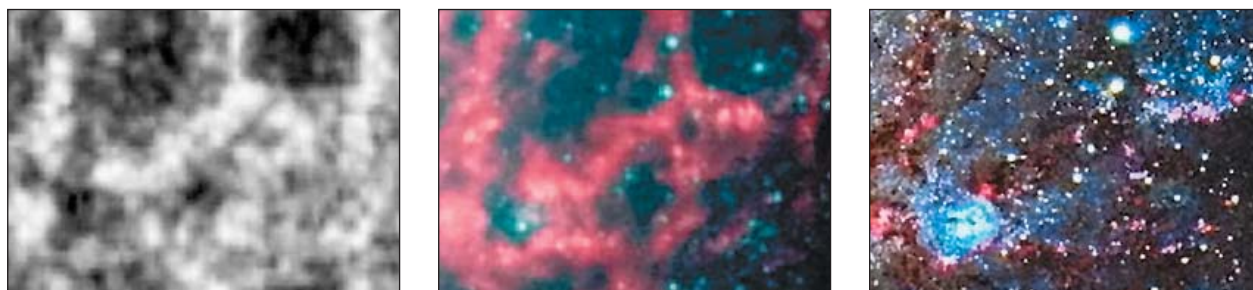


Рис.4. Область галактики NGC 6946 к западу от ее центра. Слева — изображение в линии нейтрального водорода 21 см, в центре — в ближней ИК-области, справа — в оптическом диапазоне (телескоп Subaru).



## Странный комплекс

Многочисленные (в том числе и большие) дыры наблюдаются в газовых дисках многих спиральных и неправильных галактик, но в NGC 6946 имеется еще и уникальный объект — это комплекс Ходжа, замеченный еще полвека назад [6]. Детальное его изучение началось только в начале 21-го столетия. Комплекс имеет резкий западный край, являющийся на дуге в  $134^\circ$  частью правильной окружности, и неправильную восточную границу (рис.5). В нем находится гигантское молодое скопление и много небольших, тоже молодых, скоплений. Диаметр этого комплекса около 700 пк, не такой уж редкий для звездных комплексов, — уникальна его идеально правильная полукруговая западная граница. Изображения комплекса были получены на HST (космическом телескопе «Хаббл») и результаты их изучения были опубликованы в нескольких совместных статьях голландских, американских, испанских и российских астрономов.

Несколько позднее на 6-метровом Большом телескопе азимутальном (БТА) Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН были получены изображения комплекса и его окрестностей в узких спектральных диапазонах [7]. Некоторые из них показаны на рис.6. Видно, что синее пятно в центре (локальный минимум лучевых скоростей,  $V_r$ ) в точности совпадает с областью аномальной ионизации, о которой говорит высокое значение (около 1.2–1.5) отношения интенсивности эмиссионных линий ионизованного азота [NII] (с длиной волны 6548 и 6583 Å) и водорода  $H_\alpha^*$  (рис.6). Чаще всего такие значения свидетельствуют об ударной (а не температурной) ионизации газа, и в статье 2007 г. мы заключили, что это синее пятно есть дырка, пробитая каким-то объектом, прошедшим сквозь газовый диск NGC 6946, поэтому мы и видим ударную ионизацию. О наличии такой дырки вроде бы говорили не только изображения, представленные на

нижней части рис.6, но и совпадающий с ней локальный минимум лучевых скоростей.

Однако в следующей статье [8] нам пришлось пересмотреть свое заключение. Детально изучив те же спектрограммы, мы нашли, что лучевые скорости газа можно расщепить на две составляющие. Одна из них действительно возникает в газе диска NGC 6946, а вот другая — в газе нашего Млечного Пути, а точнее, в облаках HI, находящихся на галактической широте  $+12^\circ$ , на которой расположена NGC 6946.

На рис.7 (слева) приведены лучевые скорости — для нейтрального водорода и определенные по линии  $H_\alpha$  — вдоль щели, положение которой на фоне всей галактики NGC 6946 показано на обеих частях рис.3. Представлено также пространственное распределение интенсивности эмиссионной линии  $H_\alpha$ . В правой части рис.7 приведена кривая вращения NGC 6946, полученная в работе [9] по данным о нейтральном водороде. Однако на этом рисунке, помимо кривой вращения водородного диска NGC 6946, видна и странная горизонтальная полоса газовых облаков с почти одинаковой скоростью, от  $-15$  до  $-30$  км/с. Эта полоса может принадлежать только газовому слою переднего плана, т.е. нашей Галактике, Млечному Пути! Примерно таким значениям лучевой скорости соответствует и цвет синего пятна на рис.6. Непонятно, почему авторы [9] ни словом не упомянули эту полосу. Впрочем, и мы ведь лишь недавно додумались до правильного ее объяснения.

Стало ясно: если синее пятно на рис.6 соответствует локализации области, которая показывает отношение линий, типичное для ударной ионизации, то прежде всего потому, что это есть дырка (скорее, дырочка, ибо — на расстоянии NGC 6946 — 1 секунда дуги соответствует 30 парсекам) в газовом слое диска NGC 6946 и сквозь эту дырку мы можем увидеть спектральные особенности газа нашей собственной Галактики на галактической широте  $+12^\circ$ . Дело в том, что и в нашей, и в других галактиках газ, находящийся высоко над их плоскостью, имеет аномальное отношение интенсивности линий как азота [NII] (6548 + 6583), так и се-

\*  $H_\alpha$  — первая линия (с длиной волны 6563 Å) балмеровской серии водорода, лежащей в видимой области спектра.



Рис.5. Изображения комплекса Ходжа. Слева — данные космического телескопа Хаббл, UV-диапазон; в центре — комплекс и его окрестности (телескоп Gemini North); справа — наземное изображение с увеличенной контрастностью (телескоп среднего размера). Центральная часть комплекса Ходжа резко ограничена с запада (справа!) дугой идеальной окружности.



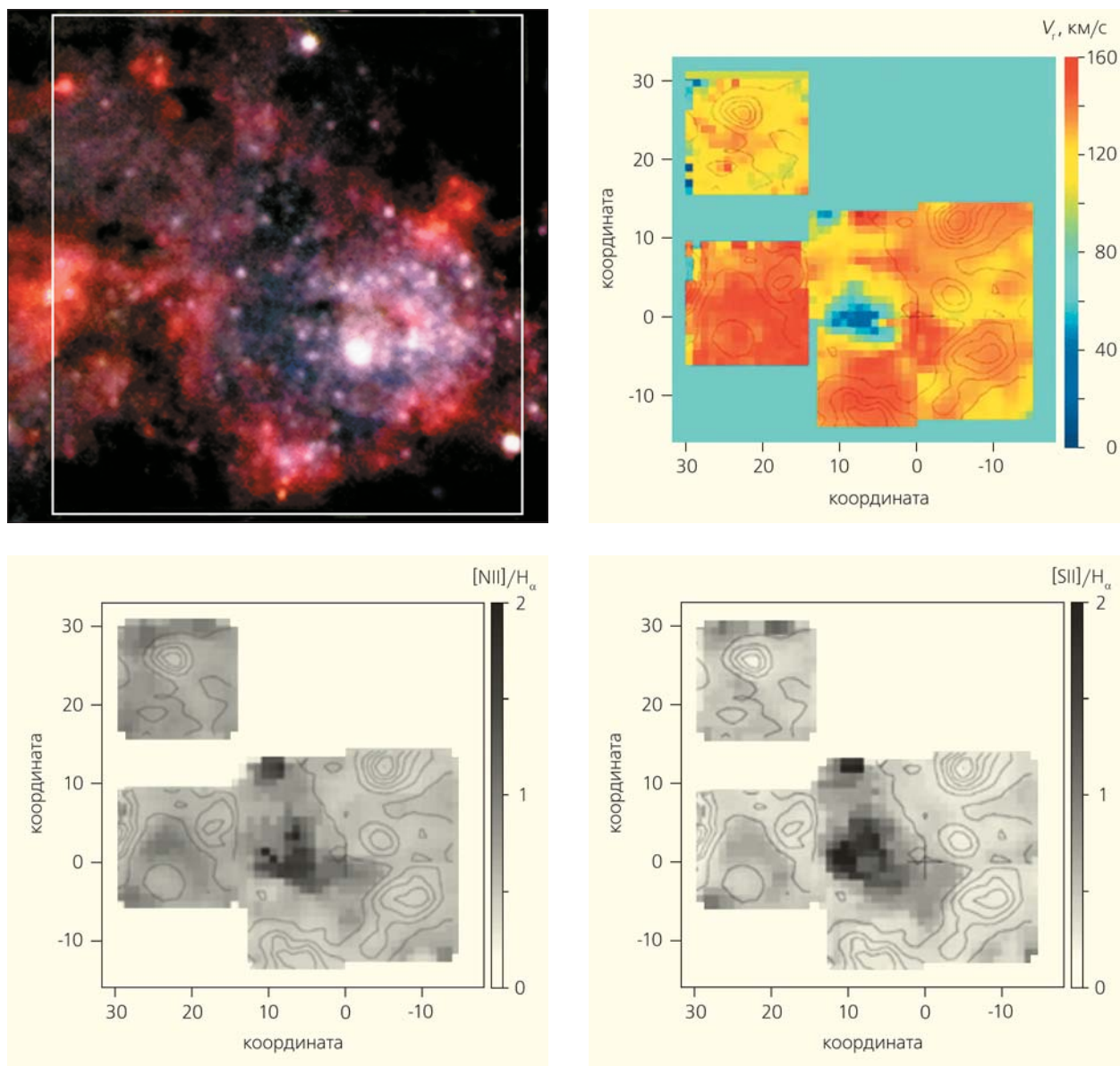


Рис.6. Изображения комплекса Ходжа и его ближайших окрестностей, исследованных с помощью спектрографа MPFS (Multi-Pupil Fiber Spectrograph) на 6-метровом телескопе БТА. Вверху: изображение, полученное на телескопе Gemini North (слева; белой рамкой ограничено поле, исследованное спектрально на БТА); поле лучевых скоростей в пределах этого участка (справа; изолинии указывают положение областей, ярких в линии  $H_\alpha$ ; они видны и на левом рисунке). Внизу: карты величин отношения интенсивности линий  $[NII]/H_\alpha$  (слева) и линий  $[SII]/H_\alpha$  (справа). Область низких скоростей (синее пятно) совпадает с участком высокой величины отношения линий  $[NII]$  и  $[SII]$  к  $H_\alpha$  (черное пятно). Здесь находится «дырка» в газовом диске галактики NGC 6946, сквозь которую мы наблюдаем характеристики газа нашего Млечного Пути в данной области. Координаты даны в секундах дуги, начало отсчета соответствует положению ярчайшего звездного скопления в комплексе.

ры  $[SII]$  (6717 + 6731) к интенсивности линии водорода  $H_\alpha$ , — и значение этого отношения соответствует ударному возбуждению спектральных линий. Данный факт давно уже известен в видимых с ребра (т.е. при ориентации ее плоскости вдоль нашего луча зрения) спиральных галактиках — вне плоскости их дисков отношение интенсивности спектральных линий указывает на ударное возбуждение; причины этого пока неизвестны.

Итак, синее пятно на рис.6 — отнюдь не область ударного возбуждения в газовом диске NGC 6946, а сравнительно небольшая дырка в нем, сквозь которую мы видим газ нашей Галактики на широте  $\sim 12^\circ$ , имеющий лучевую скорость около  $-20$  км/с. Излучение высокоширотных облаков HI нашей Галактики, как видно из рис.7 (справа), обнаруживается повсюду в направлении NGC 6946 (заметим, что размеры этой галактики лишь около  $20 \times 20$  уг-

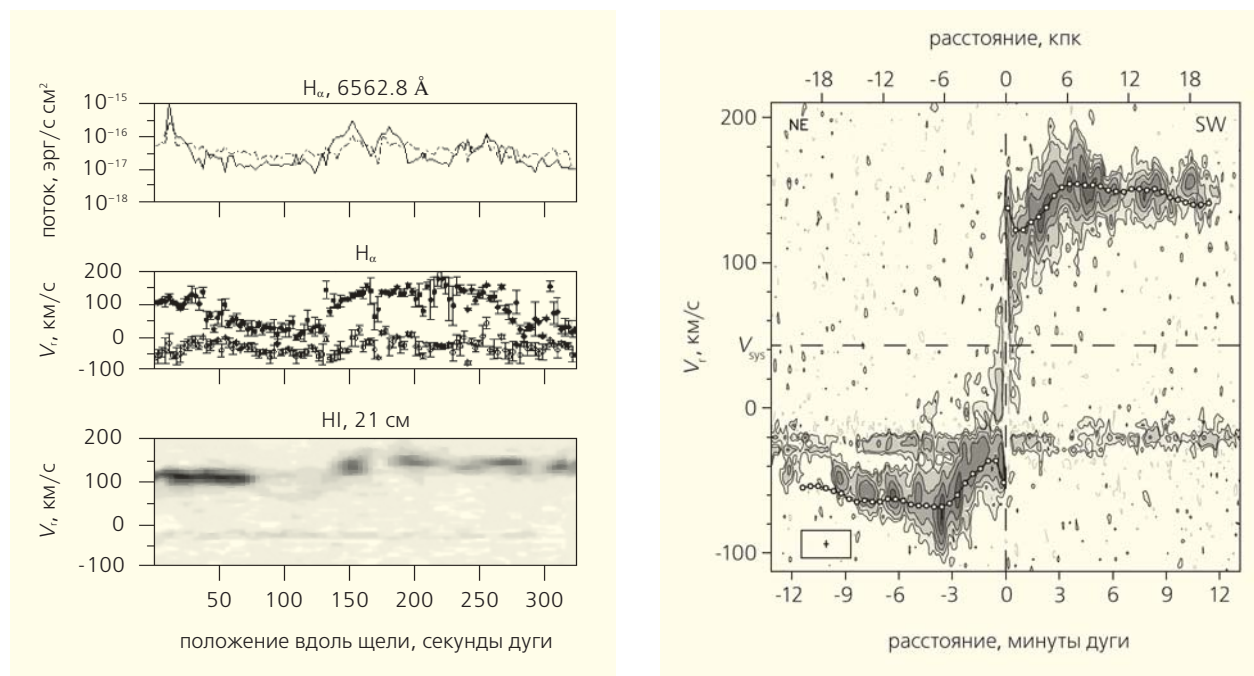


Рис.7. Разрезы (слева) вдоль щели спектрографа БТА, положение которой показано на рис.3. Снизу вверх: лучевые скорости нейтрального водорода HI (горизонтальная полоска при  $V_r \approx -30$  км/с возникает не в NGC 6946, а в разреженном высокоширотном газе нашей Галактики); лучевые скорости по линии  $H_{\alpha}$  (из двух кривых верхняя, более высокоскоростная, рождается в газовом диске NGC 6946, а вторая — в нашем газе); интенсивность эмиссионной линии  $H_{\alpha}$  (провал между двумя горбами в центре соответствует локальному узкому минимуму  $V_r$  среднего графика и синему, темному, пятну, видимому на рис.6). В правой части рисунка показаны лучевые скорости HI, измеренные в работе [8] вдоль большой оси NGC 6946. Указаны расстояния от центра галактики. Видна не только кривая вращения этой галактики, но и горизонтальная полоса, возникшая в высокоширотном газе нашей Галактики. Часть этой полосы и видна на нижнем рисунке слева.

ловых минут — ничтожная доля от площади небосвода), и оно намного слабее, чем приходящее от плотного газа диска NGC 6946. Теперь это представляется совершенно очевидным, но чтобы разобраться, понадобилось и время, и знание характеристик разреженного газа нашей и других галактик высоко над их плоскостью. Остается однако вопрос: чем было вызвано образование этой «синей дырки» в плоскости газового диска NGC 6946.

Вернемся теперь к комплексу Ходжа. Правильная круговая форма его резкой западной границы (рис.5, 8) наводит на предположение, что он может быть карликовой галактикой, которая пересекает газовое гало NGC 6946 относительно невысоко над плоскостью этой галактики.

Осенью 2016 г. мы увидели возможное подтверждение этой гипотезы. Недавно вступил в строй 2.5-метровый телескоп Кавказской горной

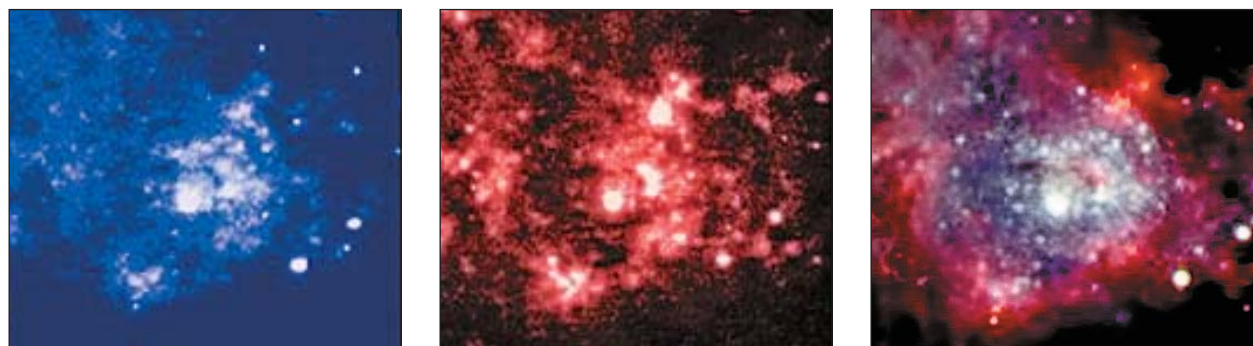


Рис.8. Изображения комплекса Ходжа. Слева — в линиях [SII] (6717 + 6731), в центре — в линии  $H_{\alpha}$  (обработанные детали изображений, полученных на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ), справа — деталь изображения, полученного на 8-м рефлекторе Gemini North на Мауна-Кеа.

обсерватории (КГО), построенной для ГАИШ МГУ (уникальное сегодня для нашей страны событие описано в журнале «Природа» [10]), и для работы на нем уже имеются узкополосные светофильтры. По нашей просьбе в октябре 2016 г. на этом телескопе О.В.Возякова получила узкополосные изображения всей галактики NGC 6946 в линиях ионизированной серы [SII] и в линии  $H_\alpha$ . Выделенные из них небольшие области, содержащие комплекс Ходжа, приведены в сильно увеличенном виде на рис.8 (слева и в центре), а справа показан сам комплекс, вырезанный из изображения, полученного с помощью 8-метрового франко-канадского телескопа Gemini North. (Этот телескоп, наряду со многими другими, стоит на вершине Мауна-Кеа на Гавайских о-вах, лучшего астропункта мира.) Картина синего цвета получена в линии SII, а в розовый мы окрасили изображение в линии  $H_\alpha$ . Отметим, что качество изображений превосходное.

На этом рисунке можно заметить, что синее изображение, в отличие от розового, имеет резкий западный край, положение которого близко к видимому на картинке, полученной на телескопе Gemini North. Иначе говоря, отношение интенсивностей линий SII и  $H_\alpha$  на западной границе комплекса явно повышенное, что свидетельствует о включении ударного возбуждения эмиссионных линий. Представляется, что этот результат (вообще-то это пока еще не результат, а впечатление...) подтверждает гипотезу о формировании западной границы комплекса Ходжа в результате его прохождения через газовую корону NGC 6946. Комплекс движется (и вероятно, с высокой скоростью) сквозь нее к западу — и давление набегающего на него газа короны (или толстого диска) NGC 6946 создает резкую и правильную дугообразную форму западного края комплекса Ходжа. Если этот вторженец был богат газом, на его лобовой стороне в результате столкновения с газом галактики могли формироваться звезды. Такая морфология известна у ряда галактик,двигающихся сквозь достаточно плотный газ.

Некоторые особенности магнитного поля в галактике NGC 6946, наверно, можно объяснить пролетом карликовой галактики сквозь ее газовое гало, под небольшим углом к ее плоскости. Заметим в связи с этим, что уже давно Р.Бек нашел, что полутолщина ионизированного газового диска в галактике NGC 6946 весьма велика — она близка к 1 кпк [11]. И кроме того, он пришел к выводу, что векторы магнитного поля в юго-западном квадранте NGC 6946 (где и расположен этот комплекс) ориентированы перпендикулярно ее плоскости. Может ли это обстоятельство быть как-то связано с наличием в данном квадранте необычного звездного комплекса? Еще раз скажем, что галактика NGC 6946 весьма богата интереснейшими объектами — и все новые загадочные структуры продолжают обнаруживаться.

## Красный эллипс и сетка темных линий

Три года назад в изолированном северном спиральном рукаве NGC 6946 мы заметили на отличном изображении, полученном на 8-метровом японском телескопе Subaru (Мауна-Кеа, высота около 4 км), яркий красный эллипс — а затем обнаружили его и на изображении, полученном на 4-метровом рефлекторе Национальной обсерватории Китт-Пик (США, Аризона), см. рис.1 и рис.9. Странный объект — он несколько похож на остаток сверхновой, но его размеры на порядок (!) больше, чем у самых больших в этой галактике (и в других) подобных остатков. И никто раньше не обращал на него внимания! Он замечен, однако, как пятнышко на многих изображениях, регистрировавших эмиссионные объекты, хотя разрешение на них было маловато. Цвет эллипса, очевидно, определяется излучением в линии  $H_\alpha$ . Большая его ось имеет длину около 300 пк, сам эллипс сопровождается параллельной ему короткой дугой, а несколько еще меньших обрывков лежат тут же, и довольно яркое звездобразное скопление находится внутри эллипса на северо-востоке (рис.9).

Спектральные данные, полученные А.В.Моисевым с длинной щелью на 6-метровом телескопе САО РАН осенью 2015 г., также говорят против возможности происхождения Красного эллипса в результате вспышки сверхновой. Отношение интенсивности линий  $H_\alpha$  и [SII] в нем оказалось почти нормальным, чего не наблюдается в спектрах остатков сверхновых [12]. Характеристики линий в спектре Красного эллипса соответствуют фотоионизации газа, связанной с молодыми горячими звездами, вклад от ударной ионизации здесь невелик. Гипотеза, объясняющая Красный эллипс как газовый пузырь, созданный коллективным из-

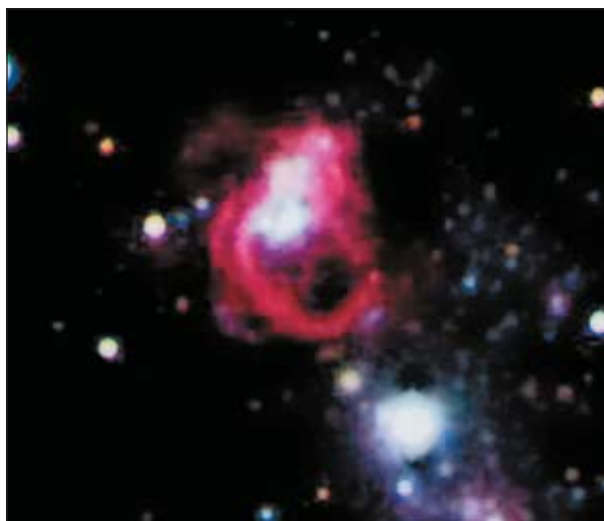


Рис.9. Красный эллипс. Деталь изображения NGC 6946, полученного на 8-метровом рефлекторе Subaru на Мауна-Кеа.





Рис.10. Сетки узких темных линий, отходящих к юго-востоку (налево вниз) от черного пятна, внутри которого находится красный точечный объект. Деталь изображения NGC 6946, полученного на телескопе Subaru.

лучением массивных звезд в северной части скопления, не вяжется ни с его огромными размерами, ни с эксцентричным положением этого скопления внутри эллипса.

И наконец, о последнем из странных объектов, исследованных или замеченных нами в NGC 6946. Это странная сетка пересекающихся узких темных линий, которая находится точно к северу от

комплекса Ходжа и к югу от Красного эллипса (рис.10). На ее западной (*правой*) границе помещается черное пятно, внутри которого можно рассмотреть звездообразный красный объект; от этого пятна на юго-восток отходит темная линия, оперенная с обеих сторон более короткими и узкими, а на юге и на севере от нее находятся другие — темные, регулярно расположенные черточки. Как объяснить эту конфигурацию — непонятно... Никто еще не замечал ее, и пока у нас нет никаких данных об этих крайне странных структурах, кроме изображения, полученного на телескопе Subaru. Несколько настораживает то обстоятельство, что на изображениях, зарегистрированных на других телескопах, столь четкие многочисленные линии не видны — заметны лишь самые широкие из них. Скорее всего, это связано как с превосходным качеством изображений на Мауна-Кеа, так и с отличным качеством оптики телескопа.

Замечу в заключение, что установка 6-метрового БТА (который в течение 20 лет оставался крупнейшим в мире по диаметру зеркала, а ныне примерно на 30-м месте) над сырым ущельем Большого Зеленчука была тяжелой ошибкой. Эффективность этого телескопа оказалась бы существенно выше, будь он построен, скажем, близ Солнечной станции Пулковской обсерватории (где и стоит ныне КГО ГАИШ) — к югу от Кисловодска — а такой вариант обсуждался!.. Так или иначе, будем надеяться, что — с помощью и зарубежных и отечественных данных — загадки галактики NGC 6949 будут разгаданы. ■

## Литература

1. Elmegreen B.G., Elmegreen D.M. The onset of the spiral structure in the Universe // *Astrophys. J.* 2014. V.781. P.11–19.
2. Tenorio-Tagle G., Bodenheimer P. Large-scale expanding superstructures in galaxies // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* 1988. V.26. P.145–197.
3. Bekki K., Chiba M. Impact of dark matter subhalos on extended HI disks of galaxies: possible formation of HI fine structures and stars // *Astrophys. J.* 2006. V.637. P.L97–L100.
4. Elmegreen B.G. Intercloud structure in a turbulent fractal interstellar medium // *Astrophys. J.* 1997. V.477. P.196–203.
5. Heiles C. HI Shells and supershells // *Astrophys. J.* 1979. V.229. P.533–544.
6. Hodge P.W. A possible «Super-Supernova» remnant in NGC 6946 // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* 1967. V.79. P.29–32.
7. Efremov Yu.N., Afanasiev V.L., Alfaro E.J. et al. Ionized and neutral gas in the peculiar star/cluster complex in NGC 6946 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2007. V.382. P.481–497.
8. Efremov Yu.N., Afanasiev V.L., Egorov O.V. Ionized gas characteristics in the cavities of the gas and dust disc of the spiral galaxy NGC 6946 // *Astrophys. Bull. SAO.* 2011. V.66. P.304–319.
9. Boomsma R., Oosterloo T.A., Fraternali F. et al. HI holes and high-velocity clouds in the spiral galaxy NGC 6946 // *Astronomy and Astrophysics.* 2008. V.490. P.555–570.
10. Садовничий В.А., Черепанов А.М. Университетская астрономия: новый старт // *Природа.* 2015. №3. С.3–14.
11. Beck R. Magnetic fields and interstellar gas clouds in the spiral galaxy NGC 6946 // *Astronomy and Astrophysics.* 1991. V.251. P.15–26.
12. Efremov Yu.N., Moiseev A.V. Imaging and spectroscopic observations of a strange elliptical bubble in the northern arm of the spiral galaxy NGC 6946 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2016. V.461. P.2993–3000.

# Большая наука астрономия

А.Д.Чернин, Л.Н.Бердников, А.С.Расторгуев

*доктора физико-математических наук*

*Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга (ГАИШ)*

*Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова*

«Астрономия стала превращаться, на полвека позднее физики, в Большую Науку, в которой многочисленные коллективы работают на гигантских установках», — с этими словами Юрия Николаевича Ефремова из его книги «В глубь Вселенной», выдержавшей уже пять изданий (последнее — в 2009 г.), вероятно, согласны все. Хотелось бы все же добавить, что величие науки измеряется не только численностью коллективов и размерами используемых инструментов; большая астрономия — это прежде всего Большие Астрономы. Воспользовавшись юбилейным поводом (80-летием Ю.Н.), мы расскажем здесь, как далеко не самый крупный телескоп Московской обсерватории на Воробьевых горах оказался первым в соревновании с крупнейшим в мире телескопом на Голубиной горе в Калифорнии. И не только об этом...

## Как была открыта переменность квазаров

Квазары принадлежат к разряду самых мощных излучателей энергии во Вселенной. Типичный квазар светит, как сотня галактик, подобных нашему Млечному Пути с его сотнями миллиардов звезд. Но на снимках неба квазары выглядят всего лишь слабенькими звездочками. Их истинную природу распознал в начале 1963 г. голландский астроном Мартен Шмидт, работавший тогда в Калифорнии. Он смело отождествил линии в спектрах квазаров с излучением водорода, предположив, что это обычные линии бальмеровской серии, но с большим красным смещением. Последнее означает, что объекты находятся очень далеко от нас — отчего и выглядят так скромно. В ГАИШ об открытии квазаров узнали от Иосифа Самуиловича Шкловского, тот получил препринт Шмидта и сразу же предложил Юрию Николаевичу Ефремову и Александру Сергеевичу Шарову, специалистам по переменным звездам, проверить квазары на переменность: светят ли они всегда одинаково или их же их блеск меняется со временем? Богатая коллекция снимков звездного неба, которой рас-

полагает ГАИШ, позволяла быстро найти ответ на этот вопрос. Ю.Н. и А.С. столкнулись у шкафа фототеки, в котором хранились пластинки той области неба, где находится один из самых ярких квазаров, объект 3С 273.

Всего нашлось 44 пластинки, снятые с 1896 до 1960 г., и Ю.Н., сделав несколько оценок на глаз, тут же уверенно заметил, что объект меняет свой блеск. Не ограничившись глазомерными оценками, Ю.Н. и А.С. аккуратно измерили блеск квазара с помощью ирис-фотометра на всех пластинках и установили, что он действительно меняется от 12.0 до 12.7 звездной величины, причем иногда довольно быстро: колебания блеска амплитудой 0.2–0.3 звездной величины происходили всего за несколько дней. Об этом открытии Ю.Н. и А.С. сообщили в том же 1963 г. в IBVS (International Bulletin on Variable Stars. №23. С.1).

Само по себе обнаружение переменности ранее неизвестного объекта, да еще и такого удивительного, — событие в астрономии. Но в данном случае это было особенно интересно. Действительно, переменность на шкале в несколько дней означает, что размер излучающей области квазара 3С 273 очень мал, не больше нескольких световых дней. Об этом первым сказал Феликс Александрович Цицин на семинаре в ГАИШ, на котором Ю.Н. и А.С. сделали свой пионерный доклад об открытии переменности квазаров. Несколько световых дней — это меньше диаметра Солнечной системы. И из области такого размера исходит могучий поток энергии, сравнимый по мощности с излучением десятков триллионов Солнц!

## Шкала расстояний во Вселенной

Измерение расстояний за пределами Солнечной системы всегда составляло (да и сейчас составляет) труднейшую задачу в астрономии. Для примера напомним, что знаменитый космолог Жорж Леметр, а за ним и не менее известный астроном Эдвин Хаббл, открывшие в 1927–1929 гг. закон разбегания галактик, изрядно ошиблись в определении расстояний до галактик, занизив эти рас-

стояния почти на порядок величины. Их ошибку астрономы исправляли потом шаг за шагом три десятка лет. С конца 50-х годов шкала расстояний получила наконец надежные основания, она стала опираться на один их типов пульсирующих переменных звезд — классические цефеиды, и здесь важную роль сыграли цефеиды, найденные в рассеянных звездных скоплениях.

Цефеиды — это звезды, меняющие свой блеск почти строго периодически. Уже давно, более 100 лет назад, у них была открыта зависимость между периодом и светимостью: чем больше период пульсаций, тем больше светимость (мощность излучения). Период изменения блеска цефеиды довольно легко определяется из наблюдений; вычислив по зависимости период—светимость абсолютную звездную величину (т.е. звездную величину, которую звезда имела бы, если бы она находилась на расстоянии 10 пк от нас) и сравнив ее с видимой звездной величиной, можно рассчитать расстояние до источника, учитывая, что создаваемая им освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния. Так цефеиды оказались в роли основных «маяков» Вселенной.

Чтобы реально воспользоваться ими для определения расстояний до далеких галактик, необходимо знать светимость (или расстояние) хотя бы одной цефеиды. Тогда можно откалибровать зависимость период—светимость, или, как говорят астрономы, найти для нее нуль-пункт, т.е. точку отсчета шкалы светимостей. Такая возможность появилась в конце 1950-х годов, когда среди звезд некоторых рассеянных скоплений Галактики были обнаружены цефеиды. Расстояния до скоплений определяют довольно точно путем сравнения светимости и видимого блеска звезд главной последовательности на диаграммах Герцшпрунга—Рассела. Если цефеиды входят в состав скопления, расстояние до них равно — с хорошей точностью — расстоянию до скопления. При этом очевидно: чем больше известно цефеид в скоплениях, тем точнее может быть калибровка зависимости период—светимость цефеид. В конце 1950-х годов астрономы располагали всего пятью такими звездами, так что они были тогда на вес золота. В 1963–1965 гг. Ю.Н. и его коллеги из ГАИШ в результате кропотливой работы обнаружили пять новых цефеид на периферии скоплений, тем самым удвоив число звезд, пригодных для калибровки зависимости период—светимость.

На протяжении последних десятилетий нуль-пункт шкалы расстояний цефеид постоянно уточнялся, и эта работа продолжается до сих пор усилиями многих астрономов разных стран; среди них — ученики и коллеги профессора Ефремова, ныне доктора наук Леонид Николаевич Бердников (рекордсмен по числу фотометрически исследованных им цефеид), Алексей Сергеевич Расторгуев, Андрей Карлович Дамбис. Насколько сложна

эта работа, можно судить по тому факту, что ошибку измерения расстояний не удастся сделать меньше 8–10%. А ведь по цефеидам производится калибровка и других способов измерения внегалактических расстояний. Среди них особое место занимает метод, использующий сверхновые звезды типа Ia (так называемые термоядерные сверхновые) в качестве «стандартных свечей», т.е. объектов с известной светимостью. Этот метод в числе очень немногих других действует на самых больших расстояниях, сравнимых с радиусом видимой Вселенной. Хочется отметить, что именно по наблюдениям термоядерных сверхновых 18 лет назад было открыто ускоренное расширение Вселенной и космическая «темная энергия», физическая природа которой до сих пор остается полнейшей загадкой для фундаментальной физики.

## Опередили Аллана Сэндиджа

На Ленинских горах на территории ГАИШ 60 лет назад был установлен Астрономический зеркальный телескоп (АЗТ-2) с диаметром зеркала 70 см, крупнейший инструмент Московской обсерватории, на котором в течение многих лет велись активные наблюдения переменных звезд и звездных скоплений. Этот телескоп — составная часть научного оборудования для построенного в 1949–1953 гг. гигантского здания МГУ на Ленинских горах. В те времена девизом было: «Наши ученые должны иметь самые лучшие приборы». И не только приборы! По замечанию Ефремова, тогда профессора стали получать, как генералы, ныне же они получают вдвое меньше, чем лейтенанты. А еще Альберт Эйнштейн в свое время сказал, что «интеллектуальные орудия, без которых было бы невозможно развитие современной техники, пришли в основном от наблюдений звезд».

На АЗТ-2, этом телескопе-трудяге, в 1963–1965 гг. Павел Николаевич Холопов, Ю.Н. и ряд их коллег из ГАИШ провели тонкие фотометрические исследования цефеид, опередив на несколько лет американских коллег, работавших в том же направлении на крупнейшем в ту пору в мире 5-метровом телескопе-рефлекторе Паломарской обсерватории на Голубиной горе (США). Предметом изучения прежде всего были цефеиды в рассеянных звездных скоплениях. Одна из них — СЕ Кассиопеи (CE Cas) в уникальном по богатству цефеидами рассеянном звездном скоплении NGC 7790 (их в нем найдено три!) — давно уже привлекала внимание астрономов. Странные «полупериодические» колебания блеска этой звезды долгие годы не поддавались расшифровке, пока сотрудница ГАИШ Генриетта Алексеевна Старикова не обнаружила, что это не одиночная звезда, а двойная, каждый из компонентов которой оказался цефеидой. Расстояние между компонентами невелико — всего 2,3", поэтому измерить по отдельности блеск



каждого компонента долго не удавалось, но в 1965 г. к этой задаче обратились П.Н. и Ю.Н. Для ее решения П.Н. использовал специальный набор диафрагм, защищающих фокус телескопа АЗТ-2 от засветки московским небом. Всего удалось получить 65 фотопластинок, на которых компоненты  $\text{CE Cas}$  были хорошо разделены и потому стали пригодными для фотометрического анализа. Однако в пределах поля зрения телескопа не нашлось постоянного источника, сравнимого по блеску и цвету с компонентами  $\text{CE Cas}$ , который мог бы служить фотометрическим стандартом. А без строгой «привязки» к стандарту фотографическая фотометрия  $\text{CE Cas}$  была бы неточной.

Тогда Ю.Н. предложил использовать в качестве «фотометрического стандарта» (вопреки существующим методикам и, наверное, впервые в астрономической практике!) другую переменную звезду —  $\text{CF Кассиопеи}$ , еще одну цефеиду, члена того же самого скопления. Строгая повторяемость изменений блеска цефеид позволяет — конечно, при острой необходимости — использовать и их в качестве звезд-стандартов. Для уточнения формы кривой блеска и периода  $\text{CE Cas}$  пришлось предпринять специальное исследование. Эта остроумная идея и предредила успех исследования: удалось построить отдельные кривые блеска каждого из двух компонентов  $\text{CE Cas}$ . Результаты были опубликованы в 1965 г. в *Астрономическом циркуляре* (Т.326. №1. С.1). Через четыре года они были подтверждены знаменитыми астрономами Алланом Сэндиджем и Густавом Тамманом, получившими для той же цели 56 пластинок на 5-метровом рефлекторе Паломарской обсерватории. Небольшие расхождения были замечены только вблизи фаз максимального блеска цефеид. Американские коллеги отметили, между прочим, что испытывали те же трудности с калибровкой фотометрических данных, что и астрономы ГАИШ.

Ю.Н. вспоминает: «По выходу в свет всех пяти томов известной некогда монографии о переменных звездах [где была воспроизведена и работа о  $\text{CE Кассиопеи}$ ] Б.В.Кукаркин пришел к нам с П.Н.Холоповым посоветоваться — он хотел выдвинуть ее на Государственную премию. Я был достаточно глуп, чтобы его отговорить».

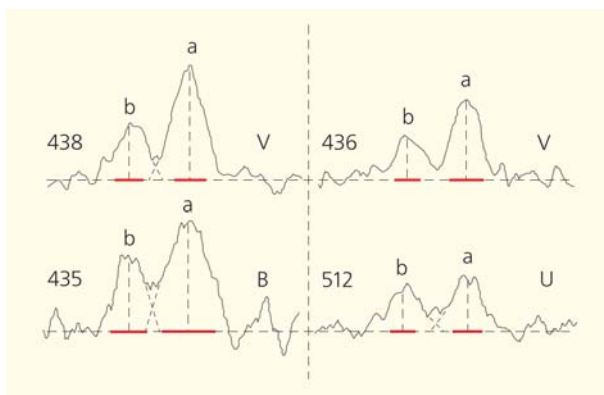
## Старение цефеид

«Всякому уважающему себя естествоиспытателю надлежит за свою ученую карьеру открыть в природе по крайней мере одну линейную зависимость». Молва приписывает эту максиму Юрию Николаевичу. Хрестоматийный образец — легендарный Хаббл с его знаменитым линейным законом «лучевая скорость — расстояние» для разбегающихся галактик.

В 1964 г. Ю.Н. нашел линейную (в дважды логарифмическом масштабе) связь между периодом

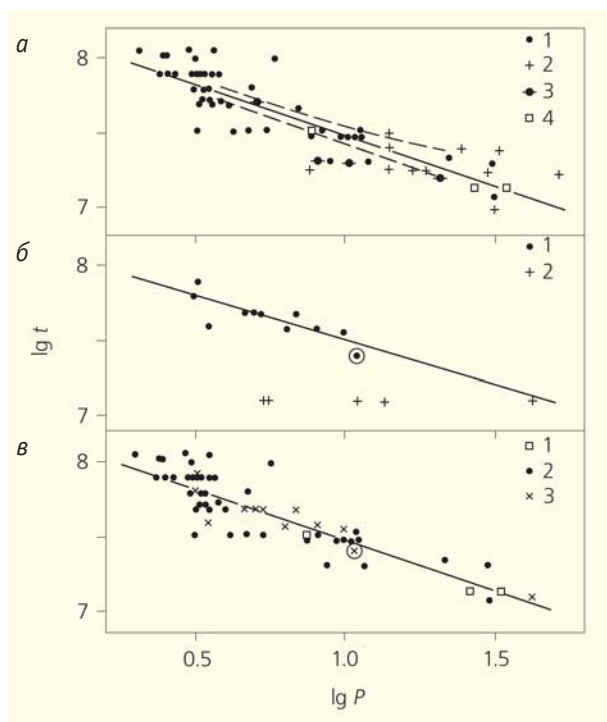


Башня 70-сантиметрового телескопа-рефлектора АЗТ-2 Московской обсерватории на Воробьевых горах.



Образец фотометрических разрезов компонентов  $\text{CE Кассиопеи}$  на пластинках АЗТ-2 в разных спектральных интервалах. Расстояние между компонентами составляет  $2.3''$ ; в кассегреновском фокусе АЗТ-2 оно эквивалентно 1.3 мм. Видно, что отверстие диафрагмы ирис-фотометра (красная линия) собирает свет только одного компонента.

пульсаций и возрастом цефеид. Сейчас, когда теория звездной эволюции достаточно развита и блестяще согласуется с наблюдениями звезд и звездных скоплений, наличие такой связи кажется совершенно очевидным. Действительно, эволюционные треки звезд спектрального класса В (а именно они являются «прародителями» цефе-



Зависимость «период—возраст» для цефеид (Ефремов, 1964–2003). По оси ординат — логарифм возраста скоплений, содержащих цефеиды; по оси абсцисс — логарифм периода (выраженного в сутках). Показаны отдельно данные для Магелланова Облака (а: 1, 2, 3) и галактики М31 (а: 4) и нашей Галактики (б: 1, 2), а также объединенный график (в); 1 — кластеры, 2 — ассоциации; 3 — цефеиды, период которых оценен по зависимости период—светимость.

ид) пересекают полосу неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга—Рассела на разных уровнях светимости: чем массивнее звезда-прародитель, тем больше ее светимость на стадии цефеид и одновременно больше период пульсаций. В свою очередь, время жизни звезд на главной последовательности уменьшается с ростом их массы, поэтому массивные звезды в среднем моложе.

На первой диаграмме период—возраст, построенной Ю.Н. по данным о возрастах рассеянных скоплений, содержащих цефеиды (а возраст скопления можно оценить, например, по цвету и блеску самых ярких звезд главной последовательности), было всего 12 цефеид. Но позднее, в конце 1970-х годов, результат полностью подтвердился, когда Ю.Н. использовал уверенные данные уже о 64 цефеидах Млечного Пути, Туманности Андромеды, Большого и Малого Магеллановых Облаков. Ю.Н. показал, что чем больше период пульсаций цефеиды, тем меньше ее возраст. Согласно этой зависимости, возраст всех цефеид заключен в пределах 30–100 млн лет. Если учесть, что возраст самых старых звезд диска Галактики составляет примерно 10 млрд лет, становится ясно, что цефеиды — очень молодые астрономические объекты.

Как и всякая надежно установленная эмпирическая закономерность, отражающая реальные закономерности и полностью соответствующая современной теории звездной эволюции, выведенная Ю.Н. зависимость период—возраст имеет самостоятельную ценность. Она позволяет оценивать возрасты одиночных цефеид и (с привлечением данных об их пространственном распределении в галактиках) изучать историю звездообразования. Наряду с рассеянными скоплениями цефеиды, таким образом, оказываются уникальными объектами, задающими временную шкалу событий в галактиках. В частности, Ю.Н. обнаружил, что поперек спиральных рукавов Галактики периоды цефеид систематически меняются. Другими словами, это означает наличие градиента возрастов, т.е. стратификацию звезд разного возраста. Если трактовать спиральные рукава как волновые образования, направление градиента возрастов (от внутренней кромки рукава к внешней или наоборот) может дать нам информацию о разности скоростей вращения всего спирального узора и диска Галактики. Та кромка спирального рукава, где периоды цефеид больше (а цефеиды, соответственно, моложе), «набегает» на газово-пылевой слой, и в результате ударная волна стимулирует массовое рождение звезд, включая массивные цефеиды, вблизи этой кромки рукава. Отметим, что надежные данные о градиенте возрастов исключительно важны для теории спиральной структуры, где ставится вопрос о положении области коротации (синхронного вращения диска Галактики и спирального узора). По-видимому, зона коротации должна располагаться между областями рукавов с противоположным направлением градиента возрастов звезд.

Ю.Н. указывал, что «цефеиды дают уникальную возможность увидеть воочию эволюционные изменения характеристик звезд» и проверить выводы теории звездной эволюции. Речь идет здесь, конечно, о «нормальной» эволюции звезды в расцвете ее жизненных сил; взрывы сверхновых звезд — тоже результат эволюции, но это ее итог и конец жизненного пути. Период цефеиды медленно меняется, когда ее эволюционный трек пересекает так называемую полосу неустойчивости на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, населенную преимущественно пульсирующими звездами. Замечательно, что этот эффект удастся напрямую обнаружить по высокоточным измерениям блеска даже на сравнительно коротком по астрономическим меркам промежутке времени, за десятилетия. Это и было сделано Бердниковым, который собрал огромный массив собственных наблюдений многих сотен цефеид и дополнил его «историческими» кривыми блеска, построенными на основе фотографических наблюдений на астрономических инструментах разных стран. Важную роль в этом исследовании сыграли фотопластинки Гарвардской обсерватории США, благодаря которым для

ряда цефеид удалось проследить изменения периодов пульсаций на протяжении полутора веков!

## Не цефеида, а рентгеновский прогрев

В 1971 г., на самой заре рентгеновской астрономии, с борта первого специализированного орбитального рентгеновского аппарата Uhuru (что на языке суахили значит «свобода») был открыт ныне знаменитый рентгеновский источник Her X-1 (в созвездии Геркулес). Это был рентгеновский пульсар с периодом 1.24 с; у него имелся еще и более продолжительный период 1.7 сут. В 1972 г. в ГАИШ источник Her X-1 отождествили с неправильной (каковой она считалась) оптической переменной звездой HZ Her. Слово «отождествление» не надо понимать буквально — что оптическая звезда и есть рентгеновский источник. Шкловский сразу сказал Ефремову, что, раз эта звезда классифицируется как неправильная переменная, она не может быть рентгеновским источником.

Ю.Н. вспоминает: «Это ведь он [Шкловский] «виноват» в том, что Николай Ефимович Курочкин, а не я, оценил переменность HZ Her на наших пластинках. Мне казалось, что не стоит оценивать блеск звезды, которая не может быть рентгеновским источником. Однако Коля [Курочкин] принес мне кривую блеска, которую он построил с периодом Her X-1, со словами — смотрите, это цефеида. Построение сводной кривой с рентгеновским периодом доказало правильность отождествления! Вроде бы и впрямь характерная кривая цефеиды с более крутой восходящей ветвью — но я сразу сказал Курочкину, что это рентгеновский нагрев оптического компонента горячим спутником. Он настаивал — типичная цефеида».

Известно, что Ю.Н. очень любит цефеиды, здесь он классик и корифей. Но любовь любовью, а истина дороже. Он верно угадал, что рентгеновский источник Her X-1 и HZ Her — не одна звезда, а две. Они составляют тесную двойную звездную систему, одним компонентом которой служит рентгеновский пульсар, а другим — оптическая звезда. Общий для рентгена и оптики период источника — это орбитальный период двойной системы. Оптическая звезда — не цефеида, поскольку ее периодическая переменность возникает из-за того, что обращенная к пульсару сторона звезды нагревается его рентгеновским излучением и потому светит ярче, чем холодная противоположная сторона.

А тогдашний спор Юрия Николаевича и Николая Ефимовича быстро разрешил Анатолий Михайлович Черепашук, эксперт по тесным двойным звездам, — в пользу Ю.Н. В результате горячих коллективных обсуждений, в которых участвовали также выдающиеся теоретики Р.А.Сюняев и Н.И.Шакура, родилась совместная работа 1972 года (IBVS. №720. С.1), ставшая вскоре классической.

## Звездные комплексы

В различных спиральных галактиках — и близких, и весьма удаленных — давно уже были замечены гигантские звездные облака, выстраивающиеся вдоль спиральных рукавов. Их было принято считать случайными конгломератами звезд, никак не связанных друг с другом, т.е. чем-то вроде созвездий на ночном небе. Поэтому ими никто глубоко не интересовался до середины 1970-х годов, когда Ю.Н. доказал, вопреки общему мнению, что на самом деле звездные облака — реальные физические системы. В них имеются и отдельные звезды, и звездные скопления, и ассоциации, объединенные общим происхождением и общей судьбой. По предложению Ю.Н. эти сложные газозвездные структуры стали теперь называть звездными комплексами. Звездные комплексы — весьма распространенные, можно сказать, универсальные по своим наблюдаемым свойствам объекты Вселенной. Они имеются в немалом числе и в нашем Млечном Пути, и в Туманности Андромеды, и в большинстве галактик, обладающих спиральным узором.

Звездные комплексы в Галактике были первоначально обнаружены по данным о столь любимых Ефремовым цефеидах. Здесь ему пригодились в первую очередь сведения о пространственном распределении цефеид. Благодаря зависимости «период—светимость» Ю.Н. достаточно уверенно определил расстояния до комплексов и их действительные размеры. Оказалось, что в поперечнике они достигают примерно одного килопарсека. А открытая им ранее зависимость «период—возраст» помогла установить, что типичный возраст комплексов составляет примерно 100 млн лет, так что они представляют собой сравнительно молодые объекты, которые возникают в процессе коллективного звездообразования, охватывающего объем пространства с характерным размером порядка одного килопарсека. В действительности это самые крупные области звездообразования во Вселенной, в которых формирующиеся и эволюционирующие звезды оказываются генетически связанными.

Концепция звездных комплексов как наибольшей и универсальной ячейки звездообразования получила к настоящему времени широкое международное признание и нашла дальнейшее развитие в работах ведущих астрономов и астрофизиков разных стран. Среди тех, кто активно ее разрабатывает, — американский теоретик Брюс Эльмегрин; его особенно интересовал космогонический аспект концепции. Ключевой пункт его теории — гравитационная неустойчивость гигантских газовых облаков с массами до 10 млн солнечных. Такие облака действительно наблюдаются в газовых дисках некоторых галактик. В космогонической картине Эльмегрин они служат исходным материалом для образования звездных





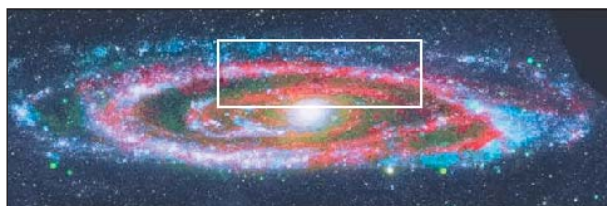
Яркий звездный комплекс в спиральной галактике Водоворот (M51): слева на снимке с низким разрешением (указан стрелкой), справа — изображение с космического телескопа «Хаббл». Справа от комплекса — группы компактных звездных скоплений.

комплексов. По мысли Ефремова и Эльмегрена, особая роль в этом процессе принадлежит турбулентности: крупномасштабные вихри удерживают облако от свободного коллапса, а сверхзвуковые вихри меньших масштабов стимулируют в нем быстрое и эффективное коллективное звездообразование.

На этом пути возникает множество новых интереснейших наблюдательных и теоретических задач. Например, предметом астрономических исследований становится гидродинамический

феномен перемежаемости, т.е. чередования ячеек ламинарных и турбулентных течений в газовой-пылевом облаке-протокомплексе. Не исключено, что именно с этим нелинейным (и все еще слабо изученным в физике) свойством турбулентности связаны различия в темпах звездообразования в разных частях облака на разных этапах его эволюции.

Как заметил Ю.Н., иногда комплексы располагаются вдоль спирального рукава галактики в виде цепочки с почти одинаковыми расстояниями между комплексами — и самый яркий такой случай он обнаружил в 2008 г. в одном из рукавов галактики Андромеды. Интересно, что именно в этом рукаве наблюдается регулярное вдоль рукава магнитное поле. Возникло естественное предположение, что за такую структуру ответственна магнитогравитационная неустойчивость, развивающаяся вдоль рукава. Однако сильная спиральная ударная волна способна разрушить регулярность поля; вероятно, стимулированное такой волной активное звездообразование ведет к появлению многих областей III, «запутывающих» поле. В статье, опубликованной в 2010 г. в *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (T.405, C.1551), Ю.Н. отмечает, что такая картина наблюдается именно в том отрезке рукава M31, где он еще в 1975 г. обнаружил градиент возраста цефеид (а позднее и вообще звезд высокой светимости) поперек рукава — феномен, предсказанный теорией рукавов как волн плотности. В таких участках рукава регулярных цепочек комплексов быть не должно, что и показали наблюдения.



Регулярная цепочка звездных комплексов в одном из рукавов галактики Андромеды. Синим цветом окрашены молодые звезды (изображение в УФ-диапазоне), красным (изображение в ИК-диапазоне) — теплая пыль, соответствующая распределению нейтрального водорода.

## В защиту науки

«Агрессивная лженаука наступает. Масштабы явления растут с каждым годом, это уже не отдельные сочинения отдельных фантазеров, это системные учения, хорошо организованные, имеющие свои «академии» и регулярные конференции, зачастую получающие государственную поддержку», — это цитата из недавней статьи Ю.Н. в защиту науки и против лженауки. О себе Ю.Н. говорит: непримирим к врагам науки. На его счету в этой борьбе — разоблачение «новой хронологии» академика-математика А.Т.Фоменко. От этой лжехронологии, якобы основанной на астрономических данных, после работ Ю.Н. с соавторами не осталось камня на камне. Им в работах с Е.Д.Павловской и А.К.Дамбисом была реализована идея, выдвинутая Ю.А.Завенягиным еще в 1980-х годах: используя современные данные о собственных движениях звезд (скоростях и направлениях их медленных перемещений по небесной сфере), найти дату того их взаимного положения, которое максимально близко к положениям, приведенным в «Альмагесте» Клавдия Птолемея. Сразу же стало ясно, что датировать каталог X веком, как это сделал Фоменко, абсолютно невозможно, а в 2000 г. Дамбис и Ефремов доказали, что координаты большинства звезд были определены в эпоху Гиппарха. Так была решена проблема, которую астрономы и историки обсуждали веками. Остается, однако, загадкой, почему Птолемей прямо не сослался на своего предшественника.

Ефремов — действительно из числа самых непримиримых ученых, членов известной Комиссии РАН по борьбе с лженаукой. Дело не ограничивается старым казусом Фоменко или новыми аферами «выдающегося нанотехнолога» В.И.Петрика. Речь идет о ключевых вопросах — о жизни и судьбе отечественной науки и, следовательно, как подчеркивает Ю.Н., о судьбе страны. Ограничимся здесь краткими отрывками из публицистики Ефремова (Уроки 1941 года // Бюллетень «В защиту науки». 2011. №9. С.60).

«Давно уже в России государство наукой интересуется, лишь когда она обещает немедленную пользу (на чем и играют лжеученые). Но плоды науки медленно зреют — а их семена порождает фундаментальная наука — та самая, финансирование которой, по мнению некоторых наших парламентариев, равносильно отапливанию атмосферы». «У нас, впервые в мировой истории, класс ученых

стал в ряды наименее оплачиваемых пролетариев!» И наконец: «Стране, которая не кормит свою науку, может быть, придется кормить чужую армию». Это высказывание принадлежит, кажется, не Ефремову — но приведено было очень кстати...

## Астрономия как лидер естествознания

Вернемся, однако, к астрономии. Она почти уже сравнивалась с физикой — не только по грандиозности используемых в астрономии инструментов, но прежде всего по глубине, масштабу и фундаментальности ее нынешних проблем. Астрономия XXI века — это разветвленная наука, охватывающая все, что мы видим на небе, от метеоров и комет до галактик, квазаров и Вселенной как целого. Особенно впечатляющи недавние успехи астрономов в наблюдательной космологии: открытие темной материи и темной энергии вакуума, на которые приходится 95% всей плотности массы-энергии видимой Вселенной. Природа и микроскопическая структура этих новых форм космической энергии — самая острая проблема современной физики и астрономии.

Замечена почти линейная эмпирическая зависимость: чем тяжелее астрономический объект, тем непонятней его физическая природа. У физиков наоборот — больше всего загадок с минимальными массами и расстояниями (как давно уже известно, легчайшие из лептонов неисчерпаемы). В наши дни все самое сложное в астрономии приходит в теснейшее объединение с самым сложным в физике: Вселенная как целое и элементарные частицы становятся единым предметом изучения в невиданной ранее области естествознания, сверхнауке будущего, у которой нет еще общепринятого названия, хотя ее часто называют космомикрoфизикой. Какова здесь роль астрономов, каков их долеой вклад в это предприятие? Ответим на вопрос словами Ю.Н. из книги, цитированной в первых строках нашей статьи: к началу нового века астрономы «доказали, что физика занималась лишь несколькими процентами содержания Вселенной, — и они же дали уникальные ограничения на природу темной материи и плотность вакуума, что физика, а точнее, негравитационная физика, в принципе бессильна сделать. Кто может теперь усомниться, что астрономия снова, как во времена Галилея и Ньютона, становится лидером естествознания?». ■



Последний выпуск бюллетеня.

# Прогноз землетрясений

## Почему молчат ученые?

Мы научились успешно «прогнозировать» прошедшие землетрясения.

Академик М.А.Садовский

Выступление на открытии Всесоюзного совещания «Современные сейсмодислокации и их значение для сейсмического микрорайонирования»

Москва, 25 января 1972 г.

Р.М.Семенов, В.В.Кашковский, М.Н.Лопатин

«О т же ж собаки!.. Што вытворяют. Што они только вытворяют! И не спится им! Та-ак. А ведь знают ученые и молчат. Не хотят расстраивать народ. А чего бы ни сказать? Может, все вместе-то и придумали бы. Нет, сговорились и молчат. Волнение, мол, начнется».

Так Андрей Ерин — герой рассказа В.М.Шукшина «Микроскоп» — выражал свое негодование по поводу бездействия ученых относительно уничтожения микробов. Несмотря на то что наука о землетрясениях далека от микробиологии, в адрес ученых-сейсмологов тоже нередко слышатся упреки: «Куда смотрят ученые, почему не предупредили? Знали же, что землетрясение готовится! Не хотят расстраивать народ?»

Что удивительно, упреки эти небезосновательны. Печальным примером может служить разрушительное Таншаньское землетрясение 1976 г. в Китае (рис.1), в результате которого погибло более полумиллиона человек, хотя предвестников надвигающейся катастрофы было достаточно. А годом ранее северо-восточнее Таншаня произошло сильное землетрясение, которое разрушило г.Хайчэн и близлежащие предместья. Однако жертв среди населения оказалось сравнительно немного благодаря прогнозу события и своевременной эвакуации людей.



**Рудольф Михайлович Семенов**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Института земной коры СО РАН, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения. Занимается проблемами оценки сейсмической опасности, сейсмического районирования и поиском предвестников землетрясений. Неоднократно публиковался в «Природе».



**Виктор Владимирович Кашковский**, доктор технических наук, профессор того же университета. Область научных интересов — безопасность на транспорте, математическая статистика и статистическое моделирование.



**Максим Николаевич Лопатин**, инженер по охране окружающей среды ФГУП «Уран-геологоразведка. Байкальский филиал «Сосновгеология» (г.Иркутск). Специалист по радиационной экологии.

**Ключевые слова:** Южное Прибайкалье, растворенный гелий, коэффициенты корреляции, интегрированные индикаторные функции, предвестники землетрясений.  
**Key words:** Southern Baikal, dissolved helium, correlation coefficients, integrated indicator function, earthquake forecasts.

© Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н., 2017



Хотя оба землетрясения случились более 40 лет назад, интерес к ним не пропадает до сегодняшнего дня.

### Хайчэнское землетрясение

Событие произошло 4 февраля 1975 г. в 19 ч 36 мин по местному времени в южной части провинции Ляонин Северо-Восточного Китая [1]. Его магнитуда составила 7.3, глубина очага — 12 км, интенсивность сотрясений в эпицентре (в районе Хайчэна) достигала 9 баллов по 12-балльной шкале [2]. Оно оказалось самым сильным из всех зарегистрированных событий в исторических летописях в этой провинции, а также самым крупным неглубоким землетрясением в Северо-Восточном Китае. Основной толчок предварялся серией форшоков и сопровождался большим количеством повторных толчков — афтершоков.

При землетрясении на поверхности земли возникли многочисленные трещины, ямы-провалы и грифоны, из которых фонтанировала вода с песком. Ее температура достигала 40°C, что в холодных зимних условиях вызвало образование густого тумана, стелившегося по поверхности.

Сильные разрушения и человеческие жертвы отмечались в Хайчэне и его пригородах. Частично разрушились старые дома в г.Инкоу, находившемся в 8-балльной зоне. В 7- и 8-балльных зонах имелись раненые и погибшие при обвалах стен и крыш зданий. Были повреждены автомобильные и железнодорожные мосты.

Комплексные исследования по прогнозу Хайчэнского землетрясения начались еще в 1970 г. В этом районе проходит сейсмический пояс Таньчэн-Инкоу (рис.2), приуроченный к известному глубинному разлому Таньчэн-Лудзян (Танлу) — аналогу разлома Сан-Андреас в Калифорнии, на западе США [4, 5]. С разломом Танлу связаны многочисленные сильные землетрясения с магнитудами до 8.5 [6]. К 70-м годам наметилась миграция значительных сейсмических событий на территорию провинции Ляонин.

Учитывая высокую плотность населения и развитую сеть промышленных предприятий, национальная конференция по сейсмологии, проведенная в 1970 г., приняла решение внести эту провинцию в программу по прогнозу землетрясений. Исследования проводились под девизом: «Готовность не принесет вреда!».

Группа сейсмологов должна была разработать методики прогноза и наблюдать за предвестниками землетрясений, которые подразделялись на микро- и макро. Микропредвестники изучались



Рис.1. Последствия Таншаньского землетрясения 1976 г.



Рис.2. Карта эпицентров землетрясений Северо-Восточного Китая [3]. М — эпицентры землетрясений с магнитудой: а — >8.0, б — 7.0–7.9, в — 6.0–6.9, г — <6.0 (цифры у кружка — дата землетрясения и его магнитуда); 1 — активные в кайнозой разломы: а — зона разлома Танлу, б — прочие разломы; 2 — граница провинции Ляонин.

с помощью приборов, а сведения о макропредвестниках основывались на наблюдениях за поведением животных, уровнем воды в водоемах, дебитом источников, атмосферными явлениями и др.

## Микропредвестники

**Сейсмологические данные.** Сейсмическая активность провинции в 1972–1973 гг. была сравнительно слабой. С 1974 г. ее уровень заметно повысился. Сначала активизация отмечалась лишь вдоль разлома Таньчэн-Инкоу, а перед Хайчэнским землетрясением распространилась и на другие районы. Резкое увеличение сейсмической активности началось за три дня до основного толчка, а за 6 ч до события частота слабых толчков достигла максимального значения. Основное их количество сосредоточилось в районе эпицентра. К моменту же начала число форшоков резко упало и наступило кратковременное сейсмическое затишье.

Проводилось изучение и скоростей сейсмических волн. Перед землетрясением в течение четырех лет до основного толчка отношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн были относительно низкими, и лишь к концу марта 1974 г. они повысились до нормальной величины. Спустя 10 мес произошло Хайчэнское землетрясение.

**Деформации земной поверхности** исследовались с помощью нивелирования. Станция наблюдения Цзиньсян располагалась в 196 км юго-западнее эпицентра Хайчэнского землетрясения. Линию измерения проложили в 1970 г., а с августа 1973 г. стали обнаруживаться колебания высот поверхности земли, не превышавшие 2,5 см. В день Хайчэнского землетрясения никаких внезапных изменений не отмечалось. Аналогичные явления фиксировались и в других частях Ляодунского п-ова, южнее и юго-восточнее эпицентра.

Для изучения деформаций земной поверхности также использовались наклонометры с горизонтальным маятником. Изменения наклонов перед Хайчэнским землетрясением отмечались в Шэньяне, Цзиньчжоу, Паньцзине, Инкоу и других местах во всех направлениях от эпицентра. В районе г.Ляоян (на расстоянии 64 км от Шэньяна) 22 декабря 1974 г. произошло землетрясение с  $M = 4.8$ . После того как афтершоки закончились, направление наклона с господствовавшего юго-восточного изменилось на северо-западное. 13 января 1975 г. вектор наклона развернулся к юго-востоку, а 15-го началось обратное изменение с увеличением скорости. Наконец 1 февраля 1975 г. земная поверхность внезапно наклонилась к юго-западу, в сторону эпицентра, и перед землетрясением величина наклона резко возросла.

**Содержание радона в воде.** Положительные и отрицательные аномалии содержания радона

в колодезной воде в Шэньяне, Синчэне, Паньцзине, Танганцзы, Сюнюэчене, Цзиньсяне, Дандуне и других населенных пунктах начали проявляться за год до землетрясения — уже в январе-феврале 1974 г. и, особенно, в течение 10–20 дней до события. Перед главным толчком отмечалось резкое изменение содержания радона в колодце в г.Паньцзине (в 90 км от эпицентра). За 4–6 ч до толчка был зарегистрирован всплеск изменений концентрации в г.Танхэяне, а за полчаса до землетрясения содержание радона резко возросло. Интересно, что изменение концентрации радона за несколько часов до землетрясения обнаружили в провинции Хэбэй, в 500 км от эпицентра.

**Сила тяжести и напряжения в земной коре.** Определения силы тяжести проводились по линии Байчжэнь—Паньшань—Чжуанхэ несколько раз, как до землетрясения, так и после. В эпицентральной зоне сила тяжести перед землетрясением понижалась, а после — повышалась и возвращалась к исходному значению.

Изменения напряжений в земной коре наблюдались в Шэньяне, Цзиньчжоу, Дапяне, Кайюане, Таншане, Аньцю. Аномалии индуктивности начали обнаруживаться в Шэньяне раньше других аномалий и продолжались в течение 300 дней (с января до конца ноября 1974 г.). На станциях наблюдений в Цзиньчжоу и Таншане за 1,5 ч до землетрясения фиксировались внезапные изменения напряжений, которые к моменту подземного толчка исчезли.

**Земные токи.** Аномальные отклонения удельного электрического сопротивления в земной коре регистрировались уже в начале 1973 г. на сейсмостанции в Паньцзине. Резкие изменения естественного электрического потенциала перед приближающимся землетрясением отмечались в Хайчэне, Инкоу, Хучжуане, Бэнси.

На сейсмической станции Хайчэн 22 декабря 1974 г. за 5–10 ч до Ляоянского землетрясения с  $M = 4.8$  регистрировались сигналы трех сравнительно сильных импульсов. За 5 ч до Хайчэнского события в колебаниях земных токов возникли подряд шесть сильных скачков, которые были восприняты как краткосрочные предвестники землетрясения.

Таким образом, предвестники землетрясения в районе наблюдались, однако уверенно наметить по ним время подземного толчка было практически невозможно. Тем не менее они служат важнейшими свидетельствами зарождения землетрясения [7].

## Макропредвестники

**Поведение пресмыкающихся, животных, птиц, рыб.** Несмотря на довольно сильные морозы за 2 мес до события из нор на поверхность вылезли змеи (и погибли от холода). Домашние животные (собаки, кошки, коровы, лошади, сви-

нии, овцы и др.) перед землетрясением перестали принимать пищу, вели себя крайне беспокойно и агрессивно. За 1.5 мес. до подземного толчка появилось множество крыс. Гуси, куры, голуби обнаруживали сильное беспокойство, взлетая и садясь на деревья, дома, склоны холмов. Голуби улетели с насиженных мест и вернулись только после землетрясения. Рыбы накануне землетрясения плавали у поверхности, а за час до события стали выпрыгивать из воды.

**Подземные воды.** За 2 мес до события начал изменяться уровень воды в колодцах, отмечались водовороты, пузыри, помутнение, повышение температуры, изменение запаха, выбросы и фонтанирование воды. В одних местах появлялись новые источники, в других же они исчезали. Подземные воды начали мигрировать в направлении к Хайчэну. С 1 по 4 февраля 1975 г. неожиданно стала происходить их «обратная миграция» — от эпицентра во все стороны. Жесткость и химический состав воды также изменялись.

**Метеоусловия.** За несколько дней до землетрясения в эпицентральной зоне отмечалось повышение температуры воздуха и понижение атмосферного давления, которые достигли максимальных значений 4 февраля. Во многих районах появился стелющийся по поверхности густой плотный туман, который после события быстро рассеялся. Во время землетрясения на территории провинции Ляонин (от Даньдун на востоке до Таншаня на западе и от Шэньяня на севере до Цзиньчжоу на юге) наблюдалось земное свечение. Языки белого пламени вспыхивали из сейсмогенных трещин. На небе появились разноцветные радуги и огненные шары, которые после события постепенно исчезли. За 2 мин до толчка и во время землетрясения в эпицентральной зоне слышался подземный гул.

Итак, на основании вышеприведенных данных было предсказано Хайчэнское землетрясение. За 4 ч до главного толчка большую часть населения эвакуировали из эпицентральной зоны. Благодаря этому при значительных разрушениях жилых домов и общественных зданий число жертв оказалось небольшим.

Однако, несмотря на то что Хайчэнское землетрясение удалось спрогнозировать, осталось много неясного. Не случайно же следовавшее через год Таншаньское землетрясение предсказать не получилось, хотя предвестники наблюдались и перед ним.

Китайские сейсмологи предполагали, что магнитуда землетрясения на юге провинции Ляонин должна составить 5.0–6.0. Но эта оценка ничем не обосновывалась. Хотя, если исходить из максимальных возможных землетрясений в зоне разлома Танлу, магнитуду будущего события можно было оценить гораздо выше. Ранее здесь случались землетрясения с  $M > 7.0$ , а в XVII в. севернее Таньчэна произошло землетрясение с  $M = 8.5$ , унесшее полмиллиона человеческих жизней [4].

Местоположение эпицентра Хайчэнского землетрясения локализовали всего примерно за 2 мес до основного толчка. В течение же нескольких лет высказывались предположения о вероятном сильном событии на юге провинции Ляонин — огромной территории с радиусом около 200 км.

Наконец, время возникновения землетрясения предсказывалось несколько раз. Объявлялись тревоги (как впоследствии выяснялось — ложные), и даже проводились эвакуации. Лишь за 2 ч до основного толчка эвакуация оказалась оправданной, причем эту тревогу могли объявить и раньше, и позже. Не было полной гарантии в определении времени возникновения землетрясения. Некоторые жители, разуверившись в прогнозах, возвращались в покинутые дома, и впоследствии многие из них погибли под развалами.

Нисколько не преуменьшая успех китайских специалистов в предсказании Хайчэнского землетрясения, можно отметить, что в большей степени это счастливая случайность. При анализе различных явлений, предвещающих уже произошедшие сильные землетрясения, видно, что далеко не всегда удается выделить предвестники, по которым с уверенностью можно осуществить прогноз [8].

Множество сверхсрочных предвестников (поведение млекопитающих, пресмыкающихся и рыб, атмосферные явления и др.) спасли не один десяток человеческих жизней. Люди при первых же признаках надвигающегося мощного толчка покидали свои дома. Вот где пригодились принцип «Готовность не повредит»!

## Проблемы прогноза землетрясений

Прогноз землетрясений, как известно, делится на долго-, средне- и краткосрочный. Долгосрочный прогнозирует место, максимальную магнитуду и время возникновения события в ближайшие десятилетия и сотни лет. Место возможных очагов в общих чертах определяется на основе изучения геолого-тектонических особенностей и новейшей тектоники территорий. Предельная магнитуда рассчитывается по целому комплексу данных: по магнитуде когда-то уже происшедшего здесь максимального сейсмического события (в том числе с использованием палеосейсмогеологических данных), по объемам сейсмогенерирующих блоков и протяженности сейсмогенных зон, по размерам сейсмических пятен, по величине градиентов скоростей новейших тектонических движений (с учетом протяженности градиентных зон) и др.

Время возникновения таких событий устанавливается как на основе их повторяемости в прошлом, так и путем построения графиков повторяемости с учетом экстраполяции их в область сильных землетрясений. Кроме того, оно зависит от скорости тектонических движений по



разлому и от размера зоны вспарывания при землетрясении [8].

Среднесрочный прогноз, предполагающий возникновение землетрясения через несколько месяцев или лет, основывается на разнообразных микро- и макропредвестниках. Место возможного эпицентра в этом случае устанавливается по локализации предвестников, а максимально возможная магнитуда — по времени и площади их проявления.

Наконец, краткосрочный прогноз базируется как на основе различных инструментальных данных, так и на выделении макропредвестников. Время возникновения подземного толчка в этом случае определяется несколькими часами или сутками.

Наиболее ответственный (и трудно осуществляемый) — краткосрочный прогноз. На его основе нужно принимать решение об остановке промышленных предприятий и эвакуации людей. Сложность многочисленных предвестников заключается в их мигрирующем характере и интерпретации [9]. Объявлять тревогу о приближающемся землетрясении в г.Таншане не решились. Эвакуация населения из более чем миллионного города с остановкой промышленности — дело чрезвычайно дорогостоящее, и пойти на него можно лишь при высокой степени уверенности во времени возникновения землетрясения, иначе ущерб от предсказания события превзойдет ущерб от самого события [8].

Приведенный выше комплекс предвестников Хайчэнского землетрясения показывает, что одни из них накануне толчка изменялись в сторону повышения, другие же — в сторону понижения относительно фоновых значений. В одних случаях момент землетрясения совпал с интенсивным изменением каких-либо полей, в других — с достижением ими своего максимума и началом спада (см. рис.3–5). Объясняется это, по-видимому, тем, что различные аномалии, зависящие от напряжений в горных массах, проявляются в разное время независимо (или лишь в косвенной зависимости) от момента наступления сейсмогенной подвижки и могут происходить не только в центральной зоне, но и по всему напряженному объему земной коры (под площадью от сотен квадратных километров при умеренных землетрясениях до сотен тысяч квадратных километров при сейсмических катастрофах) [10].

Кроме того, одни и те же предвестники перед различными землетрясениями ведут себя по-разному. Так, один из основных предвестников катастрофического Хайчэнского землетрясения — появление различных многочисленных форшоков. Несмотря на то что они предвещали и другие сильные землетрясения, есть и противоположные данные. Например, перед разрушительным ( $M = 7.8$ ) Таншаньским землетрясением, эпицентр которого располагался в 400 км к юго-западу от

Хайчэнского события, форшоки не фиксировались, а задолго до сильного землетрясения в Такахиоки 1968 г. (Япония) сейсмическая активность в его эпицентральной области вообще уменьшилась [11].

В качестве одного из предвестников Хайчэнского события китайские сейсмологи рассматривали изменение скоростей сейсмических волн в эпицентральной зоне перед землетрясением. Но уже после него, когда появилось много данных о скоростях сейсмических волн от взрывов, выяснилось, что больших изменений при землетрясениях не происходит [8], и они вряд ли могут служить надежным признаком.

По мнению японского геофизика Т.Рикитакэ, данные о деформациях земной коры также не могут определенно указывать на время возникновения сейсмических событий.

Поведение многих предвестников обусловлено моделями и механизмами очагов землетрясений, геолого-тектоническими особенностями эпицентральных зон и др. То, что удастся прогнозировать в лабораторных условиях на моделях разрушения горных пород или предсказывать моменты возникновения землетрясений на прогностических полигонах, далеко не всегда повторяется в различных по геолого-тектоническим особенностям сейсмоактивных регионах Земли.

Характер появления предвестников для каждого землетрясения индивидуален [8]. Он определяется конфигурацией сейсмогенных разломов, степенью неоднородности в распределении прочности по плоскости разрыва и типу скольжения. Предвестники сильно меняются от района к району. Они могут повторяться, но далеко не всегда и лишь на одном и том же разломе. Предыдущее событие в определенном месте следует рассматривать как важнейшее указание на то, можно ли ожидать там появление предвестников, и каких именно. Никакая информация о землетрясениях в других районах, особенно в районах с другим тектоническим строением, не окажет большой помощи в выявлении предвестников в конкретном изучаемом месте.

Проблем в вопросах прогноза землетрясений более чем достаточно, и все же утверждение Р.Геллера с коллегами *Earthquakes cannot be predicted* («Землетрясения не могут быть предсказаны») [12], на наш взгляд, выглядит излишне пессимистичным.

Как тут не вспомнить слова академика Садовского, сказанные им еще в далеком 1981 г.: «Пока еще мы не можем утверждать, что через месяц или через год предскажем с точностью не только до дня, но и до минуты, где и какой силы произойдет землетрясение. Конечно, ошибки и разочарования неизбежны. Но то, что проблема будет решена в обозримом и ближайшем будущем, сомневаться не приходится» [7].

Именно поэтому ныне существует большое количество рекомендаций по поиску предвестников

возникновения землетрясений. В одних случаях предлагается использовать одновременно как можно больше различных данных, в других же, наоборот, считается, что использование данных «кучей», без отсева, способствует укреплению мнения об отсутствии предвестников землетрясений вообще [13]. Также нет единого суждения по поводу количества пунктов наблюдения за одним конкретным очагом землетрясения. Тем не менее считается, что изучение желательно вести по крайней мере более чем в одном месте [14, 15].

### Поиски предвестников землетрясений в Прибайкалье

Территория Прибайкалья — одна из сейсмически активных в России. Ее высокая сейсмичность преимущественно обусловлена развитием Байкальской рифтовой зоны, в пределах которой ежегодно происходят тысячи подземных толчков. Среди них случаются и сильные, и разрушительные. Естественно, что прогноз землетрясений в этом регионе давно служит предметом исследований специалистов. За прошедшие годы получены определенные результаты в предсказании места и силы события. Однако вопрос времени возникновения землетрясений все еще остается нерешенным. Ответ на него в основном базируется на расчете повторяемости событий. В этом отношении определенным шагом вперед стала недавно опубликованная монография известного иркутского ученого С.И.Шермана, который на основе тектонофизического подхода предложил метод среднесрочного прогноза землетрясений [16].

Кроме того, одними из надежных предвестников времени возникновения землетрясений считаются гидрогеохимические данные, полученные при исследовании растворенных в подземных водах радона и гелия. Они чутко реагируют на изменения напряжений и деформаций в горных породах. Выделению этих газов способствуют ультразвуковые колебания, которые сопровождают подготовку очагов землетрясений [17].

С 2004 г. Институт земной коры СО РАН начал проводить планомерные гидрогеохимические наблюдения за вариациями концентраций растворенного гелия в глубинной воде Байкала. В 2008 г. на юге озера произошло сильное ( $M = 6.3$ ) Култукское землетрясение [18]. Анализируя вариации концентраций растворенного гелия в глубинной байкальской воде, мы смогли выявить средне- и краткосрочный характер этого предвестника [19].

Сначала количество гелия увеличилось относительно его средних значений, затем постепенно уменьшалось, пока за два дня до сейсмического события не опустилось ниже двух среднеквадратичных отклонений от фоновых значений (что характерно для краткосрочных предвестников). Непосредственно перед толчком, во время и после землетрясения концентрация газа вновь достигла высоких значений. Спустя несколько часов после основного толчка (28 августа 2008 г.) она опять установилось на уровне фоновых значений. На рис.3 показано, что за 45 дней до землетрясения содержание гелия в глубинной воде Байкала поднялось до значения 1.2, а затем снизилось до 0.88. Таким образом, за время, предшествующее землетрясению, нормированные пока-

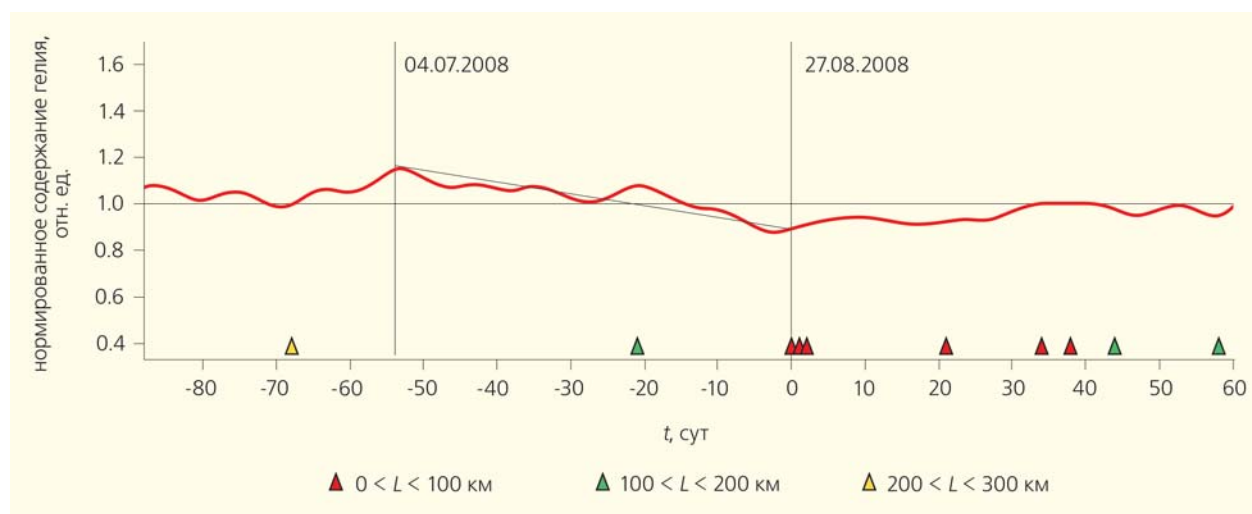


Рис.3. График изменения нормированных показаний содержания гелия в глубинной воде Байкала с 15 июня по 10 ноября 2008 г. Вертикальными линиями отмечены даты 4 июля 2008 г. (начало падения содержаний гелия) и 27 августа 2008 г. (начало Култукского землетрясения с  $M = 6.3$ ). Черная наклонная линия — тренд снижения содержаний гелия за определенное время. По горизонтальной шкале отложено время до землетрясения и после. Цветные треугольники показывают расстояние ( $L$ ) от станции наблюдений до эпицентра землетрясения.

зания содержания гелия в глубинной воде изменились на 0.32 (т.е. на 32%). При этом минимальная концентрация в пробах зафиксирована накануне события. На основании этих данных мы предположили, что длительное понижение концентраций гелия, превысившее два среднеквадратичных отклонения от фоновых значений, и, главное, последующее их резкое кратковременное повышение накануне землетрясения можно рассматривать в качестве средне- и краткосрочного предвестников.

Однако дальнейшие наблюдения показали, что изменение содержания гелия в глубинной воде озера на 20–30% не всегда служат предвестником землетрясения. Подобные отклонения отмечались и позже, но какой-либо сейсмической активности, сопутствующей им, не регистрировалось. В дополнение к такому краткосрочному прогнозу потребовался новый гидрогеохимический метод достоверного среднесрочного прогноза.

Ранее было установлено, что на содержание гелия помимо напряженно-деформированного состояния земной коры влияют и другие факторы. Среди них выделяются «астрономически точные» приливные процессы, «менее точные» сезонные колебания и «весьма случайные» колебания, связанные с изменением погоды [20]. Чтобы отделить случайные изменения концентрации гелия от вызванных подготовкой очага землетрясения, они анализировались не на одном, а на трех пунктах наблюдений: в Листвянке (Л), на Зеленом Мысе (З) и в Иркутске, на К-ГИС (К) (рис.4). Достоверность выделения предвестников при этом значительно возрастает [15]. Особый интерес представляет то, что гелий, измеряемый в Листвянке, получен из глубинной воды Байкала непо-

средственно в районе Обручевского тектонического разлома Байкальской рифтовой зоны, а станция К-ГИС находится уже в платформенной части, в районе влияния Ангарского разлома. Зеленый Мыс же занимает промежуточное положение между ними.

По результатам, полученным за весь период наблюдения, мы вычислили коэффициенты корреляции (расстояние от Листвянки до Зеленого Мыса — 49 км, от Листвянки до К-ГИС — 66 км, от Зеленого Мыса до К-ГИС — 17 км):  $\bar{r}_{Л-З} = 0.12$ ,  $\bar{r}_{Л-К} = 0.03$ ,  $\bar{r}_{З-К} = 0.16$ . Далее мы будем называть эти показатели средними значениями коэффициентов корреляции между соответствующими пунктами.

Анализ вычисленных коэффициентов показал: изменения концентрации гелия в удаленных пунктах слабо связаны между собой. Но четко видна зависимость: чем больше расстояние между станциями наблюдения, тем меньше взаимосвязь между показаниями гелия в них. Таким образом, на основании этих выводов можно утверждать, что случайные факторы, вызывающие изменение содержания гелия в подземных водах, имеют локальный характер и распространяются на весьма ограниченной территории.

Кроме средних значений коэффициентов корреляции мы определили средние значения среднеквадратических отклонений нормированных показаний гелия за весь период наблюдений:  $\bar{\sigma}_Л = 0.12$ ,  $\bar{\sigma}_З = 0.21$ ,  $\bar{\sigma}_К = 0.26$ .

В качестве отправной точки в поиске среднесрочных предвестников используем тот факт, что перед землетрясением уровень подземных вод меняется. Это говорит и об изменении тектонических напряжений в земной коре. Если фиксировать их вариации (например, по показаниям концентрации гелия в подземных водах), можно с большой степенью достоверности прогнозировать время возникновения землетрясения.

Образование гелия в горных породах, вызванное радиоактивным распадом с испусканием альфа-частиц, можно считать постоянной величиной, не зависящей от других внешних факторов. Скорость выделения гелия зависит от микротрещиноватости горных пород, которая и определяет вариации содержания этого газа в подземных водах. Но состояние микротрещин, в свою очередь, зависит от давления в горных породах. На количество гелия в подземных водах влияет даже изменение атмосферного давления [20]. Исходя из этого, три точки из-

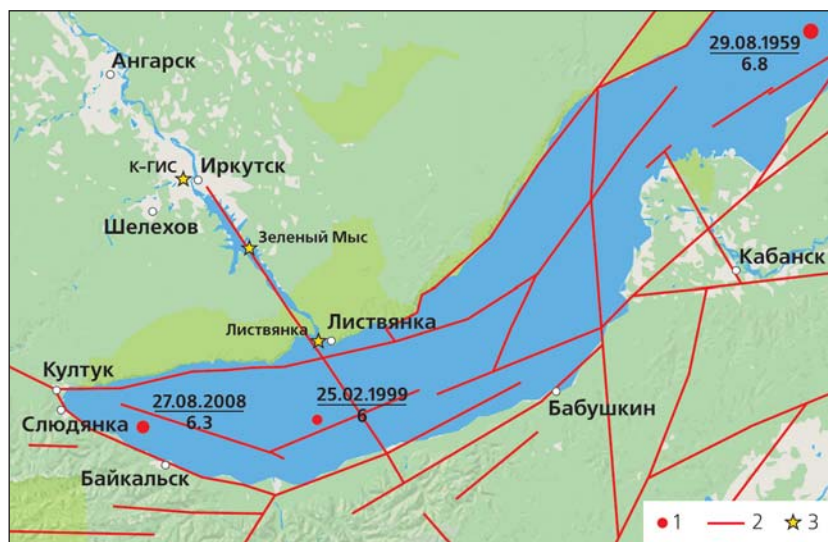


Рис.4. Карта Южного Прибайкалья. 1 — эпицентры землетрясений с  $M \geq 6.0$  за последние 50 лет (с указанием даты и магнитуды события), 2 — активные разломы, 3 — пункты гидрогеохимических наблюдений: Листвянка, Зеленый Мыс, К-ГИС.



меренных концентраций гелия в подземных водах можно представить как своеобразный манометр длиной в 66 км.

Для прогнозирования землетрясений мы предложили использовать парные индикаторные функции, текущие значения которых, с точки зрения математической статистики, подобны текущим значениям коэффициента корреляции за этот же период наблюдения. Отличие заключается в том, что вместо текущих значений нормированных показаний концентраций гелия в подземных водах и их среднеквадратических отклонений здесь используются средние значения этих показателей за весь период наблюдения. Индикаторные функции поэтому зависят не только от взаимосвязи содержаний гелия в разных пунктах, но и от изменения текущих нормированных концентраций гелия в подземных водах и их среднеквадратических отклонений. В отличие от коэффициента корреляции, индикаторные функции могут принимать значение больше единицы и меньше минус единицы.

Физический смысл индикаторных функций заключается в том, что на их текущее значение не влияют локальные помехи, которые изменяют концентрацию гелия в подземных водах в различных местах наблюдения. В то же время вариации давления внутри горных пород, предшествующие землетрясению, распространяются на большие расстояния и затрагивают все станции измерения без исключения. Анализ статистических данных по гелию с 2007 г. по сегодняшний день показал, что изменение значений индикаторных функций представляет собой отражение сейсмических процессов в Южном Прибайкалье. Теоретическое обоснование этого вывода изложено в нашем патенте на изобретение [21].

Здесь мы рассмотрим только практические результаты наблюдений. Прежде всего, были исследованы спектры индикаторных функций  $S_{l-l-3}(f)$ ,  $S_{l-l-k}(f)$  и  $S_{l-3-k}(f)$  для выявления сезонных и приливных циклов. Выяснилось, что в отличие, например, от уровня грунтовых вод, индикаторные функции не имеют сезонных колебаний. Астрономические явления (фазы Луны) также на них не влияют. В то же время в спектре всех трех функций фиксировались стабильные колебания с периодичностью от 6.5 до 8.5 сут. Это оказалось несколько неожиданным, поскольку в спектре концентрации гелия такие колебания отмечались лишь кратковременно (например, перед Култукским землетрясением) (см. рис.3).

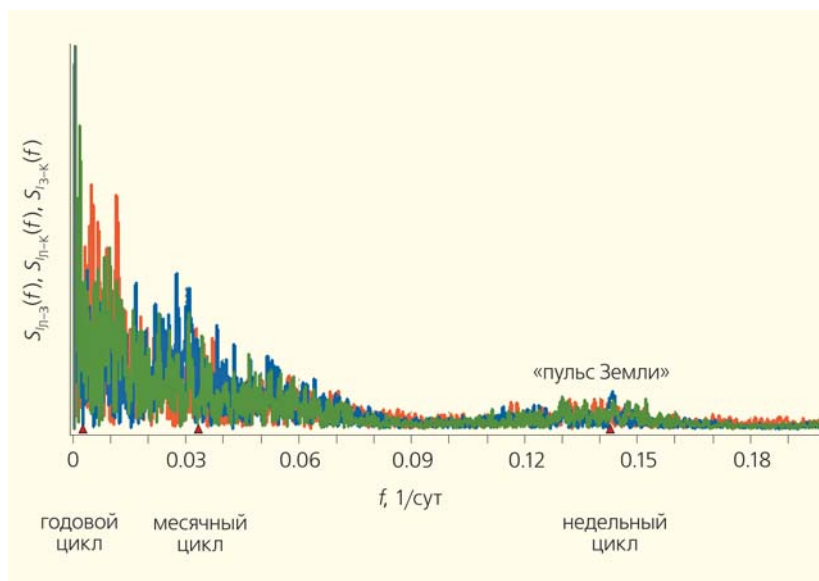


Рис.5. Спектры парных индикаторных функций  $S_{l-l-3}(f)$ ,  $S_{l-l-k}(f)$  и  $S_{l-3-k}(f)$ . Треугольниками на шкале частот обозначены годовой, месячный и недельный циклы.

Можно предположить, что колебания индикаторных функций с периодичностью около одной недели вызваны пульсирующим характером подкорового вещества под рифтовой зоной, которое, в свою очередь, служит первопричиной всех тектонических подвижек. Такие пульсации постоянны, и их можно образно и даже несколько возвышенно назвать «пульсом Земли» (рис.5). Более детальные исследования пульсации подкорового вещества под рифтовой зоной пока не проводились.

Прибайкалье — весьма активная сейсмическая зона. За девять лет наблюдений там накоплен обширный исследовательский материал. На протяжении этого времени индикаторные функции периодически образовывали неповторяющиеся информационные структуры, которые связывались с сейсмическими толчками различной магнитуды. Тем не менее, несмотря на свою неповторимость, эти информационные структуры имеют устойчивые детерминированные зависимости.

Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. разделило показания индикаторных функций на три периода: равновесное состояние земной коры до и после землетрясения, концентрация напряжений земной коры перед землетрясением и переход земной коры в равновесное состояние.

С точки зрения обеспечения достоверного среднесрочного прогноза землетрясений наибольший интерес представляет период напряжений земной коры перед Култукским землетрясением (рис.6). Данную информационную структуру невозможно с чем-либо перепутать даже неспециалисту. За весь период наблюдения ни один другой слабый сейсмический толчок в Байкальском регионе не создал ничего подобного. Такая неповтори-



Рис.6. Парные и интегрированная индикаторные функции в период концентрации напряжений земной коры (72 дня) перед Култукским землетрясением. Вертикальными линиями показаны начало (16 июня 2008 г.) и конец (27 августа 2008 г.) этого периода. Здесь и далее «домиками» на горизонтальной шкале отмечены даты близких и дальних сейсмических толчков и афтершоков: цветные треугольники показывают расстояние ( $L$ ) от станции наблюдений до эпицентра землетрясения, цветные квадраты — энергетический класс ( $K$ ) события.

мость информационных структур мощных землетрясений исключает возможность возникновения ложной тревоги при их прогнозе.

Переход земной коры в равновесное состояние начался сразу после землетрясения 27 августа 2008 г. и продолжался до 05 ноября 2009 г., что составило 435 сут. Для этого времени характерны непрерывные знакопеременные колебания

индикаторных функций с периодом от двух до восьми недель.

В равновесном состоянии земной коры индикаторные функции колеблются с малыми амплитудами около своего нулевого значения. В районе слабых сейсмических толчков периодически возникают характерные информационные структуры, подобные показанной на рис.7.

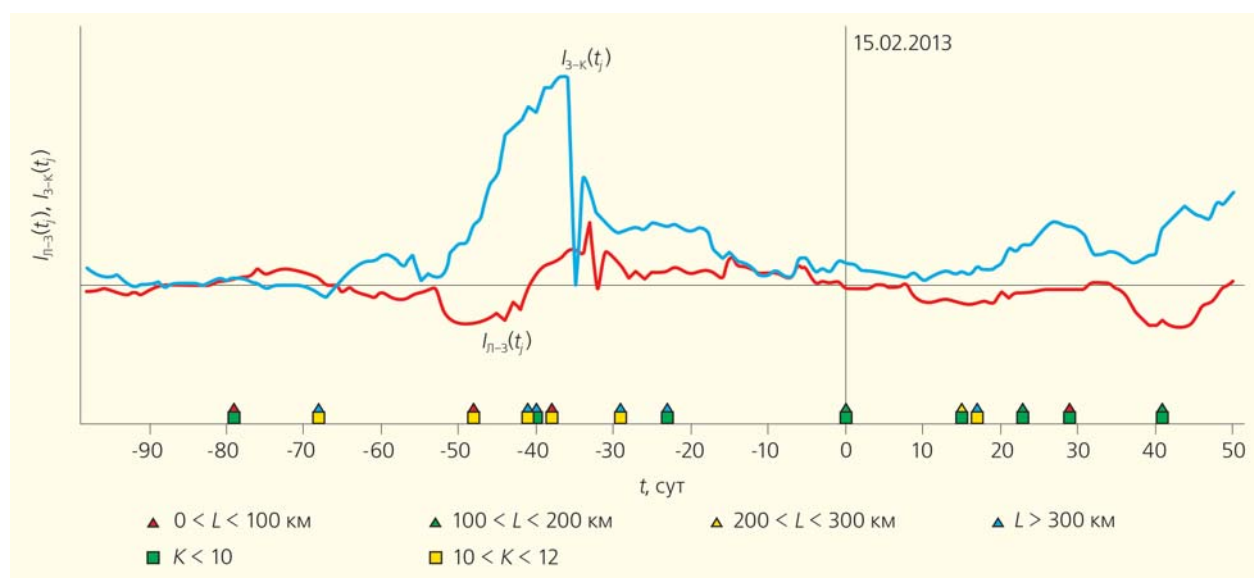


Рис.7. Парные индикаторные функции в период концентрации напряжений земной коры перед землетрясением в Тункинской долине 15 февраля 2013 г. ( $K = 10.0$ ,  $L = 170.2$  км).

## Дальнейшая перспектива

Достоверный прогноз землетрясения должен ответить на три вопроса: когда оно произойдет, какой окажется его магнитуда и где будет располагаться его эпицентр?

На примере Култукского события можно считать установленным, что магнитуда прогнозируемого землетрясения определяется продолжительностью периода концентрации напряжений в земной коре перед его началом. Признаком такого периода служит не меняющее своего знака устойчивое превышение нормальных показаний индикаторных функций (см. рис.6). На примере Култукского землетрясения можно утверждать, что если такие аномальные показания наблюдаются более двух месяцев подряд, то в ближайшее время следует ожидать мощное землетрясение, и чем больше длится период ожидания, тем выше будет магнитуда предстоящего события. Сейчас исследованы индикаторные функции только Култукского события, и вопрос возможности достоверного краткосрочного прогноза землетрясений по индикаторным функциям пока остается открытым.

Изучение индикаторных функций при сейсмических толчках различной силы показало, что чувствительность функций охватывает обширный регион, вытянувшийся по Байкалу, а затем через Тункинскую долину — до границы с Тувой. Расстояние до эпицентра землетрясения вычисляется от пункта наблюдения Зеленый Мыс. Например, для Култукского землетрясения оно составило 58.5 км. Протяженность области чувствительности индикаторных функций с востока на запад составляет примерно по 600 км в обе

стороны от станции гидрогеохимических наблюдений. А вот с севера на юг эта область значительно уже. Так, 17 июля 2011 г. на расстоянии 286.2 км от Зеленого Мыса произошло Туркинское землетрясение с энергетическим классом  $K = 14.3$ , на которое индикаторные функции никак не отреагировали.

К сожалению, индикаторные функции не позволяют определить азимут, по которому произойдет сейсмический толчок. При прогнозе будущих землетрясений мы можем говорить только об области чувствительности индикаторных функций и примерной удаленности эпицентра от точки отсчета. Для оценки удаленности прогнозируемого землетрясения существует две возможности.

1. Амплитуда отклонения индикаторных функций в период концентрации напряжений земной коры перед землетрясением убывает с расстоянием. Это можно наглядно продемонстрировать на примере Тувинских событий. С 15 августа 2011 г. по 25 февраля 2012 г. произошло пять землетрясений на расстоянии от 418 до 590 км от точки наблюдений. Из них первые три с энергетическими классами от 11.2 до 12.2 оказались за пределами чувствительности индикаторных функций, и только два последних (с энергетическими классами 15.9 и 16.3) отразились на их показаниях (рис.8).

На I участке парная индикаторная функция  $I_{3-K}(t)$  принимает характерный вид, предшествующий сейсмической активности. По завершению этой информационной структуры на удалении 590.9 км от точки наблюдения Зеленый Мыс случилось 4-е Тувинское землетрясение.

На II участке наблюдается информационная структура затухающей сейсмической активности

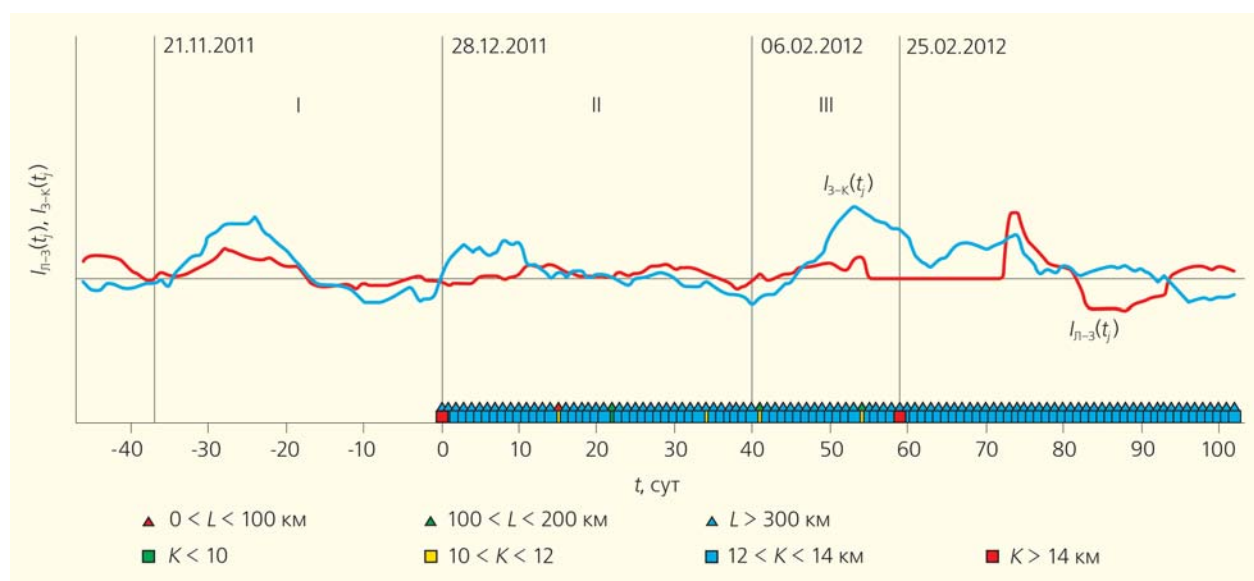


Рис.8. Три информационные структуры, соответствующие четвертому (28.12.2011 г.,  $K = 15.9$ ,  $L = 590.9$  км) с 48 афтершоками ( $K$  от 4 до 12.4) и пятому (25.02.2012 г.,  $K = 16.3$ ,  $L = 583.9$  км) с афтершоками ( $K$  от 5 до 12.8.) Тувинским землетрясениям.



после этого землетрясения, 48 афтершоков которого продолжались до 25 февраля.

На III участке парная индикаторная функция  $I_{3-k}(t_j)$  опять принимает вид, предшествующий очередной сейсмической активности. По завершению этой информационной структуры произошло 5-е Тувинское землетрясение. Данная структура — достаточно короткая (всего 19 дней), и она выглядит незавершенной. Можно предположить, что афтершоки 4-го землетрясения индуцировали более раннее формирование магистрального тектонического разрыва следующего события по сравнению с его подготовкой в условиях сейсмического затишья.

На всем протяжении Тувинской активности парная индикаторная функция  $I_{3-k}(t_j)$  незначительно колебалась около нуля. Это свидетельствует о том, что в районе Иркутска было сейсмически спокойно.

2. У близких сейсмических толчков отклонение  $I_{3-k}(t_j)$  больше, чем  $I_{3-k}(t_i)$  (см. рис.6), а у отдаленных землетрясений — наоборот (см. рис.7). Попутно следует отметить, что частота слабых сейсмических толчков в Байкальском регионе столь велика, что исследуемые информационные структуры часто представляют собой реакцию сразу на несколько сейсмических явлений. При анализе слабых толчков весьма велика вероятность ошибки при определении удаленности эпицентра прогнозируемого землетрясения низкого энергетического класса.

В заключение можно констатировать, что нами опробован новый перспективный научно-исследовательский инструмент — математический аппарат индикаторных функций, который, на наш взгляд, позволит не только получать достоверные прогнозы землетрясений, но и существенно расширить наши знания в области сейсмологии. ■

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00245).**

## Литература

1. Haicheng Earthquake 1975. 02.04. Shenyong, 1982.
2. Цзян Фань. Хайчэнское землетрясение 04.02.1975. Пекин, 1978.
3. The Seismotectonic Map of People's Republic of China by Institute of Geology State Seismological Bureau, Cartographic Publishing House. Sc.: 1:5000000. 1979. (In Chinese).
4. Bolt B.A., Darrab R.B. The Tanlu fault system Shantung and Anhui provinces // California geology. 1983. V.36. №12. P.270–275.
5. Jiawei X., Guang Z., Weixing T. et al. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean // Tectonophysics. 1987. V.134. №4. P.273–310.
6. Fang Z., Ding M., Ji F., Hongfa X. Geological analysis of the seismicity in the Tancheng-Lujiang fault zone, East China // Seismol. and Geol. 1980. V.2. №1. P.39–45.
7. Садовский М.А. Землетрясения можно предсказать // Наука в СССР. 1981. №5. С.59–71.
8. Мого К. Предсказание землетрясений. М., 1988.
9. Соболев Г.А. Основа прогноза землетрясений. М., 1993.
10. Солоненко В.П. Прогноз землетрясений — желаемое и достигнутое // Природа. 1979. №2. С.13–20.
11. Mogi K. Some features of recent seismic activity in and near Japan. Activity before and after great earthquakes // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1969. V.47. Pt.3. P.395–417.
12. Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F. Earthquakes cannot be predicted // Science. 1997. V.275. P.1616–1618.
13. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М., 2009.
14. Wyss M. Cannot Earthquake be predicted? // Science. 1997. V.278. P.487–488.
15. Киссин И.К. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М., 2009.
16. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск, 2014.
17. Тыминский В.Г. Геохимические предвестники землетрясения // Природа. 1979. №2. С.46–47.
18. Култукское землетрясение на юге Байкала 27 августа 2008 года. Иркутск, 2011.
19. Семенов Р.М., Смекалин О.П., Оргильянов А.И. Байкал предупреждал о приближении землетрясения // Природа. 2009. №7. С.64–67.
20. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Серебренников В.С. Вестники беды (о поиске средств геохимического прогноза землетрясений). М., 1989.
21. Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н. Способ гидрогеохимического определения времени возникновения землетрясений в Южном Прибайкалье. Патент на изобретение №2601403. Российская Федерация. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Опубликовано 10.11.2016. Бюлл. №31.

# Биодegradация белого фосфора

А.З.Миндубаев, А.Д.Волошина, Ш.З.Валидов, Д.Г.Яхваров

**Б**елый фосфор — один из самых опасных загрязнителей окружающей среды. Это чрезвычайно токсичное и огнеопасное вещество. Тем не менее белый фосфор (как и его неочищенная форма — желтый фосфор) служит краеугольным камнем химии фосфора, сырьем для производства самых разных продуктов от спичек до удобрений и пестицидов. Более того, белый фосфор применяется в военных целях, несмотря на официальный запрет, наложенный международной конвенцией. Недавно это опаснейшее вещество впервые было обезврежено и превращено в полезный для окружающей среды фосфат. А осуществить это удалось благодаря микроорганизмам.

## Что такое биодegradация?

Научно-технический прогресс XX в. подарил человечеству не только блага цивилизации, кото-

\* Со статьей «Биодegradация белого фосфора: как яд стал удобрением», участвовавшей в научно-популярном конкурсе «Био/мол/текст»-2016 в номинации «Своя работа», можно ознакомиться на сайте «Биомолекула» (<http://biomolecula.ru/content/1932>), посвященном молекулярным основам современной биологии и практическим применениям научных достижений в медицине и биотехнологии. По договоренности с организаторами конкурса мы публикуем переработанный вариант этой статьи. — *Примеч. ред.*

© Миндубаев А.З., Волошина А.Д., Валидов Ш.З., Яхваров Д.Г., 2017



**Антон Зуфарович Миндубаев**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института органической и физической химии имени А.Е.Арбузова Казанского научного центра РАН (ИОФХ). Область научных интересов — биологическая дегradация ксенобиотиков и адаптация к ним микроорганизмов. Номинант конкурса «Био/мол/текст» 2016 года\*.



**Александра Дмитриевна Волошина**, кандидат биологических наук, научный сотрудник того же института. Занимается целенаправленным поиском среди химических соединений новых препаратов с антибактериальной, противогрибковой и противоопухолевой активностью и изучением механизма их действия.



**Шамиль Завдатович Валидов**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры биохимии Казанского федерального университета (КФУ) и Института фундаментальной медицины и биологии. Область научных исследований — защита окружающей среды, генетика, микробиология, фитопатология.



**Дмитрий Григорьевич Яхваров**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник КФУ, доцент ИОФХ. Научные интересы связаны с химией и электрохимией элементоорганических соединений, зеленой химией, катализом, получением магнитоактивных материалов.

**Ключевые слова:** биодegradация, белый фосфор, микрофлора, ксенобиотики, защита окружающей среды, промышленные стоки.

**Key words:** biodegradation, white phosphorus, microflora, xenobiotics, environment protection, industrial effluents.

рые повышают уровень жизни, но и множество проблем, до сих пор не решенных. И сейчас, уже в первые десятилетия XXI в., разразился кризис. Одна из важнейших проблем — пагубное воздействие отходов цивилизации на окружающую среду.

Что делать с отходами? Вопрос, на который не легко ответить. Речь в первую очередь идет об отходах химической промышленности. Поскольку «кровь» цивилизации — нефть и природный газ, значит, отходы — это преимущественно продукты их переработки, зачастую токсичные, с трудом разлагающиеся в природе. Не менее опасны отходы металлургии — тяжелые металлы и их соединения. Значительную угрозу экологическому балансу создают и удобрения — азотные, калийные и фосфорные. Запасы химического оружия — вообще отдельная тема, а их утилизация — проблема чрезвычайной остроты. Достаточно сказать, что для производителей химических арсеналов их творения представляют не меньшую угрозу, чем для противника.

Вернемся к «крови» цивилизации — нефти. Как продукт переработки живых организмов, она состоит преимущественно из биогенных элементов (углерода, водорода, серы, азота и др.). Значит, теоретически любой нефтепродукт можно вернуть в природный круговорот. Однако на практике сделать это непросто: не любое углеродистое соединение полезно для жизнедеятельности. Необходимо превратить отходы в безвредные вещества.

Такая трансформация производится различными способами. Органическое вещество можно сжечь, подвергнуть пиролизу (фактически снова превратить в нефть и уголь) или воздействию агрессивных химических реагентов (кислоты, щелочи, перекиси водорода, гипохлоритов), иногда при высоких температурах и давлениях. Эти подходы широко применяют и постоянно совершенствуют. Без них существование городов и промышленных предприятий стало бы невозможным.

Тем не менее в последние десятилетия одним из наиболее часто применяемых методов обезвреживания промышленных, бытовых и сельскохозяйственных стоков, химического оружия и взрывчатых веществ становится биodeградация [1–3]. В ряде случаев она приходит на смену более ранним методам химической деструкции. Главная причина того, что популярность биodeградации растет, — ее сравнительная экологическая безвредность. Ведь биodeградация, как ясно из названия, — это обезвреживание токсичных веществ особыми деструкторами, чаще всего микроорганизмами. Благодаря ферментным системам адаптированных микроорганизмов токсичные отходы разлагаются в мягких условиях, в отсутствие жестких химических и физических воздействий.

Привнесенные микроорганизмы-деструкторы не выдерживают конкуренции с исконной микрофлорой водоемов и почв и вытесняются ею вско-

ре после того, как загрязнение ликвидируется, а экологический баланс восстанавливается. В некотором смысле биodeградацию можно назвать самым естественным способом разложения отходов. Действительно, миллиарды лет существования биосферы микроорганизмы питались отходами ее жизнедеятельности, осуществляли минерализацию органики. Точно так же они поступают и с отходами человеческого производства.

Почему же популярность биodeградации начала расти только в последнее время? Отчасти это объясняется господствовавшим предубеждением, будто большинство продуктов химической промышленности относятся к веществам, чуждым природе и в ней не встречающимся. А значит, природа не способна и самостоятельно их уничтожить. От экологов часто приходится слышать высказывания вроде «диоксины губительны для всего живого» или «полиэтилен не разлагается столетиями». Однако уже известно, что полибромдиоксины выделяются морскими губками [4], а также выведены культуры микроорганизмов, разлагающие полиэтилен: *Pseudomonas aeruginosa*, *Penicillium frequentans*, *Sphingomonas macrogoltabidus* (к слову, веками наблюдать за разложением полиэтилена ни у кого возможности и не было) [5].

Другой пример — постулат зеленой химии о прекращении использования в промышленности галогенов (фтора, хлора, брома и йода) как чуждых окружающей среде элементов. При этом игнорируется присутствие в природе 2,5 тыс. галогенорганических веществ различного происхождения (это еще устаревшие данные, за 1996 г.) [6]. Безусловно, играет роль и лоббирование: политические круги, заинтересованные в сокращении промышленных мощностей, склонны преувеличивать экологическую угрозу. А самое главное — совершенствование методов химического анализа и бурно развивающаяся наука метаболомика позволили существенно расширить спектр веществ, обнаруживаемых в природе.

Например, окись этилена никогда не рассматривалась в качестве природного соединения. Это широко известный дезинфицирующий агент, канцероген, мутаген и нервно-паралитический яд, токсичный для всех форм жизни. К тому же этиленоксид пожаро- и взрывоопасен. Однако известно, что этиленоксид образуется эндогенно в результате окисления этилена оксидазами [7]. Сам этилен, в свою очередь, выделяется растениями и микроорганизмами и выполняет функции фитогормона [8]. Из атмосферы этилен поглощается животными и аэробными микроорганизмами, которые окисляют его до этиленоксида. Таким образом, некоторое количество этого токсиканта постоянно находится в биосфере. Не исключено, что его биопродукция за год сравнима с годовым промышленным производством этого соединения. Так или иначе, есть основания называть этиленоксид природным веществом. И это далеко не



Таблица 1

Химические вещества, до недавнего времени считавшиеся не циркулирующими в биосфере

Вещество	Источник	Ссылка
Азотная и серная кислоты	Аммиакоксилирующие и сероокисляющие бактерии	[10, 11]
Ацетон и формальдегид	Бактерии <i>Clostridium acetobutylicum</i>	[12]
Бензол и нафталин	Грибы-паразиты <i>Gliocladium roseum</i> и <i>Muscodor albus</i>	[13, 14]
Бромциан и йодциан	Диатомовые водоросли <i>Nitzschia pellucida</i>	[15]
Гидразин	Морские бактерии <i>Brocadia anammoxidans</i>	[16]
Диэтиловый эфир и циклогексан	Тропическое растение <i>Sauromatum guttatum</i>	[17]
Карбид-анион $C^{4-}$	Активный центр нитрогеназы	[18]
Металлический свинец в виде микрочастиц	Плесневые грибы <i>Aspergillus</i> sp.	[19]
Метамфетамин	Акация <i>Acacia berlandieri</i>	[20]
Метилизотиоцианат	Морские губки <i>Ircinia felix</i>	[21]
Полибромдибензодиоксины	Морские губки <i>Dysidea dendyi</i>	[4]
Тетраметилсвинец	Бактерии <i>Aeromonas</i> sp.	[22]
Фенацетин	Мексиканское лекарственное растение <i>Bursera grandifolia</i>	[23]
Фенол	Кишечная микрофлора млекопитающих	[24]
Фосген	Бактерии <i>Pseudomonas</i> sp. штамма КС	[25]
Хлор	Продукт миелопероксидазы нейтрофилов млекопитающих	[26]
Четыреххлористый углерод	Красные водоросли <i>Asparagopsis armata</i>	[27]
Этилен	Растения и микроорганизмы	[8]
Этиленоксид	Многие аэробные организмы, включая человека	[7]

единственный пример. Оказалось, большинство химических продуктов, пусть и в очень малых количествах, постоянно выделяются живыми организмами и циркулируют в биосфере [9] (табл.1). Так, недавно выяснилось, что диатомовые водоросли *Nitzschia pellucida* выделяют крайне токсичный метаболит — бромциан [15]! А в присутствии избытка йодида они синтезируют еще более токсичный йодциан. В научных исследованиях эти соединения применяются для иммобилизации белков, поскольку образуют с ними прочные молекулярные комплексы. Таким образом, микроорганизмы-деструкторы с подобными веществами постоянно сталкиваются и способны их разлагать.

Конечно, биodeградация, как и любой метод, имеет свои ограничения. В природе ни одно токсичное вещество не накапливается в чистом виде. Например, фенол в очень малых концентрациях всегда присутствует в биосфере — как продукт распада ароматических аминокислот [24]. Однако только с развитием химической промышленности начали наполнять этим веществом целые цистерны. А для ликвидации цистерны концентрированного фенола биodeградация, безусловно, не подходит. Зато она очень эффективна при случайных разливах токсичных веществ в воде или почве. Неслучайно в патентной базе Федерального института промышленной собственности при наборе ключевого слова «биodeградация» открывается солидное количество патентов по устранению нефтяных пленок.

Другое ограничение биodeградации — недостаточная скорость эволюции микроорганизмов. Они просто не успевают за промышленностью. Ускорить эволюцию помогают разнообразные

приемы: создание накопительных культур, генная инженерия, направленная селекция и т.д. Однако их применение требует глубоких знаний и высокого технологического уровня, а также значительных финансовых вложений. Немногие государства и корпорации могут себе это позволить. В интереснейшей статье [28] сообщается о том, что мутантные бактерии *Pseudomonas fluorescens* научились производить нужный им белок, регулирующий рост жгутиков (точнее, подладили под новые потребности уже имевшийся у них белок, который активировал гены фиксации азота) всего за четыре дня! По всей видимости, общее разнообразие ферментов, участвующих в биodeградации ксенобиотиков (веществ, чужеродных для живых организмов), бесконечно велико и основано на спонтанном либо направленном мутагенезе.

Известно, что гены, кодирующие ферменты биodeградации, часто находятся на внехромосомных генетических структурах бактерий — плазмидах. Например, на плазмиде pADP1 локализованы гены *atz*, позволяющие бактериям-хозяину утилизировать пестицид атразин, а плазмида pNL1 содержит гены *bph*, ответственные за катаболизм бифенила, и множество других генетических кластеров для деградации ароматических соединений [29]. Плазмиды с «экзотическими» генами быстро распространяются в популяции микроорганизмов в присутствии токсичного вещества и быстро элиминируются после его уничтожения — живой клетке становится невыгодно иметь бесполезные гены. Природа, как известно, скупа на нововведения: точно так же, благодаря плазмидным генам, среди микроорганизмов распространяется и устойчивость к антибиотикам. Вот почему со-

зданные в лабораториях узкоспециализированные микроорганизмы-деструкторы в основном не способны жить в обычных природных условиях — их вытесняют более приспособленные дикие штаммы. Таким образом, наличие в среде ксенобиотика — необходимое условие их существования. Соответственно, они обречены на жизнь в коллекциях клеточных культур (в нашей стране крупнейшая — Всероссийская коллекция промышленных микроорганизмов, созданная в 1969 г. и насчитывающая около 20 тыс. образцов) или в загрязненных почвах вокруг химических предприятий.

Еще одна проблема, связанная с биodeградацией — это уязвимость деструкторов. Как и любые организмы, они чувствительны к факторам среды. Например, микроорганизм может эффективно разлагать иприт, но при этом погибнуть от ионизирующего излучения. А микроорганизмы, устойчивые к радиации, имеют низкий темп размножения и медленный метаболизм, то есть мало подходят на роль деструкторов. Поэтому биodeградация никогда не вытеснит другие способы ликвидации отходов. Но эффективно обезвредить опасные отходы производства можно только комплексом методов, обязательно включающим биodeградацию.

Естественная среда обитания деструкторов — активный ил и осадки сточных вод, скапливающиеся в отстойниках очистных сооружений (рис.1). Здесь они постоянно участвуют в процессе водоочистки. Почва вокруг производственных предприятий тоже служит источником ценных культур, поскольку незначительные утечки реагентов неизбежно происходят.



Рис.1. Отстойники очистных сооружений химических предприятий — естественная среда обитания микроорганизмов-деструкторов.

Для устранения случайных разливов токсичных веществ используют микроорганизмы в составе, как правило, пористых сорбентов (торфа, компоста, соломы, золы от сгоревшего угля и т.п.). Такой сорбент впитывает ксенобиотик, тем самым удаляя его из воды или почвы, а содержащиеся в нем микроорганизмы приступают к деструкции. Описания подобных материалов и методов их применения приведены в соответствующих патентах.

С недавнего времени и мы стали заниматься биodeградацией, причем объект исследования выбрали очень необычный — белый фосфор. В научной литературе не удалось найти сведений о дегградации элементного, в том числе белого, фосфора активным илом без искусственного внесения химических реагентов. Ничего не было известно и о путях метаболизма белого фосфора в присутствии микробиоты или в тканях высших организмов. Речь везде шла исключительно об абиогенных путях дегградации и детоксикации белого фосфора. О его токсичности для прокариот тоже ничего не было известно.

Наибольшую трудность для метаболизма белого фосфора представляет отсутствие у его молекул углеродного скелета. Большинство ксенобиотиков, как уже говорилось, получается из нефти и относится к органическим соединениям, сравнительно легко преобразуемым в биологические молекулы. Ферментные системы клетки адаптированы к метаболизму органических веществ. Тогда как белый фосфор — вещество простое, но только чрезвычайно токсичное, но и не встречающееся в природе.

Как известно, разработка подходов к биodeградации нового вещества начинается с поиска микроорганизмов, разлагающих родственные соединения. Например, штаммы, разлагающие хлорбензоаты, выведены путем направленной селекции из культур (например, штамма *Burkholderia* sp. NK8), разлагающих незамещенный бензоат [30]. В случае с белым фосфором такой прием неприменим: у микроорганизмов метаболизм, скажем, серы и селена имеет очень отдаленное сходство, слишком уж велика разница в свойствах элементов.

Таким образом, попытка осуществить биodeградацию белого фосфора — довольно смелый научный вызов. Однако высокая реакционная способность этого вещества и теоретическая возможность преобразовать его в биологически совместимый фосфат позволяли рассчитывать на успех.

Каковы же особенности выбранного объекта исследования?

## Белый фосфор

По химической природе белый фосфор ( $P_4$ ) представляет собой простое вещество, аллотропную модификацию элементного фосфора. Белый фосфор высокой чистоты выглядит как бесцветные кристаллы с сильным коэффициентом преломления света, внешне похожие на алмазы. Плавится он при  $44.1^\circ\text{C}$ , кипит при  $280.5^\circ\text{C}$ . Из всех аллотропных модификаций фосфора имеет наименьшую плотность ( $1.8 \text{ г/см}^3$  при  $20^\circ\text{C}$ ). Кроме того, белый фосфор — самая химически активная и термодинамически нестабильная модификация фосфора. При хранении, особенно на свету, он постепенно полимеризуется в красный фосфор и темнеет. Технический белый фосфор (желтый фосфор) — аморфная, похожая на пчелиный воск масса желтоватого или светло-коричневого цвета, с характерным чесночным запахом (рис.2). Содержит примеси красного фосфора и других веществ. На воздухе, в присутствии кислорода, белый фосфор медленно окисляется до оксида  $P_2O_3$  практически без выделения тепла. Окисление сопровождается слабым зеленоватым свечением (хемилюминесценцией).

Белый фосфор чрезвычайно огнеопасен, горит ослепительно белым пламенем. Удельная теплота сгорания белого фосфора большая (почти как у каменного угля и спирта) —  $24\,000 \text{ Дж/г}$ . Легко самовоспламеняется на воздухе, особенно при механическом воздействии, например при трении. Температура самовоспламенения — всего  $30^\circ\text{C}$ . Горение белого фосфора сопровождается выделением густого белого дыма, состоящего из частичек оксида фосфора  $P_2O_5$ . Пятиокись фосфора крайне гигроскопична: она впитывает атмосферную влагу и образует туман из капелек ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$ . Формирование кислотного тумана делает случаи возгорания фосфора еще более опасными. Чтобы предотвратить окисление и возгорание, белый фосфор хранят под водой, с которой он практически не реагирует.

Высочайшая химическая активность белого фосфора определяет его токсичность. Летальная доза белого фосфора для взрослого человека составляет всего  $0.05\text{--}0.1 \text{ г}$ . Предельно допустимая концентрация паров фосфора в воздухе производственных помещений —  $0.03 \text{ мг/м}^3$  (что соответствует первому классу опасности по ГОСТу), временно допустимая концентрация в атмосферном воздухе —  $0.0005 \text{ мг/м}^3$ , предельно допустимая концентрация в питьевой воде —  $0.0001 \text{ мг/л}$  [31].

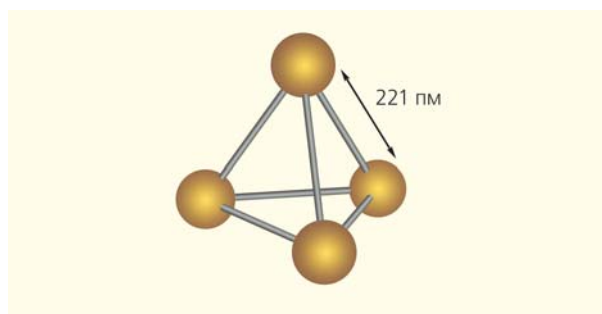


Рис.2. Белый фосфор ( $P_4$ ): внешний вид и структура.

Вот почему белый фосфор — один из самых опасных загрязнителей окружающей среды. Обладающий высокой химической активностью и летучестью, легко воспламеняющийся, при соприкосновении с кожей он вызывает тяжелые ожоги, поражает все системы внутренних органов человека и животных. Хроническое отравление приводит к глубокой инвалидности: белый фосфор нарушает кальциевый обмен, разрушает кости, вызывает малокровие, поражает печень, сердечно-сосудистую и репродуктивную системы. Гидрофобность белого фосфора сочетается с высокой липофильностью, что делает его еще опаснее, поскольку он легко накапливается в жировой ткани.

Тем не менее белый фосфор широко применяется в промышленности: в металлургии, в производстве красного фосфора, треххлористого фосфора, фосфорных кислот и фосфатов для технического использования и пищевой промышленности, для приготовления дымообразующих и зажигательных смесей. Значит, не исключается (а скорее, неизбежно) попадание белого фосфора в окружающую среду.





Рис.3. Вплоть до 1906 г. в производстве спичечных головок использовался белый фосфор.

Фото Adalberto Gonzaga Filho

Особенно страдают от загрязнения этим веществом водоплавающие птицы, в частности утки и лебеди, поскольку белый фосфор попадает в их организм из воды во время кормежки, а также питающиеся ими хищные птицы [32]. Обнаружилось, что из организма кур-несушек белый фосфор может переходить в яйца. Найден он и в рыбе — пресноводной и морской.

Самый известный симптом хронического отравления белым фосфором — остеопороз, возникающий в результате нарушения кальций-фосфорного обмена. При этом существенно снижаются прочность и эластичность костной ткани, возникают боли в спине. Болезнь сопровождается гиперфосфатемией — возрастанием уровня фосфатов и ионов кальция в моче, то есть организм теряет необходимые элементы. В тяжелых случаях остеопороз переходит в остеонекроз — отмирание костной ткани и образование свищей. В медицине даже существует термин «фосфорная челюсть», означающий разрушение нижней челюсти у человека при длительном контакте с фосфором. В XIX — начале XX в. от этого заболевания часто страдали рабочие спичечных фабрик, вдыхавшие пары белого фосфора [33].

Несмотря на официальный запрет, белый фосфор используется в военных целях — для приготовления зажигательных смесей. Им начиняют гранаты, авиабомбы, артиллерийские снаряды. В последнее время доносятся печальные сведения о применении фосфорных боеприпасов правительством Украины на юго-востоке страны. Обстрелы боеприпасами с белым фосфором вызывают сильнейшие пожары. Это, безусловно, оружие массового уничтожения. Ожоги, вызванные горящим фосфором, особенно тяжелы и с большим трудом поддаются лечению, поскольку термический ожог дополняется кислотным (фосфорная кислота — основной продукт горения фосфора). Горящий фосфор испаряется, и его пары выжигают легкие.

В производстве спичек белый фосфор использовали вплоть до 1906 г., когда это запретила Бернская конвенция (рис.3). После ее подписания

спичечные головки стали изготавливать на основе красного фосфора, значительно менее огнеопасного и токсичного. Таким образом, опасность белого фосфора в быту почти полностью устранена. Однако риск аварий на промышленных предприятиях и транспортных путях сохраняется.

Так, 16 июля 2007 г. на Львовской железной дороге произошла крупная авария товарного поезда. Цистерны, содержавшие желтый фосфор, сошли с рельсов, при этом нарушилась их герметизация — и из них полился горящий жидкий фосфор. Как выяснилось, организаторы транспортировки понадеялись только на защитное действие герметизации и не оборудовали в цистернах систему охлаждения [34].

По мнению В.Станкевича, доктора медицинских наук, заведующего лабораторией гигиены почвы и отходов Института гигиены и медицинской экологии имени А.Н.Марзеева НАМН Украины, фосфор нужно перевозить с такими же мерами предосторожности, как и ядерные отходы. Очевидно, что необходимо искать новые, более эффективные способы обезвреживания такого опасного технологического продукта, как белый фосфор.

Единственное предприятие по производству технического белого (желтого) фосфора в России — ОАО «Фосфор» (г.Тольятти) — обанкротилось в 2002 г. Теперь его территория, где на 180 га хранятся 6 тыс. тонн фосфорного шлама, — очаг частых возгораний и неблагоприятной экологической обстановки в городе и его окрестностях. Например, в 2012 г. там было зафиксировано 36 случаев возгорания фосфшлама.

Казалось бы, такой набор свойств белого фосфора сводит на нет возможность его биологической деструкции. Однако, несмотря на то, что он губителен для любых форм жизни, элемент фосфор обладает уникальным качеством: будучи сильнейшим ядом в виде простого вещества, в окисленном состоянии он абсолютно необходим для всего живого. Таким образом, возможна его полная детоксикация. Проблема обезвреживания белого фосфора (на 100% состоящего из биогенного элемента фосфора!) в окружающей среде заключается в том, что нет эффективных и безвредных способов превратить его в безопасную форму — остаток фосфорной кислоты. Такое превращение только на первый взгляд кажется легким.

### Работа с осадками сточных вод: открытие бактерий, устойчивых к белому фосфору

Наши исследования по биodeградации белого фосфора начались весной 2009 г. Д.Г.Яхваров в то время тесно сотрудничал с голландской корпорацией Thermphos International, которая производила белый фосфор и регулярно выплачивала штрафы за загрязнение окружающей среды. Руководство фирмы было сильно заинтересовано

в том, чтобы найти способ обезвреживать стоки предприятий. И мы решили взять образцы осадков сточных вод из очистных сооружений казанского водоканала и проверить, что станет с внесенным в них белым фосфором.

Никакой опубликованной литературы о биодеградации белого фосфора найти не удалось, ни на русском, ни на английском языке. В единственном отчете вскользь упоминалось, как в начале 1980-х гг. американские ученые исследовали рост почвенной микрофлоры в присутствии белого фосфора и пришли к выводу, что роста никакого и нет [35]. Получается, деструкция этого вещества в окружающей среде носит исключительно абиотический характер. Причем разлагается белый фосфор крайне медленно: те же американские ученые подсчитали, что скорость распада частиц белого фосфора, оказавшихся на дне водоема, может превышать 10 000 лет! Более того, не было никакой информации о путях метаболизма белого фосфора. Про симптоматику отравлений высших животных и человека опубликовано много литературы, а биохимическую основу этих процессов, похоже, никто не выяснял. (Либо эта информация засекречена, как-никак белый фосфор интересует военных.)

Самый первый наш эксперимент был чистой авантюрой: мы внесли в осадок сточных вод белый фосфор в соотношении 1:1000 и стали ждать, что же случится. Осадок в герметично закрытой склянке с трубкой, погруженной в воду температурой 37°C, сначала бодро выделял газ (который накапливался в перевернутом вверх дном

мерном цилиндре, заполненном солевым раствором), но через пару недель его активность упала до нуля. Сомнений не было — все живое в нем умерло. И действительно, белый фосфор ведь считается губительным для всех форм жизни. Однако склянку мы оставили, решили пока не трогать. И не зря: через несколько недель намертво застывший уровень жидкости в цилиндре опустился на один миллилитр. Это легко было списать на случайность — изменение температуры и пр. Но с каждым днем уровень падал все быстрее, а газ накапливался. Этот газ — смесь углекислого газа и метана — продуцируют микроорганизмы, населяющие осадок, а значит, скорость его выделения отражает активность их метаболизма. Таким образом, после длительного периода угнетения бактерии адаптировались к неблагоприятным условиям. Мы поняли, что надо продолжать исследование.

Сначала работа продвигалась очень медленно. Анаэробные бактерии размножаются медленно, наблюдения за кинетикой выделяющегося газа длились по 150–200 дней. Причем ежедневно требовалось измерять объем выделяющегося газа и доливать воду в термостатируемую баню.

Разумеется, мы усовершенствовали протокол экспериментов. Каждый опыт ставили в трех повторках, белый фосфор вносили не кусками, а в виде однородной водной эмульсии, полученной диспергированием ультразвуком, и варьировали концентрацию фосфора от 0.001 до 0.1%. Естественно, с ростом концентрации яда активность микрофлоры снижалась. Это иллюстрирует приведенный график (рис.4).

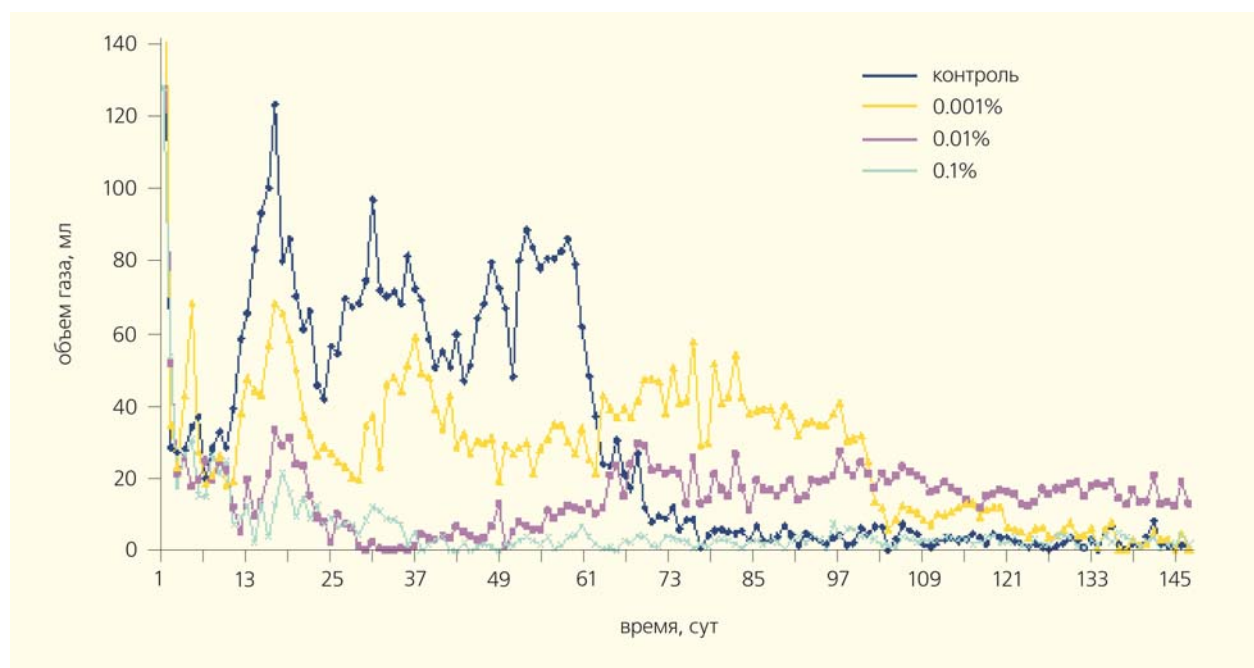


Рис.4. Кинетика выделения газа в зависимости от концентрации белого фосфора, внесенного в осадок сточных вод. Чем выше концентрация белого фосфора, тем меньше объемы выделяемого микрофлорой газа.

Сиреневая кривая соответствует концентрации белого фосфора 0.01%. Видно, что сначала выделение газа (напрямую зависящее от скорости микробного метаболизма) идет довольно интенсивно. Затем, после 20-го дня, газа выделяется все меньше, а к 30-му дню активный ил буквально умирает. А после 37-го дня кривая снова начинает расти и выходит на плато. Получается, микрофлора адаптируется к токсичной среде обитания, по крайней мере частично. А в контроле (темно-синяя кривая) падение интенсивности метаболизма наблюдается только после 60-го дня, когда, по-видимому, исчерпываются питательные вещества. Таким образом, «яма» на сиреневой кривой почти наверняка связана с токсичностью фосфора.

Эта кинетика всегда носила одинаковый характер. В первые дни активность микрофлоры в опыте и контроле (осадке без белого фосфора) ничем не различалась, затем в опытных образцах она снижалась вплоть до полного угнетения, однако потом снова повышалась, поскольку микрофлора адаптировалась к непривычным условиям (хотя уровень ее метаболизма был существенно ниже, чем в контроле).

С помощью ЯМР-спектроскопии мы установили, что активация микрофлоры после периода угнетения совпадает с исчезновением сигнала белого фосфора, то есть эти процессы взаимосвязаны. Более того, скорость деградации белого фосфора оказалась прямо пропорциональной активности микрофлоры. В образцах осадка с низкой активностью микрофлоры (например, отобранного в морозные зимние месяцы) сигнал белого фосфора в спектре наблюдался и через год после внесения, а в других случаях исчезал через два месяца. Итак, сомнений не оставалось: микробный метаболизм активно влияет на деградацию белого фосфора.

Один эксперимент продемонстрировал взаимосвязь между микробным метаболизмом и скоростью разложения белого фосфора особенно ярко. В нем биodeградация сравнивалась в трех образцах осадка одной партии, но отобранных с разной глубины (соответственно, с разным видовым составом микрофлоры). Чем глубже залегал слой ила, тем меньше из него выделялось газообразных продуктов жизнедеятельности бактерий. Анализ с помощью газовой хроматографии и масс-спектрометрии показал, что концентрация метаболитов в трех пробах заметно различается. Интенсивность сигнала белого фосфора была об-

ратно пропорциональна активности микробного метаболизма. Концентрация  $P_4$  в первом образце была в 7.8 раз ниже, чем во втором, и в 13.3 раза ниже, чем в третьем. Это подразумевает четкую зависимость между скоростью исчезновения белого фосфора в субстрате и интенсивностью микробного метаболизма в нем [36]. Ведь если бы  $P_4$  подвергался абиогенной деструкции, то скорость его разложения и интенсивность сигнала во всех трех пробах были бы одинаковы.

Пожалуй, самым неожиданным результатом, полученным нами в то время, стал следующий: мы установили, что поверхность осадков с белым фосфором со временем покрывается колониями бактерий. Но устойчивые к этому токсиканту микроорганизмы нигде не описаны! Еще удивительнее, что контрольные осадки без белого фосфора не зарастали. В отравленной среде микроорганизмам жилось лучше, чем в чистой (табл.2).

Таким образом, в контроле выросло от нуля до пяти колоний, а в опыте при том же разведении образца — не один десяток. По всей видимости, этому парадоксу есть только одно объяснение. Микроорганизмы, растущие на поверхности отравленного осадка, хорошо адаптируются к присутствию белого фосфора. В контрольных субстратах они угнетены другими видами микроорганизмов, а в опытных не имеют конкурентов. Разумеется, этих необыкновенных бактерий требовалось изучить подробнее. Мы произвели посевы на чашки Петри и так впервые получили бактериальные культуры, устойчивые к белому фосфору. Они были идентифицированы как представители родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Streptomyces*.

## Работа с чистыми культурами бактерий, устойчивых к белому фосфору

От работы с осадками сточных вод мы перешли к выращиванию чистых культур открытых микроорганизмов в искусственных средах. Осадки сточных вод имеют важное преимущество перед другими объектами исследования — богатое видовое разнообразие микробного сообщества, позволяющее добиться биodeградации даже такого трудного загрязнителя, как белый фосфор. Однако у осадков сточных вод есть и ряд недостатков: сложный химический состав, но главное — его непостоянство, а значит, и меняющиеся свойства субстрата. Осадки практически не поддаются стандартизации, поэтому количественно их исследовать очень трудно. Следовательно, дальнейшую работу необходимо было вести в искусственных культуральных средах, имеющих стандартный, постоянный состав. Только в таких средах можно выращивать чистые культуры ус-

**Таблица 2**

**Число бактериальных колоний, выросших из осадков сточных вод с белым фосфором или без него**

Разведение образца	10 <sup>7</sup>			10 <sup>8</sup>		
	56	76	70	21	26	21
Опыт	56	76	70	21	26	21
Контроль	5	0	1	0	1	0



тойчивых к токсиканту микроорганизмов, устанавливать их таксономическую принадлежность, получать новые штаммы и, наконец (и это важнейшая задача), вести селекцию микроорганизмов по способности обезвреживать все возрастающие концентрации белого фосфора. Известно, что самый эффективный способ выращивать чистую культуру микроорганизмов-деструкторов с сохранением их свойств — регулярно пересевать ее в среду, содержащую в качестве единственного источника биогенных элементов тот ксенобиотик, который эта культура должна расщеплять. Например, микроорганизмы, обезвреживающие нефть, выращивают в средах, содержащих нефть в качестве единственного источника углерода.

Специально для наших исследований мы разработали культуральную среду, содержащую белый фосфор в качестве единственного источника фосфора. С помощью ультразвука из навески белого фосфора приготавливали белую, как молоко, эмульсию в специальной колбе (разумеется, в атмосфере инертного газа аргона, иначе белый фосфор моментально воспламенился бы), а затем нужный объем эмульсии вносили в среду — так в ней оказывалась требуемая концентрация белого фосфора.

Мы продолжили работать с теми же штаммами бактерий, которые выделили из осадков сточных вод. И нас ожидал сюрприз: сам белый фосфор, химический реактив, оказался обсеменен спорами черного аспергилла (*Aspergillus niger*), который начал беззастенчиво расти в средах и подавлять бактерии (рис.5). Конечно, такой грибок нельзя было оставить без внимания. Возможно, устойчивость к белому фосфору возникла у него давно, раз его споры контактировали с этим веществом долгое время. Мы посеяли грибок на агаризованные питательные среды трех видов: с фосфатом, вообще без источника фосфора и с белым фосфором (рис.6). Через шесть дней на среде с фосфатом выросло много сравнительно мелких колоний, то есть большинство спор

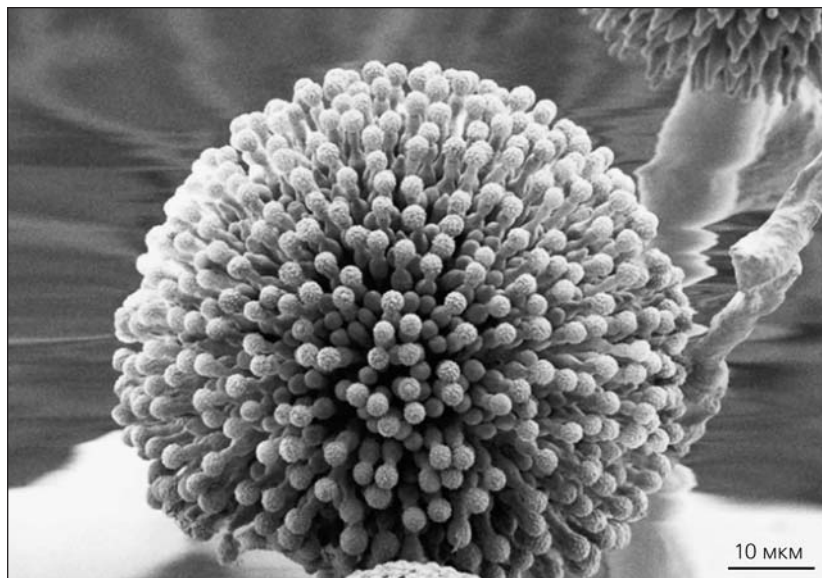


Рис.5. Электронная микрофотография черного аспергилла (*Aspergillus niger*).  
Фото Mogana Das Murtey и Patchamuthu Ramasamy

проросло, что естественно в благоприятных условиях. На среде без источника фосфора выросло мало колоний, которые занимали достаточно большую площадь, но были очень слабыми (практически прозрачные, с неразвитым мицелием и немногочисленными конидиеносцами). По всей видимости, сказалась нехватка фосфора: в самой питательной среде содержится примесь фосфата, но ее недостаточно для полноценного



Рис.6. Первый пересев устойчивого к белому фосфору черного аспергилла (*Aspergillus niger*). Вверху — среда с фосфатом, на которой выросли многочисленные спорообразующие колонии. Слева внизу — среда без источника фосфора с ослабленными колониями. Справа внизу — среда с 0.05% белого фосфора, на которой выросли крупные спорообразующие колонии. Чашки Петри сфотографированы через шесть дней после посева.

роста грибов. Интересно, что на среде с 0.05% белого фосфора колоний хоть и выросло меньше, чем в контроле с фосфатом, однако они производили впечатление совершенно нормальных, не испытывающих дефицита питательных веществ. Похоже, на среде с белым фосфором выживают не все споры гриба, зато выжившие способны использовать в качестве источника фосфора либо сам белый фосфор, либо продукты его химических превращений. Значительный размер колоний, выросших в присутствии белого фосфора, объясняется менее жесткой конкуренцией между немногими адаптировавшимися культурами.

Сравнив последовательность ДНК, выделенной из мицелия гриба, с данными из базы GenBank, мы доказали, что это новый штамм черного аспергилла, и назвали его *Aniger* AM1 [49].

Однако черный аспергилл, как выяснилось, — не единственный микроорганизм, растущий в присутствии белого фосфора. Неплохо живет и бактериям стрептомицетам, хотя их устойчивость и ниже. Сравнение культуры стрептомицетов, выделенной из осадков сточных вод с белым фосфором, которую пересекали либо в среде с белым фосфором, либо в стандартную среду, показало, что в отсутствие белого фосфора устойчивость к нему быстро исчезает.

Прознав о том, что микроорганизмы «кушают» белый фосфор, сотрудники кафедры биохимии Казанского федерального университета попросили проверить свой объект исследования — грибок штамма *Trichoderma asperellum* F-1087. С триходермой они работают много лет: и защищают от вредителей огурцы в совхозе с ее помощью, и выделяют из нее ферменты для стирального порошка, и производят идентичный натуральному ароматизатор с запахом кокоса. Вдруг она и белый фосфор обезвреживать умеет? И правда, триходерма при первом же посеве продемонстрировала

устойчивость к белому фосфору большую, чем у других исследуемых нами микроорганизмов: без предварительной адаптации она сразу начала расти в среде с 1% белого фосфора [37]. Другие микроорганизмы, изученные нами, смогли выдерживать такое количество ядовитого вещества только после нескольких пересевов.

Разумеется, очень важно было обнаружить метаболиты белого фосфора. Раз, как мы увидели благодаря ЯМР-спектроскопии еще в начале своих исследований, белый фосфор в средах с микроорганизмами исчезает, значит, должны накапливаться продукты его превращений. По их спектрам можно судить о путях метаболизма белого фосфора, а также о перспективах и целесообразности практического внедрения его биодegradации. Зачастую продукты метаболизма какого-либо вещества оказываются более опасными, чем исходный субстрат (так называемые летальные метаболиты), что накладывает ограничения на применение метода.

Долгое время мы не могли зарегистрировать потенциальные метаболиты с помощью ядерно-магнитного резонанса, ведь они присутствуют в среде в следовых концентрациях. Однако затем нам помог сотрудник химического факультета Казанского федерального университета Х.Р.Хаяров. Он сумел снять изумительные спектры, на которых прекрасно видны сигналы метаболитов. Гипофосфит, фосфит... фосфат! Фосфат, основа обмена веществ в любой клетке. И в культуральной среде фосфату неоткуда было взяться — только из белого фосфора, внесенного изначально. Страшнейший яд белый фосфор превратился в фосфорное удобрение! Стадии этого процесса представлены на схеме предполагаемого метаболического пути белого фосфора (рис.7).

К сожалению, мы до сих пор не знаем, как именно это происходит. Возможно, белый фосфор окисляется чисто химическим путем, а живые клетки включают в свой метаболизм уже продукты его окисления. Удаляя их из окружающей среды, микроорганизмы смещают химическое равновесие в сторону дальнейшего окисления белого фосфора (согласно принципу Ле Шателье для равновесных систем) — и таким образом ускоряют его деградацию. Вероятно, такой механизм биодegradации имеет место, но, возможно, существует и дополнительный путь, намного более интересный для биологов, — синтез ферментов с неизвестным видом активности, для которых белый фосфор служит субстратом. Их обнаружение (или обнаружение новой

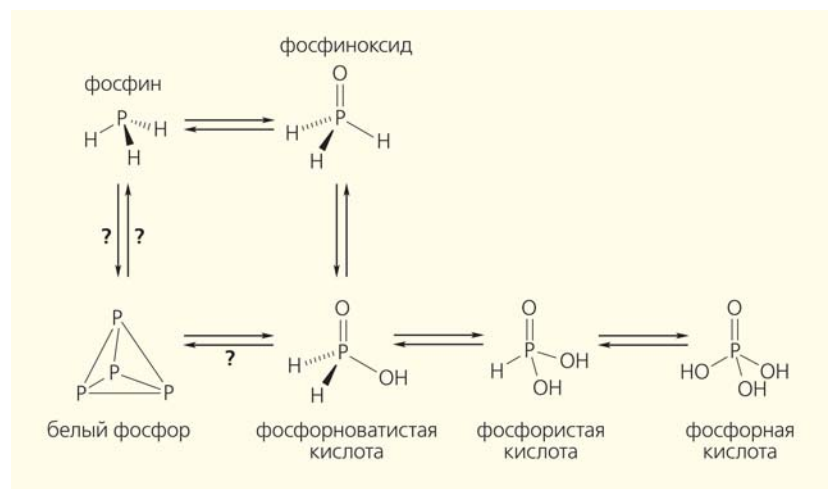


Рис.7. Предполагаемый метаболический путь белого фосфора. Знаком вопроса обозначены еще не обнаруженные превращения.

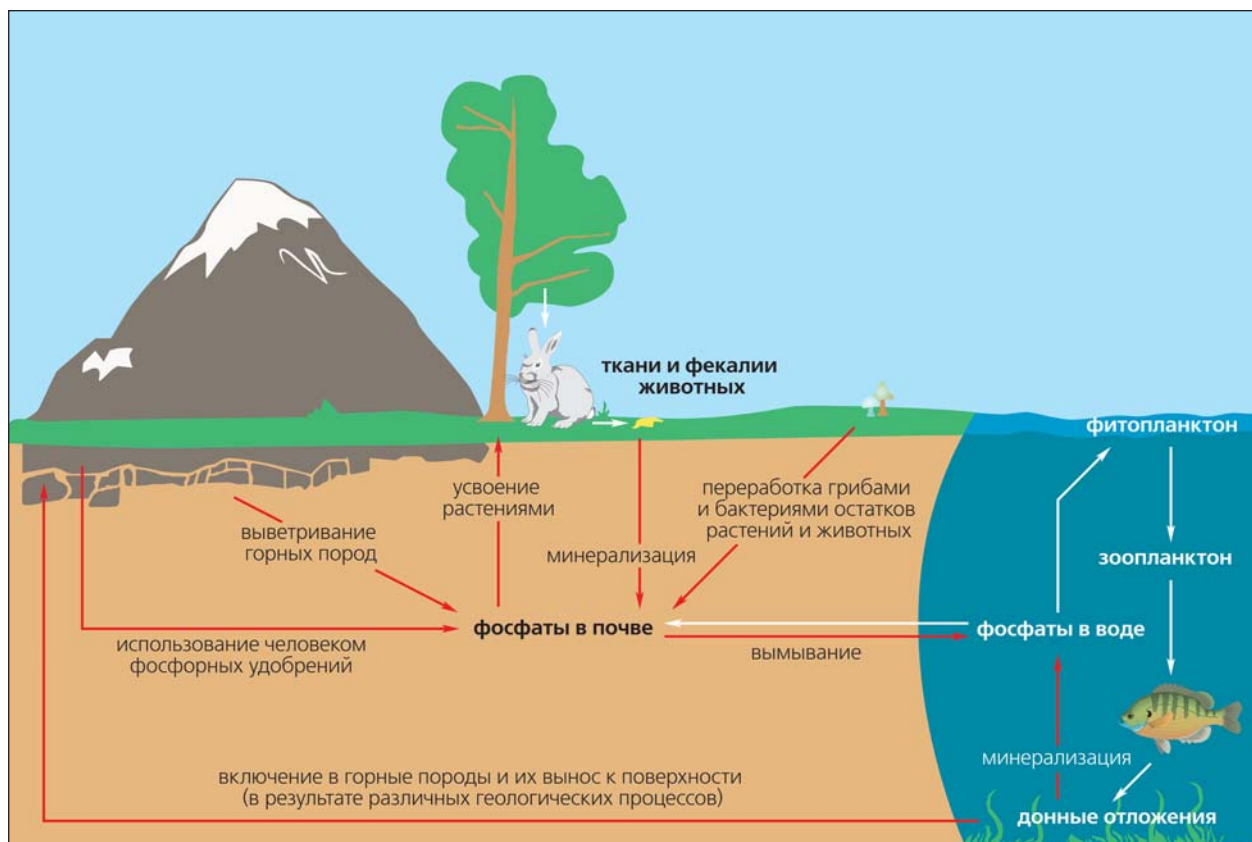


Рис.8. Круговорот фосфора в природе.

активности у уже известных ферментов) стало бы значительным фундаментальным достижением, причем вполне реалистичным, учитывая разнообразие специфических ферментов с уже установленными экзотическими активностями. Причем оба представленных механизма биodeградации не исключают друг друга, а, напротив, отлично сочетаются.

Бактерии *Pseudomonas alcaliphila*, выделенные из осадков сточных вод с белым фосфором, высевали на среды идентичного состава, содержащие 0.01 или 0.05% белого фосфора. Оптическую плотность культуры измеряли на фотоэлектроколориметре. Выяснилось, что псевдомонады, в отличие от аспергилла и стрептомицетов, не растут в средах, содержащих белый фосфор в качестве единственного источника фосфора. То есть организмы из разных таксономических групп имеют различную устойчивость к белому фосфору. Мы уже знали, что бактерии рода *Bacillus* выживают при концентрации белого фосфора в осадках сточных вод 0.1%, но только за счет сильного замедления метаболизма и темпа размножения, а не за счет эффективной деструкции этого вещества. Это оказалось справедливым и для *P.alcaliphila*. Различия в устойчивости к белому фосфору — серьезный аргумент в пользу того, что это вещество разлагается под действием ферментных систем (ко-

торые различаются у разных микроорганизмов), а не только за счет абиотического окисления.

Подчеркнем: биodeградация белого фосфора — задача не только прикладная, но и фундаментальная. Фосфор как биогенный элемент включен в биогеохимический круговорот веществ в биосфере Земли. Исследования последних лет значительно расширили наши представления о круговороте фосфора в природе (рис.8).

Выяснилось, что в него вступают не только фосфаты, но и фосфин, гипофосфиты, фосфиты, природные и антропогенные тиофосфаты, фторфосфаты, фосфорамиды, фосфорорганические соединения [38]. За исключением элементного фосфора, о метаболизме которого почти ничего не известно. Элементный фосфор в некотором смысле остается слабым звеном круговорота. Поэтому осуществление биологической деградации элементного фосфора — задача, без сомнения, важная.

Делая пересевы микроорганизмов с интервалом в среднем 60 дней, мы добились роста устойчивости. Наилучшую приспособляемость к белому фосфору проявили именно стрептомицеты (штамма А8). Через пять последовательных пересевов их устойчивость возросла пятикратно. Грибы растут и адаптируются медленнее: после восьми пересевов устойчивость аспергилла повысилась только вдвое, а триходермы — вообще не из-



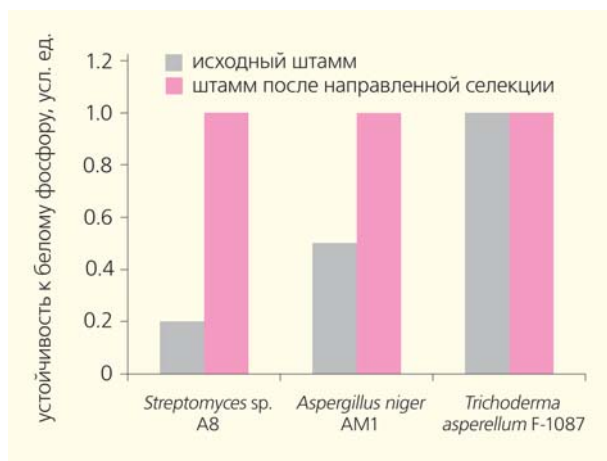


Рис.9. Адаптация и рост устойчивости микроорганизмов к белому фосфору после направленной селекции.

менилась. Однако она изначально была выше, чем у стрептомицетов [39] (рис.9).

Нам удалось вырастить микроорганизмы в среде, где концентрация белого фосфора достигала 1%. Согласно патенту [40], концентрация белого фосфора в сточных водах предприятий не

должна превышать 0.0002%. Стало быть, 1% — это превышение предельно допустимой концентрации белого фосфора в сточных водах в 5000 раз. А предельно допустимая концентрация элементарного фосфора в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, согласно данным из [41], составляет всего 0.0001 мг/л, то есть концентрация 1% превышает ее уже в сто миллионов ( $1 \times 10^8$ ) раз! Сам факт устойчивости микроорганизмов к такой концентрации токсиканта удивителен и демонстрирует уникальные приспособительные возможности живых организмов. Более того, грибы в этих условиях даже размножались, хотя споры созревали заметно медленнее и в меньшем количестве.

Вполне возможно, что концентрация 1% — не предельная и после продолжительной селекции возможен рост и в средах с более высокими концентрациями белого фосфора. Проверка этого сдерживается исключительно соображениями техники безопасности: с ростом концентрации горячие эмульсии белого фосфора становятся все опаснее в обращении. Следовательно, для приготовления культуральных сред с более высокими концентрациями белого фосфора требуется разработать новый метод его внесения.

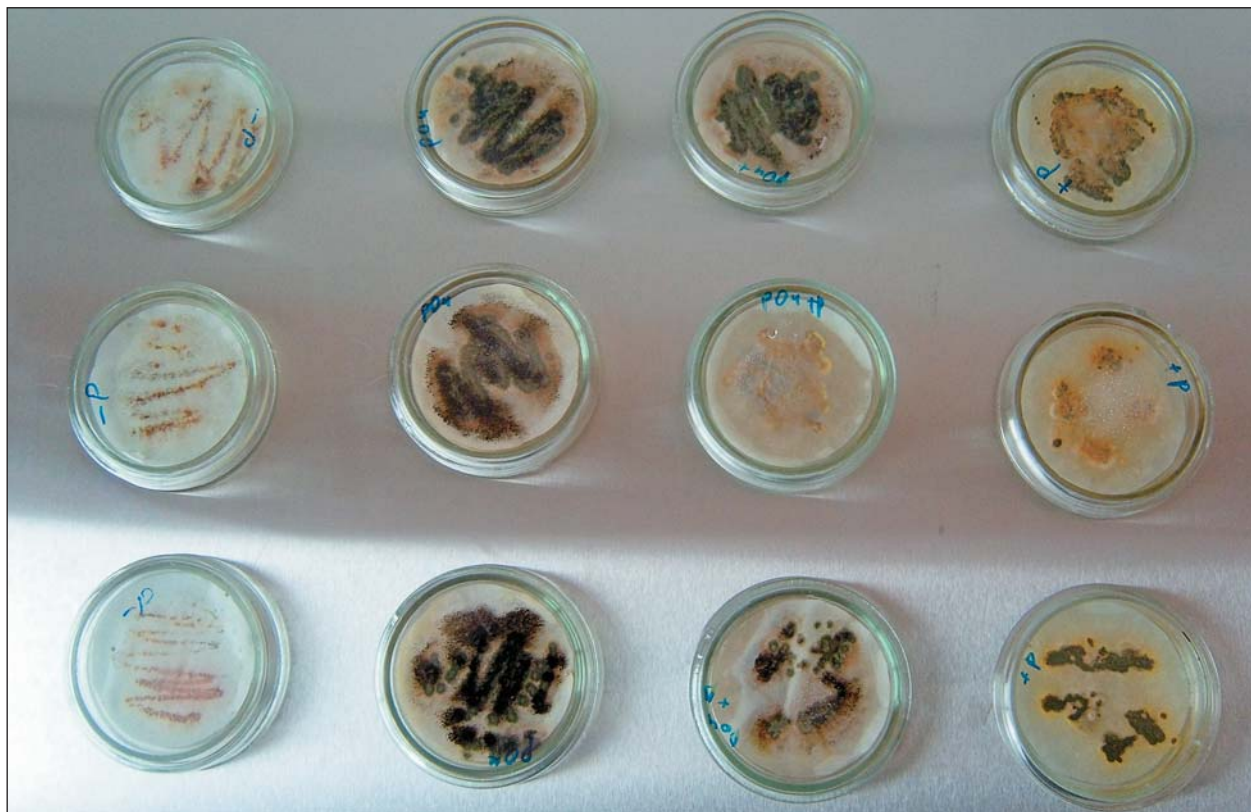


Рис.10. Первый пересев устойчивых *Aspergillus niger* AM1 в четыре варианта среды. Ряды слева направо: первый — среда без источников фосфора, второй — среда с фосфатом, третий — среда с белым фосфором в концентрации 0.2% и одновременно с фосфатом в той же концентрации, четвертый — среда с одним только белым фосфором в концентрации 0.2%. Снимок сделан через 11 дней после посева.

Очень интересный результат получился при посеве черного аспергилла штамма AM1 в среду, содержащую не один, а сразу два источника фосфора — белый фосфор в концентрации 0.2% и фосфат в той же концентрации. Для сравнения грибок пересевался еще на среду совсем без источника фосфора, на среду с фосфатом и на среду с 0.2% белого фосфора (рис.10). До этого мы пересевали грибок либо только на белый фосфор, либо только на фосфат. Как и раньше, в среде без источников фосфора грибок расти не смог. Зато в среде с фосфатом рос замечательно, только вот культура его оказалась не чистой: в благоприятных условиях выросли еще и грибы других видов, образуя колонии не черного, а зеленого и кремового оттенков. Результаты посева в среду с одним только белым фосфором больше нас не изумляли, поскольку повторяли полученные ранее. По-настоящему удивительным было то, что в среде с фосфатом и белым фосфором грибок рос так же интенсивно, как на одном фосфате. Никакого замедления в развитии, никаких изменений во внешнем виде колоний! А вот микроорганизмы других видов в таких условиях выжить не смогли, культура черного аспергилла получилась чистой. Получается, что *Aniger* AM1 не просто устойчив к белому фосфору, а вообще не считает это вещество токсичным. Отставание в развитии в отсутствие фосфата в данном случае объясняется не токсическим действием белого фосфора, а его труднодоступностью в качестве источника биогенного элемента. Поскольку споры *Aniger* AM1 были выделены нами из реактива белого фосфора, этот грибок, наверное, уже давно контактировал с ним и выработал устойчивость задолго до нашего исследования.

Наш коллега генетик Э.В.Бабынин решил исследовать генотоксичность белого фосфора и содержащих его культу-

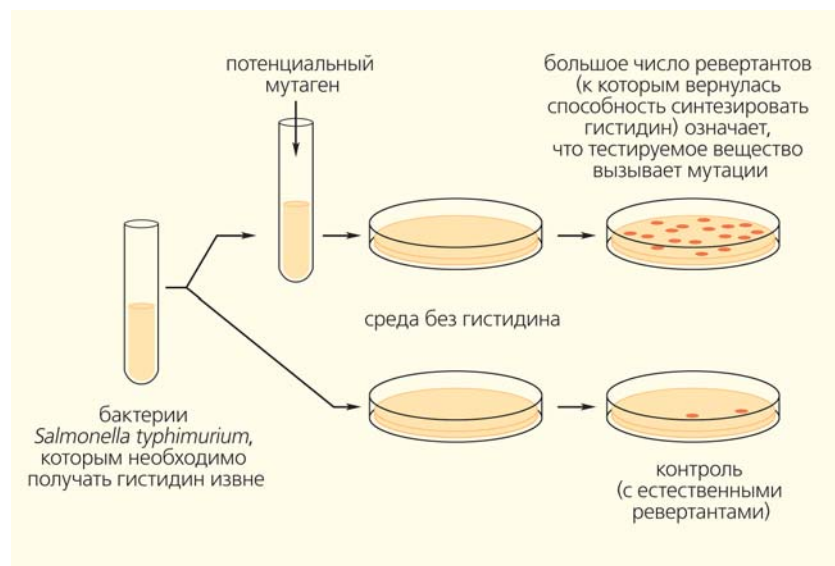


Рис.11. Схема, иллюстрирующая принцип теста Эймса на генотоксичность. Используют мутантный штамм бактерии *Salmonella typhimurium*, который не способен синтезировать аминокислоту L-гистидин, в отличие от дикого штамма. Когда в культуральную среду с мутантным штаммом добавляют вещество, обладающее генотоксичностью (то есть повреждающее ДНК и повышающее частоту мутаций), в популяции возрастает (по сравнению с контролем) число бактерий, претерпевших так называемые обратные мутации, благодаря чему к ним вернулась способность вырабатывать гистидин, а значит, и способность расти в его отсутствие. Частота таких обратных мутаций напрямую зависит от генотоксичности внесенного вещества.

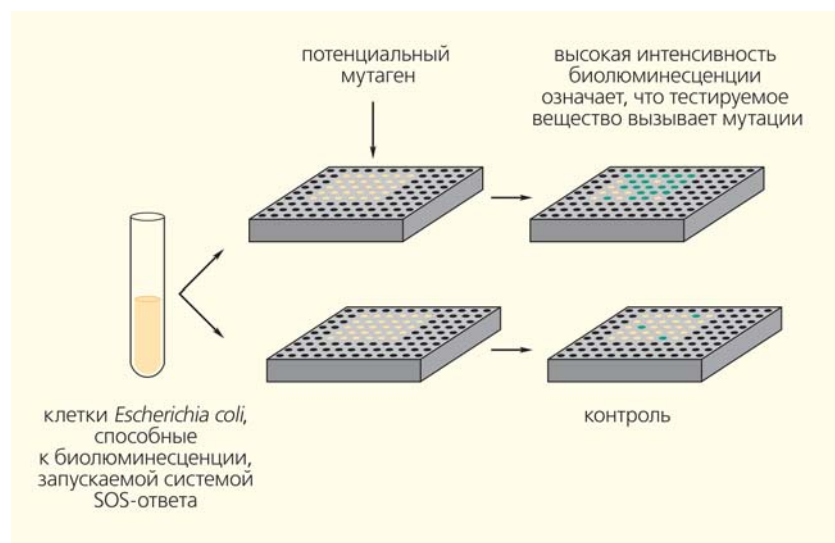


Рис.12. Схема, иллюстрирующая принцип SOS-lux теста на генотоксичность. Используют рекомбинантный штамм *Escherichia coli*, способный к биолюминесценции, запускаемой системой SOS-ответа клеток. Эта система активируется при появлении в структуре ДНК повреждений или при нарушении процесса репликации, то есть, например, после облучения ультрафиолетом или воздействия химическим мутагеном. Интенсивность SOS-ответа клетки зависит от степени повреждения ДНК. В тесте к клеткам такого штамма добавляют вещество, потенциально обладающее генотоксичностью, и измеряют интенсивность SOS-ответа по интенсивности биолюминесценции (сравнивая с контролем).

ральных сред. В литературе утверждается, что генотоксическими свойствами белый фосфор не обладает [42–44]. Бабынин провел классический тест Эймса (рис.11), и результат оказался отрицательным. Количество мутантов у тестового штамма *Salmonella typhimurium* не изменилось по сравнению с контролем. Однако так называемый SOS-lux тест (рис.12) выявил, напротив, по-

ложительный результат, подтвердив генотоксичность белого фосфора.

В ближайшее время мы планируем сравнить экспрессию генов грибов, выросших на белом фосфоре и на фосфате, а также проанализировать последовательности ДНК микроорганизмов, устойчивых к белому фосфору, чтобы выяснить, какие гены задействованы в биодegradации этого яда. ■

Авторы выражают глубочайшую признательность Ф.К.Алимовой, Э.В.Бабынину, Е.В.Горбачук, Х.Р.Хаярову, С.Т.Минзановой, Н.В.Кулик, Л.Г.Мироновой, Д.Е.Белостоцкому и К.А.Сапармырадову, а также О.Д.Фоминых, М.Х.Гайнутдинову, Л.С.Курмановой, А.Ю.Аккизову, А.И.Курдюкову и патентно-лицензионному отделу Казанского федерального университета за неоценимую помощь в работе.

## Литература

1. Neilson A.H., Allard A.S. Environmental degradation and transformation of organic chemicals. NY, 2007.
2. Khomenkov V.G., Shevelev A.B., Zbukov V.G. et al. Organization of metabolic pathways and molecular-genetic mechanisms of xenobiotic biodegradation in microorganisms: a review // Prikl. Biokhim. Mikrobiol. 2008. V.44. P.133–152.
3. Мундубаев А.З., Яхваров Д.Г. Биодegradация как метод переработки отходов. Часть 1. Биодegradация ксенобиотиков // Бутлеровские сообщения. 2013. Т.33. С.1–37.
4. Utkina N.K., Denisenko V.A., Scholokova O.V. et al. Spongiadioxins A and B, two new polybrominated dibenzo-p-dioxins from an Australian marine sponge *Dysidea dendyi* // J. Nat. Prod. 2001. V.64. P.151–153.
5. Reddy M.M., Deighton M., Gupta R.K. et al. Biodegradation of oxo-biodegradable polyethylene // J. Appl. Polym. Sci. 2008. V.111. P.1426–1432. Doi:10.1002/app.29073.
6. Gribble G.W. Naturally occurring organohalogen compounds — a comprehensive update. Wien, 2010.
7. Swenberg J.A., Lu K., Moeller B.C. et al. Endogenous versus exogenous DNA adducts: their role in carcinogenesis, epidemiology, and risk assessment // Toxicol. Sci. 2001. V.120. P.130–145. Doi:10.1093/toxsci/kfq371.
8. Eckert C., Xu W., Xiong W. et al. Ethylene-forming enzyme and bioethylene production // Biotechnol. Biofuels. 2014. V.7. P.33. Doi:10.1186/1754-6834-7-33.
9. Мундубаев А.З., Яхваров Д.Г. Биодegradация как метод переработки отходов. Часть 2. Взгляд на проблему. Являются ли ксенобиотики ксенобиотиками? // Бутлеровские сообщения. 2013. Т.34. С.1–20.
10. Zhang Y., Love N., Edwards M. Nitrification in drinking water systems // Crit. Rev. Env. Sci. Technol. 2009. V.39. P.153–208. Doi:10.1080/10643380701631739.
11. Huber B., Herzog B., Drewes J.E. et al. Characterization of sulfur oxidizing bacteria related to biogenic sulfuric acid corrosion in sludge digesters // BMC Microbiol. 2016. V.16. P.153. Doi: 10.1186/s12866-016-0767-7.
12. Hausinger R.P. New insights into acetone metabolism // J. Bacteriol. 2007. V.189. P.671–673. Doi:10.1128/JB.01578-06.
13. Strobel G., Knighton B., Kluck K. et al. The production of myco-diesel hydrocarbons and their derivatives by the endophytic fungus *Gliocladium roseum* (NRRL 50072) // Microbiology. 2008. V.154. P.3319–3328. Doi:10.1099/mic.0.2008/022186-0.
14. Stinson M., Ezra D., Hess W.M. et al. An endophytic *Gliocladium* sp. of *Eucryphia cordifolia* producing selective volatile antimicrobial compounds // Plant Science. 2003. V.165. P.913–922. Doi:10.1016/S0168-9452(03)00299-1.
15. Vanelslander B., Paul C., Grueneberg J. et al. Daily bursts of biogenic cyanogen bromide (BrCN) control biofilm formation around a marine benthic diatom // PNAS. 2012. V.109. P.2412–2417. Doi:10.1073/pnas.1108062109.
16. van Niftrik L., Jetten M.S.M. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: unique microorganisms with exceptional properties // Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2012. V.76. P.585–596. Doi:10.1128/MMBR.05025-11.
17. Skubatz H., Kunkel D.D., Howald W.N. et al. The *Sauromatum guttatum* appendix as an osmophore: excretory pathways, composition of volatiles and attractiveness to insects // New Phytol. 1996. V.134. P.631–640.
18. Wiig J.A., Hu Y., Lee C.C., Ribbe M.W. Radical SAM-dependent carbon insertion into the nitrogenase M-cluster // Science. 2012. V.337. P.1672–1675. Doi:10.1126/science.1224603.
19. Pavani K.V., Kumar N.S., Sangameswaran B.B. Synthesis of lead nanoparticles by *Aspergillus* species // Pol. J. Microbiol. 2012. V.61. P.61–63.
20. Clement B.A., Goff C.M., Forbes T.D.A. Toxic amines and alkaloids from *Acacia berlandieri* // Phytochemistry. 1997. V.46. P.249–254.
21. Duque C., Bonilla A., Bautista E., Zea S. Exudation of low molecular weight compounds (thiobismethane, methyl isocyanide, and methyl isothiocyanate) as a possible chemical defense mechanism in the marine sponge *Ircinia felix* // Biochem. Syst. Ecol. 2001. V.29. P.459–467.



22. Jarosławiecka A., Piotrowska-Seget Z. Lead resistance in micro-organisms // Microbiology. 2014. V.160. P.12–25. Doi:10.1099/mic.0.070284-0.
23. Velázquez F., Manríquez R., Maya L. et al. Phenacetin isolated from *Bursera grandifolia*, a herbal remedy with antipyretic properties // Nat. Prod. Commun. 2009. V.4. P.1575–1576.
24. Smith E.A., Macfarlane G.T. Formation of phenolic and indolic compounds by anaerobic bacteria in the human large intestine // Microb. Ecol. 1997. V.33. P.180–188.
25. Lewis T.A., Crawford R.L. Transformation of carbon tetrachloride via sulfur and oxygen substitution by *Pseudomonas* sp. strain KC // J. Bacteriol. 1995. V.177. P.2204–2208.
26. Hazen S.L., Hsu F.F., Mueller D.M. et al. Human neutrophils employ chlorine gas as an oxidant during phagocytosis // J. Clin. Invest. 1996. V.98. P.1283–1289.
27. Kladi M., Vagias C., Roussis V. Volatile halogenated metabolites from marine red algae // Phytochem. Rev. 2004. V.3. P.337–366. Doi:10.1007/s11101-004-4155-9.
28. Taylor T.B., Mulley G., Dills A.H. et al. Evolutionary resurrection of flagellar motility via rewiring of the nitrogen regulation system // Science. 2015. V.347. P.1014–1017. Doi:10.1126/science.1259145.
29. Seeger M., Hernández M., Méndez V. et al. Bacterial degradation and bioremediation of chlorinated herbicides and biphenyls // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2010. V.10. P.320–332. Doi:10.4067/S0718-95162010000100007.
30. Наумова Р.П. Микробный метаболизм неприродных соединений. Казань, 1985.
31. Амиров Д.Л. Комплексное лечение гнойно-воспалительных заболеваний мягких тканей у рабочих фосфорного производства: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. Бишкек, 1993.
32. Roebuck B.D., Nam S.I., Macmillan D.L. et al. Toxicology of white phosphorus (P<sub>4</sub>) to ducks and risk for their predators: effects of particle size // Environ. Toxicol. Chem. 1998. V.17. P.511–518.
33. Медведев Ю., Басин Е. Фосфорные некрозы челюстей // Врач. 2012. Т.1. С.21–25.
34. Бадюгин И.С. Зажигательные и токсические свойства фосфора. Уроки Львовской аварии // Военно-медицинский журнал. 2009. Т.9. С.20–26.
35. Spraggord R.J., Podoll R.T., Rewick R. et al. Environmental fate of white phosphorus/felt and red phosphorus/butyl rubber military screening smokes. Menlo Park, 1983.
36. Миндубаев А.З., Акосах Й.А., Алимова Ф.К. и др. О разложении белого фосфора осадком сточных вод // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2011. Т.153. С.110–119.
37. Миндубаев А.З., Алимова Ф.К., Волошина А.Д. и др. Способ детоксикации белого фосфора с применением штамма микроорганизмов *Trichoderma asperellum* ВКПМ F-1087: пат. 2603259. Российская Федерация. 2016. Бюл. 33.
38. Singh B.K., Walker A. Microbial degradation of organophosphorus compounds // FEMS Microbiol. Rev. 2006. V.30. P.428–471.
39. Миндубаев А.З., Волошина А.Д., Горбачук Е.В. и др. Адаптация микроорганизмов к белому фосфору как результат направленной селекции. Генетическая идентификация устойчивого аспергилла и метаболическое профилирование стрептомицета А8 // Бутлеровские сообщения. 2015. Т.44. С.1–28.
40. Barber J.C. Processes for the disposal and recovery of phosphy water: US Patent. US5549878. 1996.
41. Алексеенко В.А., Бузмаков С.А., Панин М.С. Геохимия окружающей среды. Пермь, 2013.
42. Toxicological profile for white phosphorus. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1997.
43. Dacre J.C., Rosenblatt D.H. Mammalian toxicology and toxicity to aquatic organisms of four important types of waterborne munitions pollutants: an extensive literature evaluation. US Army Medical Bioengineering Research & Development Laboratory, 1974.
44. Burrows D., Dacre J.C. Mammalian toxicology and toxicity to aquatic organisms of white phosphorus and «phosphy water» a waterborne munitions manufacturing waste pollutant — a literature evaluation. Associated Water and Air Resources Engineers Inc., 1973.

# Подготовка молодых бакланов для рыбного промысла в Китае

Т.А.Обозова







Рыбак с бакланами на р.Ли.  
Здесь и далее фото автора



**Татьяна Анатольевна Обозова**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии и генетики поведения при кафедре высшей нервной деятельности биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — элементарное мышление животных, поведение птиц в природе.

**Ключевые слова:** подготовка молодых бакланов, ловля рыбы с бакланами в Китае.  
**Key words:** young cormorant training, cormorant fishing in China.

На некоторых водоемах в южной части Китая можно увидеть довольно странную картину — по воде движутся лодки, от бортов которых в обе стороны отходит ряд палок длиной около метра. На каждой из них сидит пара больших бакланов (*Phalacrocorax carbo*) — птиц, которые питаются рыбой, добывая ее во время плавания под водой. Караван лодок приплывает к месту лова, и тогда хозяин, который до этого просто приглядывал за порядком, одну за другой отправляет птиц в воду. Птицы заноривают и спустя несколько секунд одна за другой появляются на поверхности с рыбой в горловом мешке. Хозяин по очереди поднимает птиц в лодку, протягивая им шест, на который птицы залезают. В лодке он забирает у птиц рыбу, а потом заново отпускает их в воду рыбачить. Учить бакланов ловить рыбу не надо — эта способность у них врожденная. А вот чтобы они делали это для человека и вместе с ним, нужно выработать у птиц определенные формы поведения, для чего необходимо тонкое понимание их природы.

Целью нашей работы было выяснить все особенности выращивания и тренировки молодых бакланов для работы в качестве ловчих птиц\*. Для этого проведены опрос 24 рыбаков с бакланами в трех регионах Юго-Восточного Китая и наблюдения за этим процессом на специализированной ферме на оз.Вэйшань в округе Цзинин провинции Шаньдун (пиньинь: Wēishān hú, Jining, Shāndōng). В результате нам удалось описать все стадии процесса подготовки молодых птиц к участию в промысле и сопоставить эти наблюдения с представлениями современной этологии и нейробиологии о закономерностях индивидуального развития (онтогенеза) птиц.

Ловля рыбы с помощью бакланов существует в Китае много столетий. Первое упоминание об этом датируется концом XI в. Наиболее полное описание выращивания и промысла с использованием этих птиц дано в монографии немецкого и американского востоковеда Б.Лауфера (1874–1934) «Доместикация бакланов в Китае и Японии» [1]. Мы использовали сведения из этой книги, чтобы сравнить прежние методы подготовки молодых бакланов с современными и выяснить, какие изменения произошли за последние почти 90 лет.

\* На основе собранного во время экспедиции материала подготовлен фильм «Крылатые рыбаки» (режиссер Т.А.Обозова), получивший в 2015 г. приз «за лучший научно-популярный фильм» на 14-м Байкальском международном фестивале документальных и научно-популярных фильмов «Человек и природа» имени В.Г.Распутина ([www.baikalkinofest.ru/video/detail.php?ID=147](http://www.baikalkinofest.ru/video/detail.php?ID=147)). — *Примеч. ред.*



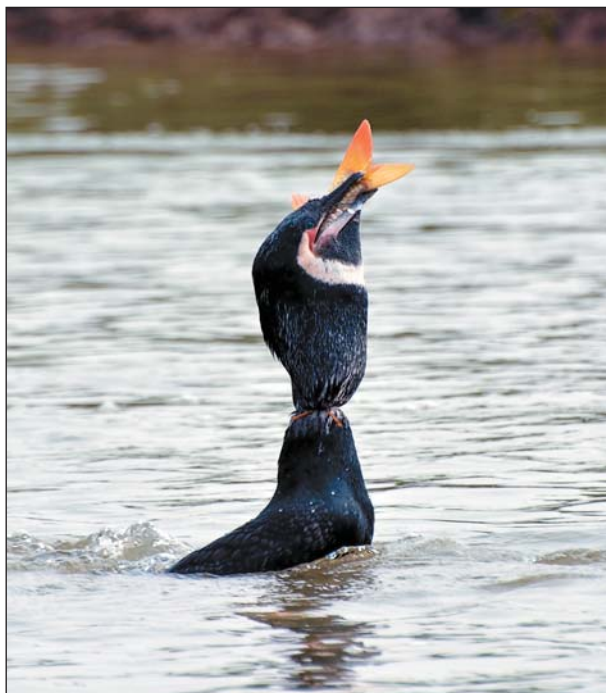
## Современное состояние традиции ловли рыбы с помощью бакланов в Юго-Восточном Китае

В настоящее время эта традиция постепенно исчезает, хотя еще остались рыбаки, которые умело используют птиц, зная тонкости их поведения, и передают эти знания из поколения в поколение. Мы не встретили ни одного рыбака с бакланами, отец которого не занимался бы этим делом.

В каждом регионе Юго-Восточного Китая рыбалка с бакланами имеет свои особенности, что может выражаться в количестве рыбацких лодок, принимающих в ней участие, и особенностях их конструкции; в количестве птиц у каждого рыбака; в способах обнаружения и облавливания участка водоема, богатого рыбой, и т.д. Но суть рыбалки с бакланами, а именно особенности использования подготовленных бакланов, остаются неизменными.

На оз.Вэйшань лодка рыбака с бакланами представляет собой плавучий насест: по периметру судна примерно в метре друг от друга расположены «присады» — толстые деревянные палки длиной около метра, на каждой из которых сидят по два баклана. Птицы хорошо знают друг друга, ладят между собой, иногда это семейная пара.

Рыбаки едут к месту лова, друг за другом прицепившись к лодке с мотором. Прибыв к месту лова, они разъединяются, перевязывают бакланам горло соломой и сгоняют их с лодки в воду. Оказалось, что во все времена в разных местах



Баклан с пойманной рыбой. Проглотить он ее не может, так как горло перевязано соломой.

Китая, чтобы перевязать горло баклану, использовали различные материалы: солому, коноплю, лыко, бечевку, бамбук, ротанг и даже железо [1]. Рыбаки начинают двигаться на лодках все вместе по часовой стрелке, описывая круг диаметром около 50 м. При этом, чтобы вспугнуть рыбу, они время от времени бьют веслами по воде, сопровождая это выкриками. Бакланы плывут вдоль лодок стаями, периодически занывая и выныривая с рыбой или без нее. Когда горловой мешок баклана наполняется рыбой, рыбак достает птицу из воды с помощью бамбукового шеста или сачка с длинной бамбуковой ручкой, забирает улов и снова отпускает в воду. Такое круговое движение длится около часа. Обловив один участок, рыбаки сажают птиц на лодки и перевозят на другое место. Весь процесс рассаживания бакланов по местам в лодках занимает не больше 10 мин, хотя при этом каждому рыбаку нужно перенести из воды на бамбуковом шесте своих 20–25 птиц из 300, плавающих вокруг. Это возможно только благодаря тому, что бакланы, по словам рыбаков, хорошо отличают своего хозяина и свою лодку от других. Птицы очень хорошо понимают, что сейчас их будут рассаживать по местам и собираются у своих лодок, как только закончилось движение. В свою очередь, рыбак знает каждую из своих птиц (и отличает их от остальных 300!).

На оз.Поян (пиньинь: Póuyáng hú) — крупнейшем в Китае пресноводном озере, расположенном в провинции Цзянси (пиньинь: Jiāngxī), — рыбацат семьями (муж и жена). Для рыбалки каждая семья использует две лодки. На моторной (так же, как и у рыбаков на оз.Вэйшань) на присадах сидят по два баклана, всего 20–25 птиц. За моторной на буксире идет маленькая весельная лодка. Прибыв на место, рыбак перевязывает горло бакланам сухой соломой на три узла и сбрасывает их в воду. Далее на весельной лодке он движется по узкой и неглубокой озерной протоке. Сопровождающие его лодку бакланы ловят рыбу, рыбак достает их из воды с помощью бамбукового шеста или сачка с длинной бамбуковой ручкой, забирает улов и снова бросает в воду. Если в процессе лова баклан схватил и удержал крупную рыбу (заглотить ее он не может из-за размера), то в этом случае птицу не достают, а просто захватывают рыбу сачком прямо в воде, рыбак взамен поощряет баклана мелкой рыбкой.

Рыбалка длится около шести–восьми часов подряд, с одним небольшим перерывом для переезда в новое место. После ее окончания улов из весельной лодки перекладывают в моторную. Птицам развязывают горло, кормят их мелкой рыбой из весельной лодки, после чего рассаживают по присадам.

Рыбалка в обоих регионах проводится круглогодично, с небольшими особенностями в октябре и ноябре. В эти месяцы бакланы линяют, и поэтому птицам не перевязывают горло — весь улов

позволяют съесть, за исключением крупной рыбы, которую они не могут проглотить.

На р. Ли (пиньинь: Lí jiāng), одного из основных истоков р. Сицзян (пиньинь: Xī jiāng), рыболовного промысла с бакланами как такового уже нет. Рыбаки зарабатывают тем, что фотографируют туристов с птицами или сами позируют для фотографов. Между тем, будучи потомственными рыбаками, они прекрасно знают особенности поведения и тренировки бакланов, которые передали им их родители.

В течение столетий бакланов в Китае разводили в неволе. Известно, что фермы по выращиванию этих птиц существовали с 1848 г. [1]. Одна такая ферма располагалась в 30–40 км от Шанхая [1]. Размножение бакланов в неволе привело к формированию особой domesticiрованной популяции. В ней бакланы отличаются от своих диких сородичей особенностями поведения, физиологии и окраски. Так, в настоящее время у рыбаков на оз. Поян и на р. Ли встречаются абсолютно белые бакланы. Нам довелось видеть сразу четырех белых птиц с небольшим количеством черных пятен на лапах. По словам рыбаков, на сто черных птиц рождается одна белая.



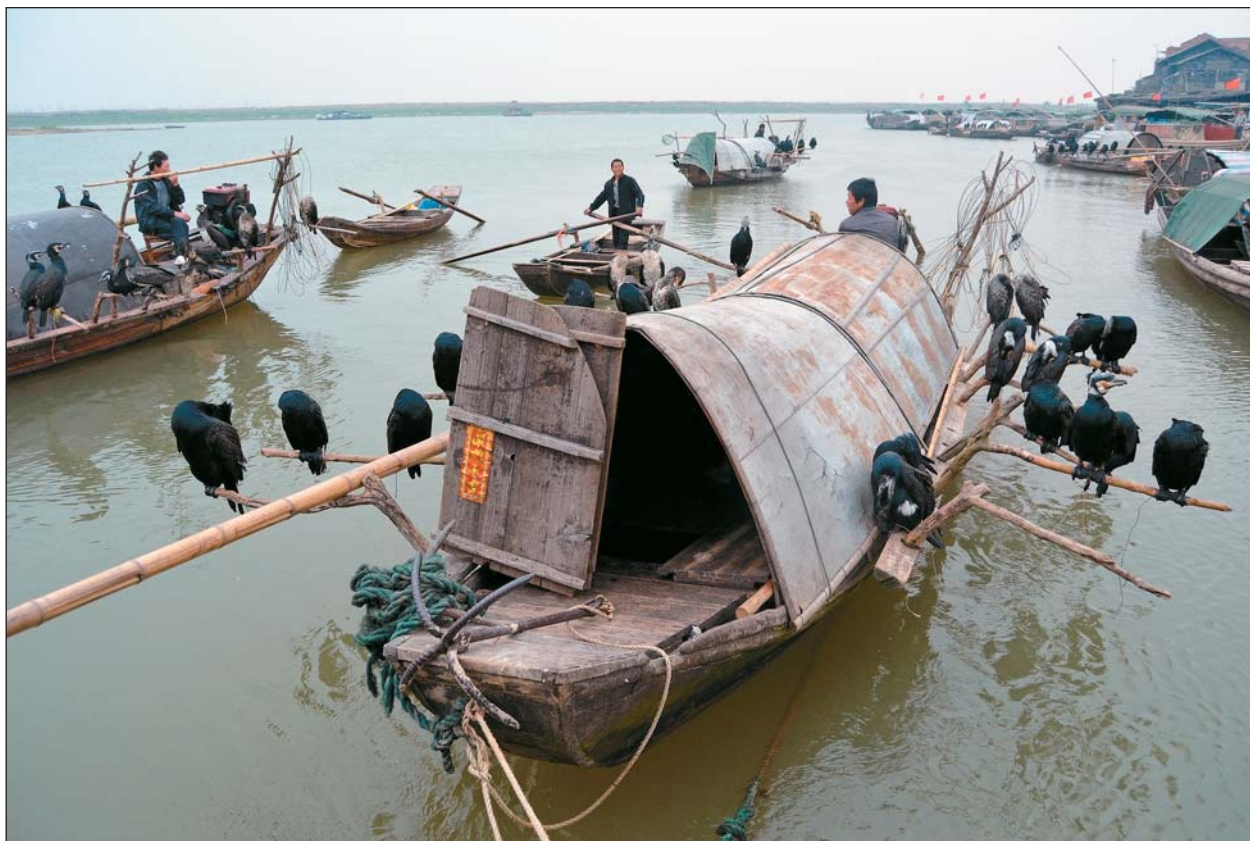
Бакланы на присадах в рыболовецкой лодке на оз. Поян.

Что касается влияния domestикации на физиологию птицы, то это изменения в переносимости холода у молодых птиц и изменения размеров взрослых самок. Почти век назад domesticiрованные самки баклана были немного меньше и, следовательно, слабее самцов, они стоили дешевле и покупались менее охотно [1]. Сейчас самцы и самки размерами не различаются и стоят одинаково (от 200 долл. США и более за птицу). Вероятно, в последние десятилетия на фермах в размно-



Буксировка лодок с бакланами к месту рыбалки на оз. Вэйшань.





Классическая рыболовецкая лодка на оз.Поян. Бакланы живут на ней постоянно, оставаясь на присадах.

жение пускали преимущественно более крупных самок, чтобы добиться увеличения их размера и, как следствие, цены.

Рыбаки уверяют, что молодые, до полугода, птицы мерзнут в воде, и поэтому они начинают пускать молодых бакланов в воду надолго только с этого возраста. Тогда они начинают рыбачить вместе со взрослыми птицами. В противоположность этому, дикие молодые бакланы покидают свои гнезда в возрасте полутора месяцев и сразу начинают самостоятельно добывать себе корм при температуре воды даже в 4°C. Возможно, у домашних бакланов такая способность к холодовой адаптации была утрачена.

Значительные изменения произошли и в поведении одомашненных бакланов. По словам рыбаков, домашние бакланы, в отличие от диких, не клюются. А на вопрос, заданный рыбакам: «Почему вы покупаете бакланов на ферме, а не берете птенцов или яйца из гнезда диких птиц», они отвечали так: «Вы же, когда хотите завести собаку, берете щенка из питомника, а не идете в лес, чтобы взять волчонка из логова».

На оз.Вэйшань некоторые рыбаки самостоятельно выращивают птенцов баклана (полученных от своих рабочих птиц), другие предпочитают покупать уже подросших и тренированных птиц на ферме. На оз.Поян, как и на р.Ли, ни одна рыбацкая

семья не занимается самостоятельным разведением бакланов. Они покупают их на ферме на оз.Вэйшань. Ее хозяин познакомил нас со всеми стадиями выращивания и тренировки молодых бакланов от момента их вылупления до начала использования в качестве ловчих птиц, т.е. до шестимесячного возраста. Видимо, в настоящее время процесс тренировки птиц происходит быстрее, чем раньше [1].

### Этапы выращивания и тренировки молодых бакланов

Основываясь на личных наблюдениях, сведениях, полученных от хозяина фермы, и на результатах опроса рыбаков, поэтапно процесс выращивания и тренировки молодых бакланов можно описать следующим образом.

В марте взрослые бакланы токуют, строят гнезда и откладывают яйца (в среднем кладка состоит из четырех яиц). Как и век назад, у бакланов забирают кладку, которую насиживает курица.

Как только птенцы вылупляются, их забирают от курицы и далее выкармливают жидкой кашей из рыбы любого вида, которую готовят непосредственно перед использованием. Первое, что видит птенец баклана, открыв в пятидневном возрасте глаза, — человек. Происходит запечатление



птицей облика человека. Так рыбаки добиваются «привязанности» от бакланов, которые впоследствии будут всегда следовать за ними и их лодкой.

На ферме птенцов баклана кормят два раза в день: в 8 ч утра и около 3 ч дня. До двухнедельного возраста птенцы сидят в коробках, где их прикрывают тряпкой для поддержания постоянного тепла. Далее птенцов пересаживают на специальный помост (примерно 3 × 1 м) во дворе, поднятый на 50 см над уровнем земли. На этом помосте птенцы сидят все вместе до 1–1,5-месячного возраста, выпрашивая еду у мимо проходящих людей. Запечатление человека и ручное выкармливание — это первый шаг, необходимый для того, чтобы подготовить баклана к дальнейшей работе с людьми.

Длинный бамбуковый шест — незаменимое орудие рыбака, с помощью которого он проводит многие манипуляции с бакланами: переносит птиц из воды в лодку во время рыбалки и рассказывает по местам на присадах после ее окончания. Иногда для этого он использует крючок на конце бамбуковой палки, которым захватывает веревку, привязанную к лапе каждого баклана, и помогает ему выбраться из воды, если тот упал во время движения лодки, и т.д. Бамбуковый шест во все времена использовался как самими рыбаками, так и теми, кто тренирует бакланов на фермах перед продажей. Процесс приучения птенцов баклана к бамбуковому шесту начинается в полуторамесячном возрасте, когда у них уже окрепли лапы. Птенцов пересаживают с помоста на специально сконструированный «насест» из бамбуковых палок, расположенный на высоте 20 см над поверхностью озера, недалеко от берега, и привязывают короткой (не более 50 см) веревкой за лапу. До шестимесячного возраста птенцы будут сидеть на привязи на бамбуковых присадах. Чтобы накормить птиц, их отвязывают, подносят к емкости с рыбой и закладывают им в горло, после этого их поят и возвращают на насест. Если баклан упал с палки в воду, единственная «суша», на которую он может вылезти, — это та же бамбуковая палка. Никакого специального обучения не требуется. Со временем баклан привыкает, и, за отсутствием выбора, довольно тонкая и неудобная для постоянного нахождения на ней бамбуковая палка становится излюбленным местом, «единственной сушей», где он с удовольствием сидит часами и куда залезает, когда ему ее протягивает хозяин. После 6-месячного возраста ры-



Рыбак достает из воды баклана с уловом на оз.Поян. Рыбу необходимо забрать у птицы, прежде чем снова отпустить ее в воду.

баки на оз.Вэйшань продолжают держать птиц на насестах из бамбуковых палок в то время, когда они не рыбачат. Рыбаки на оз.Поян оставляют птиц на присадах в моторных лодках, где те находятся по 17 ч подряд.

Однако успех работы баклана в качестве ловчей птицы зависит не только от способности отличать от других лодку и своего хозяина, залезать по его требованию на бамбуковый шест. В процессе наблюдения за ходом рыбалки понимаешь, что есть много «незначительных» деталей, выполнение которых определяет успех и согласованность действий рыбака и его 20–25 тренированных птиц. Например, бакланы должны знать, в какой момент и куда плыть, где искать наиболее рыбное место, как «не мешать» работе сородичей и в то же время взаимодействовать с ними и т.д. Как научить птиц всем этим многочисленным и сравнительно мелким деталям? Для этого рыбаки используют в качестве учителей взрослых и уже тренированных птиц. Они говорят так: «Мы не обучаем молодых птиц ничему. Они учатся сами, наблюдая за поведением взрослых сородичей. Это напоминает то, как дети обучаются, повторяя за взрослыми. Что-то вроде передачи опыта из поколения в поколение». Такое обучение, которое обозначается термином «observational learning», начинается с того, что с двухнедельного возраста птенцов баклана берут на рыбалку вместе с взрослыми птицами. В этом возрасте у птенцов еще не окрепли лапы, и они не могут самостоятельно, как взрослые птицы, сидеть в лодке на присаде. Для транспортировки птенцов изготавливают специальные вместительные корзины с крышкой, предохраняющие их от пе-



Рыбак оз.Поян помогает птице попасть в лодку, подставляя ей в воду шест.

регрева на солнце. Такие корзины с тремя-четырьмя птенцами привязывают к корме лодки. Взрослые птицы рыбачат, а птенцы наблюдают за всем происходящим из корзин, в которых их возят до трехмесячного возраста. Когда они способны уже самостоятельно удерживаться на присаде в лодке, корзины убирают, и молодые птицы продолжают наблюдать за действиями рыбака и своих взрослых сородичей с лодки. В рыбном промысле бакланы начинают участвовать с шестимесячного возраста и перестают в 11 лет. Их

продают фотографам и используют для постановочной съемки с туристами на р.Ли.

Существует упоминание о том, что обучение молодых бакланов проходит быстрее, если в нем участвуют взрослые птицы. Дано оно в рамках описания процесса обучения бакланов приходить на свист рыбака (чего в настоящее время мы не встречали). Таким образом, обучение путем наблюдения «learning observationally» — не только тема, которая интересует исследователей [2], это практический прием, который рыбаки Китая ис-

пользуют сотни лет для тренировки ловчих бакланов. Природная наблюдательность и знания о том, как готовить бакланов к ловле рыбы, передаются из поколения в поколение в семьях рыбаков и позволяют им умело манипулировать поведением этих птиц. Во-первых, рыбаки используют потомство птиц, разводимых на фермах и прошедших ту или иную степень отбора по полезным для человека признакам. Скорее всего, птицы агрессивные, пугливые и слабые просто выбраковывались, а в размножении использовались только крепкие, спокойные и хорошо обучаемые особи. Во-вторых, птенцов содержат в изоляции от сородичей, выкармливают их люди, и, когда птенцы



Рыбак с молодым бакланами на оз.Вэйшань.





Рыбаки с бакланами на оз.Вэйшань. На заднем плане бакланы на своих присадах прямо в озере.

открывают глаза, они видят именно человека. В этот период происходит запечатление образа, а запечатлевается человек, что впоследствии «ломает» часть нормального видового репертуара поведения молодого баклана и влияет на самоидентификацию (теперь птица частично «относит себя» к роду человеческому). В-третьих, как известно, в раннем онтогенезе животных происходит выработка многочисленных условных рефлексов, направленных на оптимальное приспособление особи к жизни в окружающей ее обстановке. Это же происходит у молодых бакланов на ферме. Только вырабатываются преимущественно условные рефлексы, полезные для человека: узнавание хозяина, своей лодки и птиц из своей группы, умение работать в команде, держаться на шесте, находиться близко к лодке, когда горловой мешок наполнен рыбой, и т.д. И последнее: один из важнейших процессов нормального онтогенеза — это обучение путем наблюдения за поведением своих

сородичей [2]. Молодые особи, наблюдая за поведением взрослых птиц, перенимают их опыт. Это позволяет им «не наступать на те же грабли» и вести себя адекватно в конкретной среде обитания. Механизм такого обучения используют рыбаки, чтобы привить молодым все полезные навыки взрослых птиц, уже обученных всем нюансам рыбного промысла. Для этого они просто вывозят молодых, еще не обученных птиц на рыбалку вместе со взрослыми. Рыбаки не позволяют птенцам рыбачить, их дело просто наблюдать.

Таким образом, весь этот достаточно сложный и хорошо отработанный механизм традиционного промысла базируется на эмпирических знаниях о поведении и когнитивных способностях птиц. Эти знания, которые рыбаки накапливали с древнейших времен, полностью соответствуют представлениям современной науки о механизмах формирования поведения в процессе онтогенеза. ■

**Работа выполнена в рамках темы НИР «Нейробиологические и информационные основы поведения и функции сенсорных систем» (№NAAA-A16-116021660055-1).**

## Литература

1. Laufer B. The Domestication of the Cormorant in China and Japan. Chicago. 1931. Doi:10.5962/bhl.title.3274.
2. Резникова Ж.И. Сравнительный анализ различных форм социального обучения у животных // Журн. общей биол. 2004. Т.65. №2. С.135–151.



# Фульгуриты: «автографы молний» в песчаных дюнах Якутии

*Молния управляет всеми вещами.  
Гераклит Эфесский*

А.А.Галанин, В.А.Шишков, И.В.Климова

В предыдущей статье в «Природе»\* мы рассказывали о тукуланах — удивительных песчаных ландшафтах Центральной Якутии. Это огромные массивы развеваемых песков, похожие на настоящие пустыни и широко распространенные в долинах крупных сибирских рек. На их поверхности можно встретить белоснежные дюны, котловины выдувания, бугры, гривы и множество других эоловых форм.

Один из таких тукуланов — Кысыл-Сырский — имеет крупное (протяженностью 2.5 км) естественное обнажение в обрыве р.Вилуй, в котором запечатлена история его формирования. Мы неоднократно посещали этот разрез, и по материалам радиоуглеродного, спорово-пыльцевого и других анализов нам удалось выделить основные стадии формирования тукулана и реконструировать этапы развития растительности в долине нижнего течения Вилуя.

Якутские тукуланы формируются как в пределах речных долин, так и на водораздельных пространствах вследствие эоловой переработки — переивания и полировки — самых раз-



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



**Василий Александрович Шишков**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела географии и эволюции почв Института географии РАН. Научные интересы связаны с микроморфологией почв, электронной микроскопией, радиоуглеродным датированием.



**Ирина Витальевна Климова**, ведущий инженер лаборатории общей геоэкологии Института мерзлотоведения имени П.И.Мельникова СО РАН. Занимается иммерсионным минералогическим анализом.

\* Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа. 2016. №11. С.44–55.

**Ключевые слова:** фульгуриты, Якутия, тукуланы, эоловые отложения, ортштейны, почвенные конкреции.

**Key words:** fulgurite, Yakutia, tukulans, aeolian deposits, soil concretions.

личных исходных отложений. В долинах это преимущественно четвертичные русловые и пойменные отложения, а также ледниковые валунно-суглинистые морены. На водоразделах — рыхлые коры выветривания более древних образований дочетвертичного возраста, в том числе мезоойских песчаников и конгломератов. Мелкие частицы — пыль и суглинок — легко сдуваются с поверхности и переносятся на большое расстояние. Более крупный материал — супесь и песок — движется медленно. Под давлением порывов ветра крупные песчинки перемещаются путем сальтации — небольших прыжков на 20–30 см. Прыгающие песчинки организуются в дюны различного порядка, медленно ползущие в направлении господствующих ветров.

Самые крупные и тяжелые частицы — зерна тяжелых минералов, гравий, щебень, галька, валуны, кости животных — накапливаются на поверхности в так называемых котловинах выдувания и именуются ветровым элювием.

В котловинах часто обнаруживаются самые различные предметы современной цивилизации — охотничьи пули, гвозди, гайки, осколки стекла. Иногда рядом с ними лежат свидетельства совершенно иного мира — каменные нуклеусы, отщепы, обсидиановые ножевидные пластинки, наконечники стрел.



Ветровой элювий. Мелкий, отполированный ветром гравий на поверхности котловины выдувания.

Здесь и далее фото А.А.Галанина



Кремневый наконечник стрелы поздненеолитического типа.

## Загадочные песчаные трубки

В июне 2014 г. уже достаточно хорошо изученный Кысыл-Сырский тукулан преподнес нам несколько сюрпризов. И одним из них стали многочисленные скопления фульгуритов\* — уникальных природных образований, возникающих при ударе молний в грунт. Фульгуриты образуются обычно в рыхлых, реже в плотных горных породах [1]. Они формируются при очень высоких температурах, достигающих нескольких тысяч градусов по Цельсию, имеют трубчатую, корневидную или каплевидную форму и самые разные размеры. При расплавлении скальных пород образуются *петрофульгуриты*, рыхлых — *кластофульгуриты*. В последнее время обнаружены *фитофульгуриты*, формирующиеся при ударе молний в органические материалы и состоящие из специфичес-



Крупнозернистый белый фульгурит, найденный на поверхности котловины выдувания Кысыл-Сырского тукулана.

\* Слово фульгурит происходит от латинского fulgur, что означает «удар молнии».





Самый крупный из обнаруженных нами белых фульгуритов.



Тонкозернистая белая фульгуритовая трубка длиной около 0.5 м в естественном залегании.

ки структурированного углерода [2]. В их составе присутствует много аминокислот и других высокомолекулярных органических соединений.

Находки фульгуритов весьма редки, поэтому многие люди их никогда не видели и почти ничего о них не слышали. Тем не менее фульгуриты — «автографы молний», «чертовы пальцы» — известны с глубокой древности. Их обнаруживали в пустынях жители Древнего Египта, Шумера и Месопота-

мии. Фульгуритам приписывалась магическая сила, они считались талисманами, лекарственными амулетами и оберегами, поскольку предполагалось, что они заключают в себе энергию молнии.

Ветвистые трубки длиной в несколько сантиметров, блестящие внутри и инкрустированные песком снаружи, встречались нам и ранее, во время первой рекогносцировочной экспедиции на Кысыл-Сырский тукулан в 2011 г. Мы решили, что это остатки панцирей каких-то личинок, вроде ручейников, поэтому не придали находкам особого значения и связали их с дефляцией (выдуванием) исходных озерно-болотных отложений и палеопочв.

Однако в 2014 г. эти образования вновь привлекли наше внимание: в одной из котловин выдувания Кысыл-Сырского тукулана мы обнаружили более крупные (диаметром до 2 см) обломки оплавленного прозрачного пузырчатого кварца. Вместе с большими обнаружено множество мелких трубок длиной 3–5 см и диаметром 0.5–0.8 см. Их внутренняя поверхность оказалась гладкой и блестящей, нередко с мелкими пузырьками, заключенными в стеклянный расплав, внешняя же покрыта песчинками и на ощупь напоминает наждак. Встречались как простые трубки, так и сложные разветвленные структуры с боковыми отростками, похожими на маленькие окаменевшие елочки.

Все участники экспедиции были вдохновлены находками, особенно после того, как стала очевидной их природа. Мы решили уделить некоторое время обследованию поверхности тукулана на предмет обнаружения новых скоплений фульгуритов.

Вооружившись GPS-навигатором, мы двинулись цепью и фиксировали все находки фульгуритов на карте. В результате было обнаружено более 20 компактных скоплений округлой формы диаметром до 2–4 м, в каждом из которых находилось до нескольких десятков стеклянных трубок и их фрагментов.

Не было сомнения, что каждое местонахождение соответствует как минимум одному удару



Черные железо-марганцевые (слева) и крупнозернистые охристые ортштейны.



молнии. Трубки были не только разбросаны по поверхности, местами они оказались погруженными в песок на неопределенную глубину под разными углами. Попытки их выкопать ни к чему не привели: крупные и хрупкие трубчатые дендриты легко распадались на фрагменты. Мы обнаружили несколько горизонтально залегающих образований почти полуметровой длины, но они также распались на отдельные сегменты. В целом стало ясно, что фульгуриты образуются в сухом песке и первоначально имеют формы, напоминающие ветви растений. Такие дендриты, очевидно, возникают при ветвлении молнии в грунте.

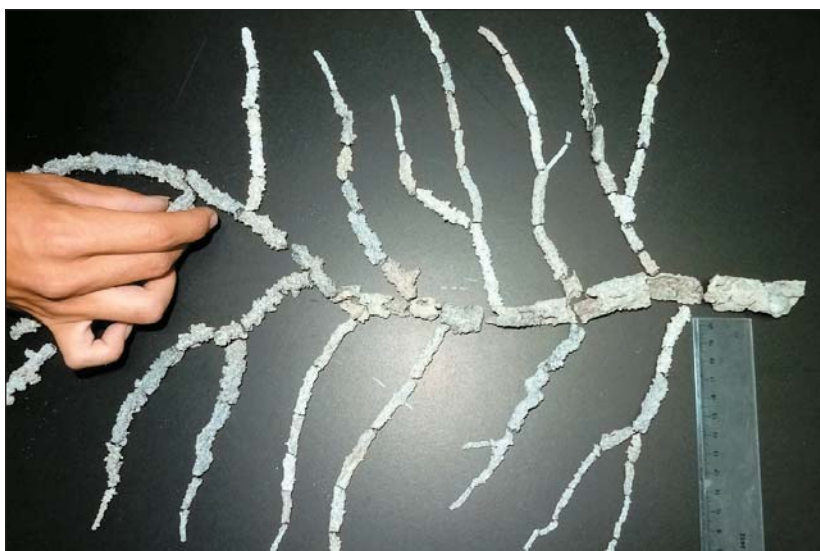
Трубки варьировали по цвету: встречались ржаво-охристые, белые, изредка — иссиня-черные. Интересно, что в северо-восточной части тукулана мы обнаружили больше всего крупных белых фульгуритов. В других его частях белые трубки отсутствовали. В наиболее глубоких котловинах выдувания в западной части тукулана найдено много трубочек охристого и даже иссиня-черного цвета, которые мы поначалу также отнесли к фульгуритам.

В процессе картографирования в распределении белых, охристых и черных трубок в пределах Кысыл-Сырского тукулана стали обнаруживаться некоторые закономерности. Так, охристые и черные трубки никогда не попадались вместе с белыми. Они также не группировались в компактные круги или линейные зоны, а просто были более или менее равномерно рассеяны по поверхности некоторых пологих котловин выдувания. Кроме того, в днищах этих котловин иногда наблюдалось интенсивное приповерхностное ожелезнение песчаного грунта до глубин 0.3–0.5 м. Здесь же вместе с трубками попадались железистые стяжения самой причудливой формы, напоминающие капли, пластинки, гантели, пустотелые бочонки. Их размеры не превышали 1–2 см.

Среди всех находок наиболее причудливую форму имели органоминеральные останцы высотой до 20–30 см. Мы называли их дефляционными грибами. Шляпы этих «грибов» были сложены си-



Скопления фульгуритов в котловинах выдувания Кысыл-Сырского тукулана.



Реконструкция фульгуритового дендрита (выполнено А.А.Аммосовым).

невато-черным сапропелем, а ножки — уплотненной охристой супесью.

Окончательный генезис загадочных трубок удалось установить только после комплекса лабораторных анализов с использованием оптического поляризационного, а также электронного сканирующего микроскопов с встроенным модулем для микрозондового анализа элементного состава. Кроме того, для определения микроэлементного состава фульгуритов и вмещающих песков был выполнен спектральный атомно-эмиссионный анализ.

## Фульгуриты под микроскопом

Основной компонент эоловых песков Кысыл-Сырского тукулана — это кварц (до 90% и более), реже встречаются полевые шпаты, обломки песчаников (менее 10%). Распространены также органические включения, гидроокислы железа и марганца, хлорит, глинистые минералы.

Иногда попадают экзотические минералы тяжелой фракции (гранаты, ильменит, рутил) и окатанные зерна некоторых осадочных и метаморфических горных пород, устойчивых в гипергенных условиях. В основном это породы с высоким содержанием кремнезема — яшмы, халцедоны, опалы, ониксы.

Фульгуриты следует относить к аутигенным\* минеральным образованиям, формирующимся преимущественно в сухих дюнных песках. Поэтому нахождение данных стекол в более древних отложениях Якутии может считаться косвенным свидетельством их эолового происхождения.

Оказалось, что не все собранные нами песчаные трубки относятся к фульгуритам, а только белые, с блестящей стекловатой внутренней поверхностью. Другие трубчатые образования — охристого и черного цвета — оказались внутрипочвенными конкрециями — педотубулами\*\*. Они имеют совершенно иной химический состав, не содержат фульгуритовых стекол либо иных признаков оплавления.

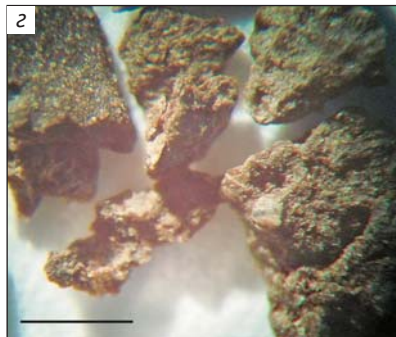
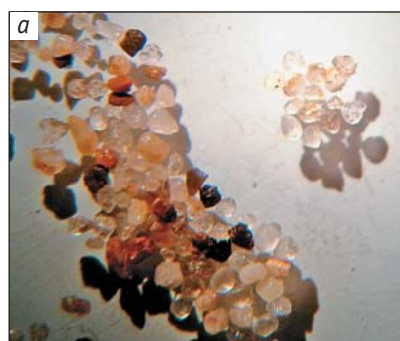
Под поляризационным микроскопом с использованием иммерсионных жидкостей было установлено, что стекла настоящих (белых и светло-серых) фульгуритов имеют специфические признаки, кардинально отличающие их от других стекол природного происхождения, встречающихся в продуктах извержений вулканов — базальтах, риолитах, дацитах и других вулканических породах.

Фульгуриты образованы оплавленными обломками исходного кварцевого песка, плотно сваренными белым прозрачным кварцевым стеклом с коэффициентом преломления  $< 1.5$ , что характерно для наиболее химически чистых кварцевых стекол. Фульгуритовые стекла имеют исключительно свежий облик, в них отсутствуют структуры эпигенетической перекристаллизации, свойственные вулканическим породам.

Субмикроскопический анализ трубок выполнен с использованием сканирующего электронного микроскопа (увеличение до 20 000). Первые же снимки выявили фантастическую неповторимость их строения.

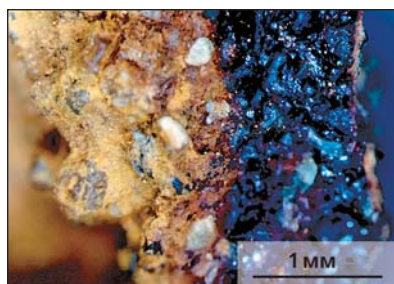
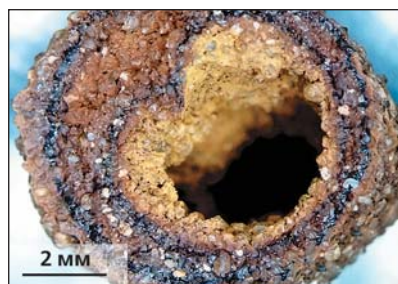
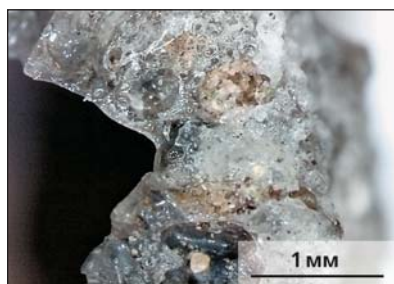
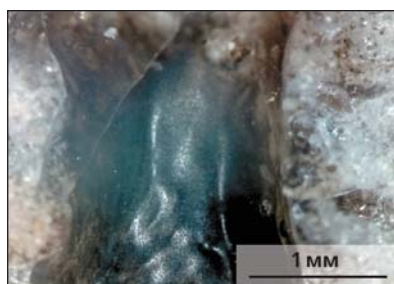
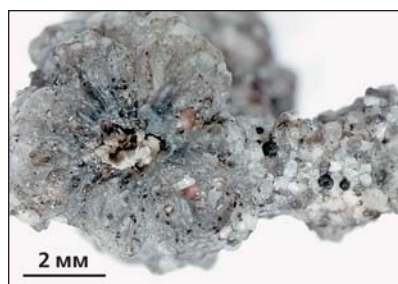
\* Аутигенными называются образования, возникающие в осадочных породах уже после их отложения в результате различных геохимических процессов.

\*\* Педотубулы — ожезленные трубочки оранжевого и красновато-бурого цвета, формирующиеся в определенных типах почв и геохимических условиях по ходам корней и во внутренних полостях почвенного профиля [3, 4].



Дюнные пески и супеси Кысыл-Сырского тукулана под бинокулярным микроскопом (длина масштабных линеек — 1 мм): а — процесс сортировки и подсчета кварцевых зерен; б — хорошо окатанные кварцевые зерна с эоловой полировкой; в — хорошо окатанные экзотические минералы; г — неокатанные обломки мезозойских песчаников; д — новообразованные окислы марганца; е — оплавленная поверхность обломка фульгуритовой трубки.





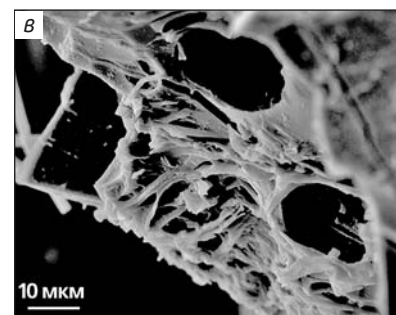
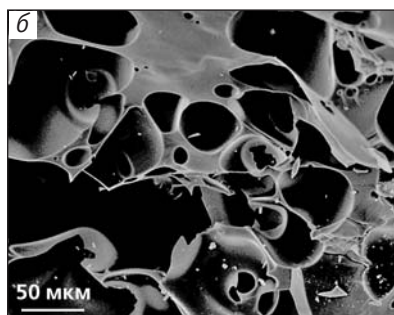
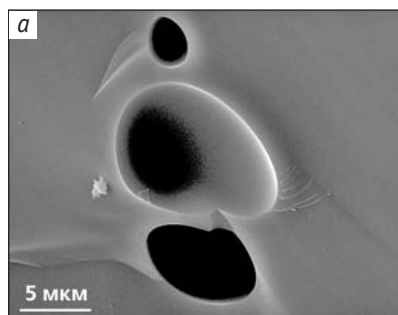
Фульгуритовые трубки под бинокулярным микроскопом.

Фото С.Ф.Хохлова

Среди кварцевых фульгуритов условно выделено четыре основных микроморфологических разновидности. К первой отнесены стекла с массивной однородной текстурой и неявно слоистой структурой с единичными эллипсовидными пустотами, группирующимися в виде цепочек. Ко второй микротекстурной разновидности отнесены сильно пузырчатые образования, в которых суммарный объем пустот значительно превышает объем фульгуритового стекла. Форма и размеры пузырей сильно варьируют и напоминают быстро вспененную и затвердевшую массу. К третьей разновидности микротекстуры фульгуритов отнесены тонкие, слегка скрученные волокна и жгуты кремнезема, вероятно, представляющие собой структуры разбрызгивания расплавленного кремнезема. Они инкрустируют внутренние полости наиболее крупных пузырей и пустот фульгуритовых трубок.

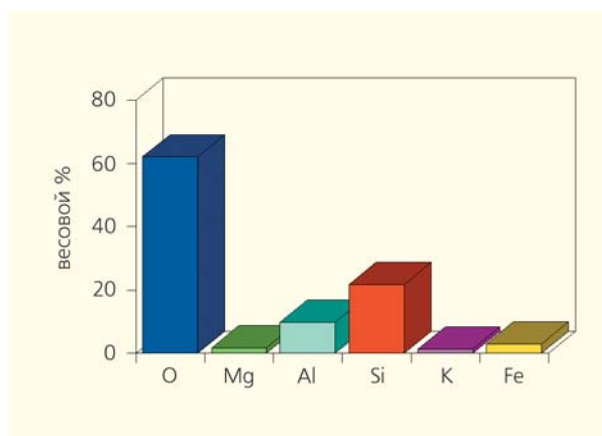
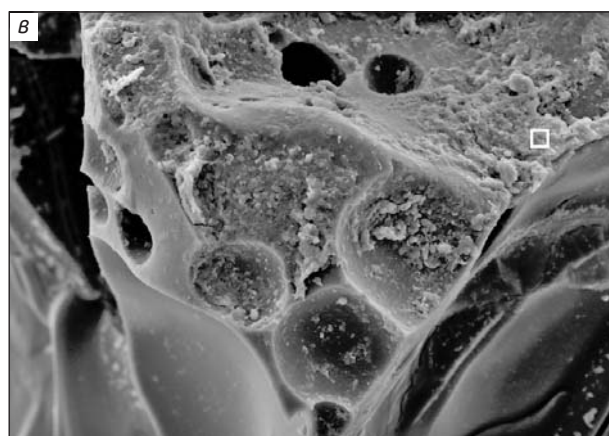
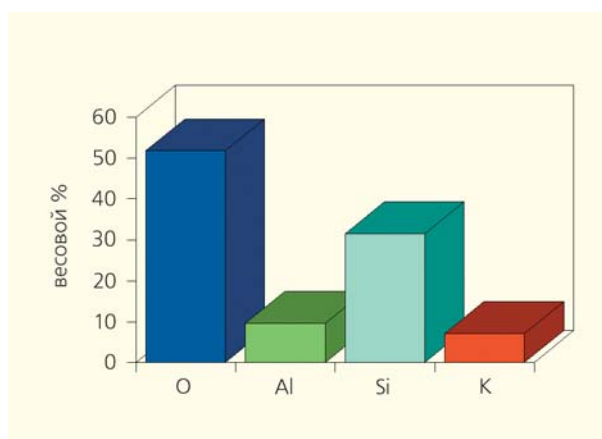
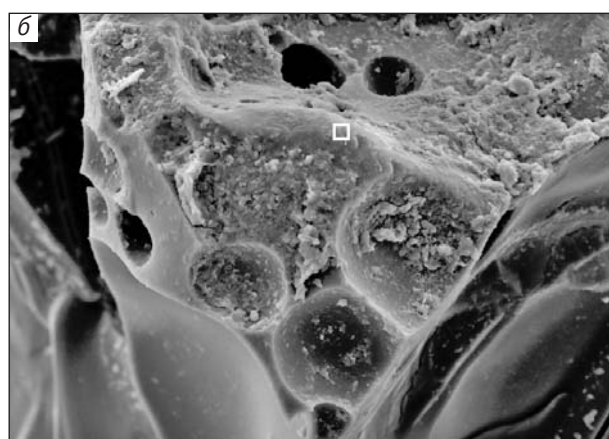
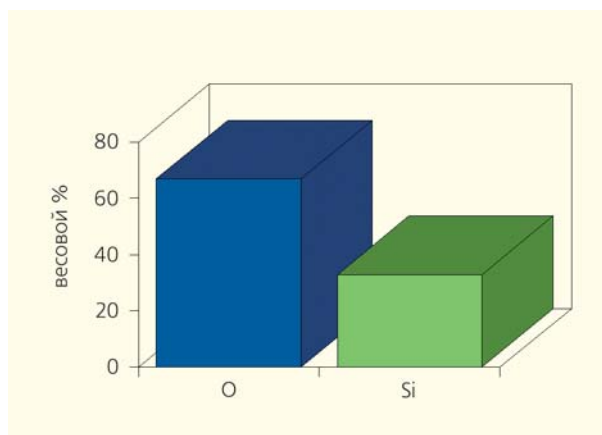
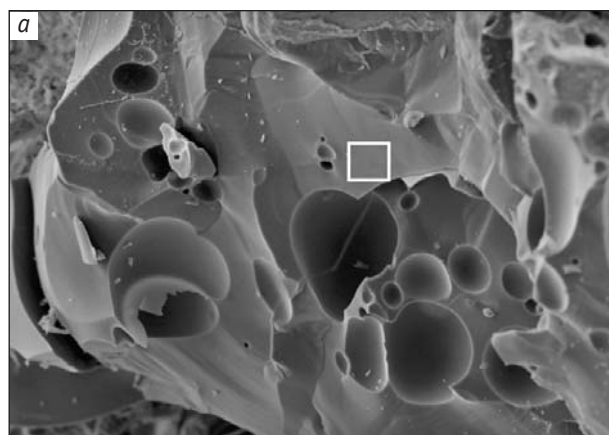
### Элементный состав фульгуритов и ортштейнов

Выводы об особенностях химического состава обнаруженных фульгуритов и внутрипочвенных трубок (ортштейнов) сделаны на основе микрозондового анализатора (Oxford Instruments INCA Xact) и спектрального анализатора (JEOL JSM-6610LW) анализатор позволяет определять



Кысыл-Сырские фульгуритовые стекла под сканирующим электронным микроскопом: *a* — массивная текстура кипения кварцевого стекла с крупными эллипсовидными пузырьками; *б* — пузырчатая текстура; *в* — пузырчатая взрывная текстура с фигурами разбрызгивания.



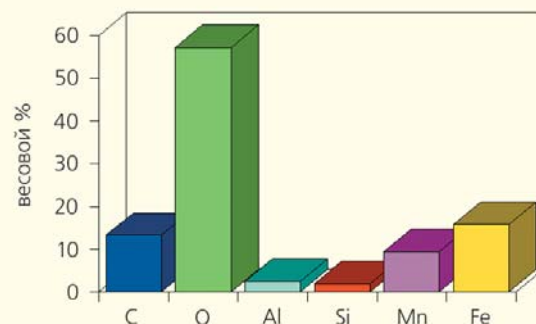
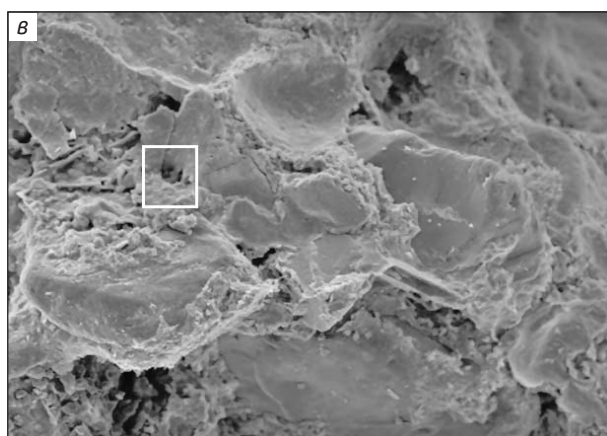
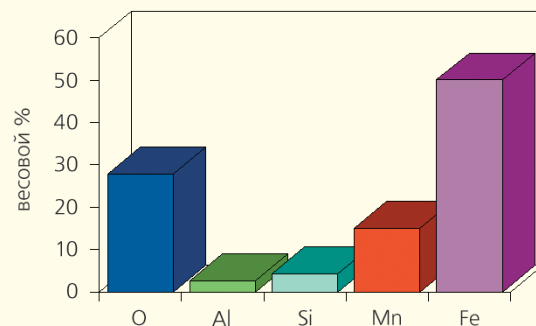
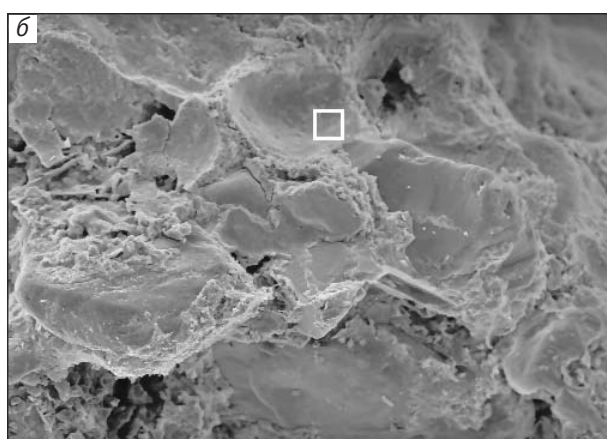
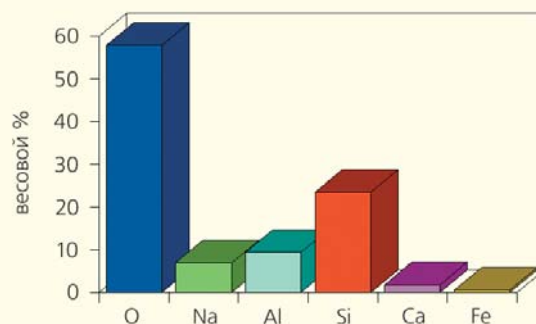
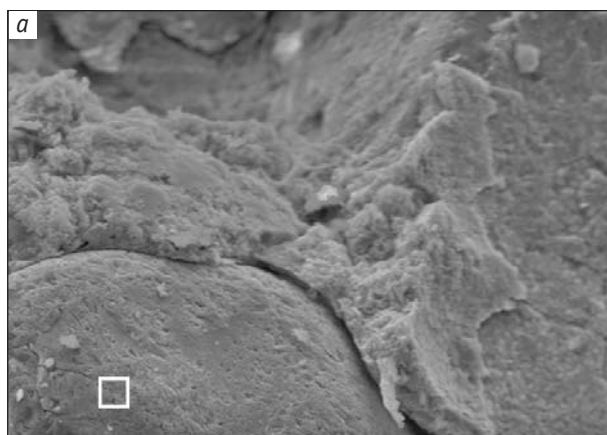


Результаты изучения элементного состава фульгуритовых стекол: *а* — химически чистое кварцевое стекло ( $\text{SiO}_2$ ); *б* — алюмосиликатное стекло; *в* — стекло с незначительной примесью алюминия, железа, калия и магния.

валовой химический состав в любой точке образца непосредственно при наблюдении его при большом увеличении. Для более ясного понимания минеральной структуры было выполнено несколько десятков определений. Гистограммы распределения основных элементов показывают, что, кроме крайне чистых стекол, состоящих исключительно из кремнекислородных тетраэдров ( $\text{SiO}_4$ ), в составе фульгуритов присутствует стек-

ло с незначительной примесью алюминия, калия и железа.

Весьма интригующими оказались результаты микронзондового анализа некоторых фульгуритов, а также ярко-охристых железистых и черных внутрипочвенных трубок. Каркасы трубок сформированы из песчинок с преобладанием кремнезема, но само цементирующее вещество образовано кислородом, железом, марганцем и углеродом

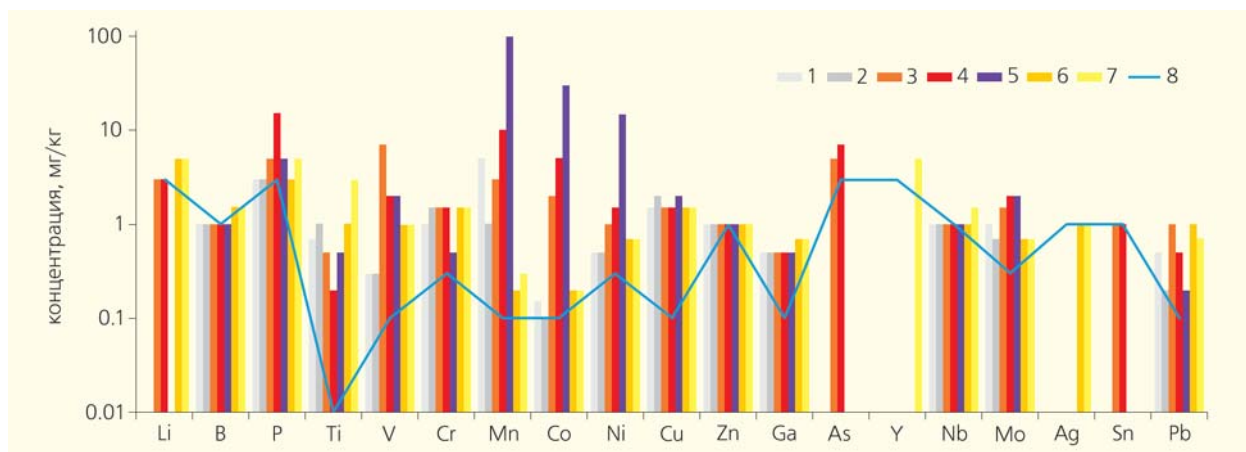


Результаты микрозондового анализа охристых и черных внутрипочвенных трубок (ортштейнов): *а* — частица (гранула) скелета; *б* — цементирующее вещество трубок охристого цвета; *в* — цементирующее вещество трубок черного цвета.

в различном соотношении. По всей видимости, оно состоит преимущественно из гидрооксида железа и марганца, а также органоминеральных почвенных образований. Отсутствие оплавления и высокое содержание отмеченных элементов свидетельствует об эпигенетическом образовании охристых и черных трубок внутри профиля развитой палеопочвы, которая позже была эродирована с поверхности тукулана в результате вет-

ровой дефляции. Так охристые и черные трубки оказались на поверхности котловин выдувания в составе ветрового элювия.

Неожиданным оказался результат микрозондового анализа одной из найденных фульгуритовых трубок. Внутри высокотемпературного расплава стекла было обнаружено высокоуглеродистое включение, природа которого так и осталась для нас неясной.



Результаты атомно-эмиссионного (спектрального) анализа фульгуритов и почвенных ортштейнов Кысыл-Сырского тукулана. 1 — фульгурит белый крупнозернистый; 2 — фульгурит белый мелкозернистый; 3 — ортштейн охристый крупнозернистый; 4 — ортштейн охристый мелкозернистый; 5 — ортштейн черный мелкозернистый; 6 — дюнный песок с глубины 1.5 м; 7 — дюнный песок с глубины 2.5 м; 8 — пороговые значения обнаружения элементов.

### Результаты атомно-эмиссионного (спектрального) анализа

Спектральный анализ протоколов дюнного песка, фульгуритов и внутрипочвенных ортштейнов выполнен для оценки сходства и различия их микроэлементного состава. Оказалось, что дюнный песок и образованные из него фульгуриты имеют весьма сходный состав. Исключением стал только литий, который совершенно отсутствует в фульгуритах. Состав же трубчатых железомарганцевых конкреций (педотубул) иной. Вместе с аутигенными железом и марганцем в них установлено высокое по сравнению с дюнными песками содержание кобальта, никеля и мышьяка. Их концентрация внутри почвенного профиля свидетельствует о преобладании окислительной среды при недостаточном увлажнении и хорошей аэрации — условий, свойственных для сухих сосновых лесов.

\* \* \*

Фульгуриты и железомарганцевые педотубулы — очередной феномен якутских тукуланов, подтверждающий их высокую специфичность

и недостаточную изученность. Эти образования могут служить дополнительными характеристиками строения тукуланов, указывающими на сложность их фациального состава. Педотубулы используются как важнейшие признаки при реконструкции палеогеографических и палеоклиматических условий недавнего прошлого [5, 6]. Их относят к прямому признаку эволюционного развития песчаных массивов Центральной Якутии в экстрааридных условиях.

Фульгуриты, как весьма редкие образования, наверняка привлекут к себе внимание геологов и минералогов. Кроме того, в ископаемом виде они представляют собой уникальный материал для термолюминесцентного и оптико-люминесцентного абсолютного датирования [7].

И наконец, крупные фульгуриты имеют большое эстетическое и ювелирное значение. Так, согласно ценнику магазина «Камневеды» (г.Москва), стоимость египетских кварцевых фульгуритов среднего качества размером 4×0.8 см и весом 3–4 г варьирует от 20 до 50 долл. США. С данной точки зрения фульгуриты якутских тукуланов могут представлять ценность как материал для изготовления оригинальных местных сувениров. ■

### Литература

1. Чирвинский П.Н. Природные и искусственные фульгуриты // Природа. 1926. №3–4. С.26–48.
2. Лысюк А.Ю., Юргенсон Г.А., Юшкин Н.П. Фульгуриты — новый тип электроатмогенных геологических образований // Литосфера. 2006. №3 С.125–140.
3. Розанов Б.Г. Морфология почв. М., 1983.
4. Зайдельман Ф.Р., Никифорова А.С. Генезис и диагностическое значение новообразований почв лесной и лесостепной зон. М., 2001.
5. Ковда В.А. Основы учения о почвах. Общая теория почвообразовательного процесса. Кн.2. М., 1973.
6. Достовалов Б.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение. М., 1967.
7. Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. М., 2006.



# Вымирание сахалинской кабарги

В.И.Приходько

**В**ымирание животных традиционно связывают с периодическими природными катастрофами глобального масштаба, обуславливающими исчезновение многих видов и приводящими к обновлению фаун [1]. Однако вымирание — это еще и одна из характеристик эволюционного процесса. Если видообразование дает начало новым видам, то вымирание завершает эволюционный этап отдельных представителей родовых групп, семейств и даже отрядов. В среднем и позднем миоцене, в интервале между 15.9 и 8.7 млн лет, вымерло как минимум девять видов древних кабарговых. Причиной их вымирания, как полагают палеонтологи, были периодические изменения климата, приводившие к глобальным изменениям ландшафтов. С появлением человека темпы вымирания животных ускорились. Только за исторический период на планете исчезло 120 видов крупных млекопитающих, служащих объектами охоты, и 150 видов птиц. Средняя скорость вымирания млекопитающих под воздействием антропогенного фактора неуклонно росла в каждом тысячелетии [2].

Как было показано в нашей работе [3], эволюционная история рода кабарги\* составляет около 11 млн лет, что значительно превышает среднюю продолжительность существования родовых групп парнокопытных. Следовательно, все подвидовые формы кабарги мировой фауны обречены на вымирание в скором времени, а возрастающие антропогенные воздействия на среду обитания вида дополнительно ускоряют этот процесс.

\* Подробнее о кабарге см.: Приходько В.И. Олень с роковым запахом // Природа. 2002. №4. С.32–39.



**Владимир Иванович Приходько**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН. Область научных интересов — эволюция, этология, экология и охрана представителей семейства кабарговых.

**Ключевые слова:** экология, вымирание, кабарга, остров Сахалин.  
**Key words:** ecology, extinction, musk deer, island Sakhalin.

## Заселение кабаргой Сахалина и охранный статус

Парнокопытные заселяли о.Сахалин в периоды осушения шельфа во время оледенений Азиатского континента. На основании палеонтологических данных и изучения этапов развития растительности установлено, что чередования осушений и обводнений шельфовых территорий в Восточной Азии, включая Дальний Восток, происходили трижды: один раз в среднем и дважды в позднем плейстоцене [4]. Можно предположить, что видовые сообщества парнокопытных Сахалина формировались как минимум дважды, а колонизация острова видами-иммигрантами имела различные направления. Начиная со среднего плейстоцена в результате неоднократных колебаний уровня Мирового океана происходило образование мостов суши от Азиатского континента через Сахалин к Хоккайдо, а все Японские о-ва соединялись между собой и с п-овом Корея. В позднем плейстоцене, вслед за появлением на осушенных территориях Сахалина пригодной для обитания растительности, остров заселили представители дальневосточной, китайской и берингийской фа-

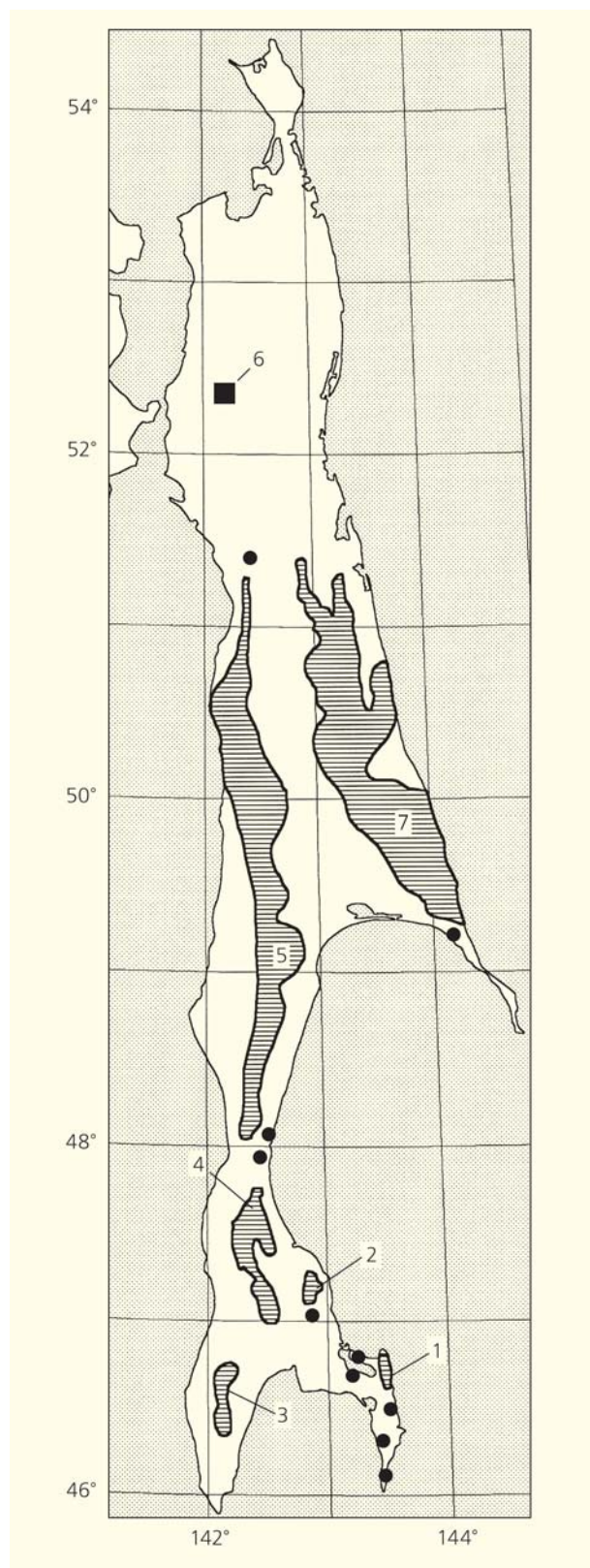


Схема распространения сахалинской кабарги в 1998 г. Группировки кабарги: 1 — Тонино-Анивская, 2 — Сусунайская, 3 — Южно-Камышовая, 4 — Шренко-Мицульская, 5 — Западная, 6 — Вагиская, 7 — Восточная; ● — пункты заходов.

ун, в том числе и кабарга. В тот период на суше, примыкающей к матерiku, доминировали в основном крупные по размерам виды мамонтовой фауны. По-видимому, мост суши просуществовал до рубежа плейстоцена и голоцена. После повышения уровня Тихого океана, приведшего к отделению острова от материка и последующей длительной географической изоляции Сахалина, кабарга, освоившая его, образовала отдельную филогенетическую линию внутри вида. Происхождение сахалинской кабарги от дальневосточной формы подтверждено молекулярно-генетическими исследованиями [5].

Сахалинская кабарга относится к группе редких и находящихся под угрозой исчезновения подвидов. Из-за низкой численности в 1983 г. она занесена в Красную книгу РСФСР. Современный ареал островной формы фрагментирован на семь изолированных очагов обитания. Как обитатель горно-таежного ландшафта, сахалинский подвид кабарги, безусловно, важная составляющая баланса островного биоразнообразия. Предприму первую попытку оценить жизнеспособность малочисленной островной популяции и выяснить, какие факторы эту жизнеспособность понижают.

### Динамика популяции

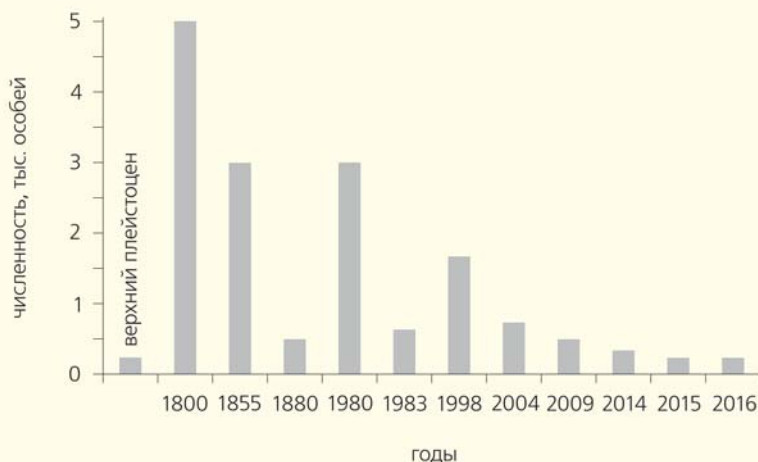
Динамику населения сахалинской кабарги я условно разделяю на два периода: исторический и современный. Первый период, начавшийся после колонизации острова, был очень долгим и продолжался до 1800 г. Теоретически (в более или менее благоприятных условиях среды позднего плейстоцена) исходная численность группировки кабарги на острове могла достигать 200–220 размножающихся особей. Об этом свидетельствует выживание островной популяции в течение 20 тыс. лет после появления ее на Сахалине.

Площадь плейстоценовых лесов на начальной стадии заселения кабаргой острова, вероятно, почти в два раза превышала современную территорию, покрытую лесами, и могла достигать 10 млн га. Существует лишь экспертная оценка площади местообитания подвида в плейстоцене. Эти допущения соответствуют важным событиям прошлого. Воспользуюсь ею для того, чтобы пояснить изложенные ниже положения. На Сахалине, как и на континентальной части ареала вида, в историческое время кабарга тяготела к участкам темной хвойной тайги. При средней плотности 0.5 особи на 1000 га расчетная максимальная численность сахалинской кабарги теоретически должна была достигать в конце плейстоцена 5 тыс. особей. На фазах роста популяции ее численность претерпевала целый ряд циклических флюктуаций с понижением уровня максимального значения. В результате изменений физической среды происходили колебания населения между увели-

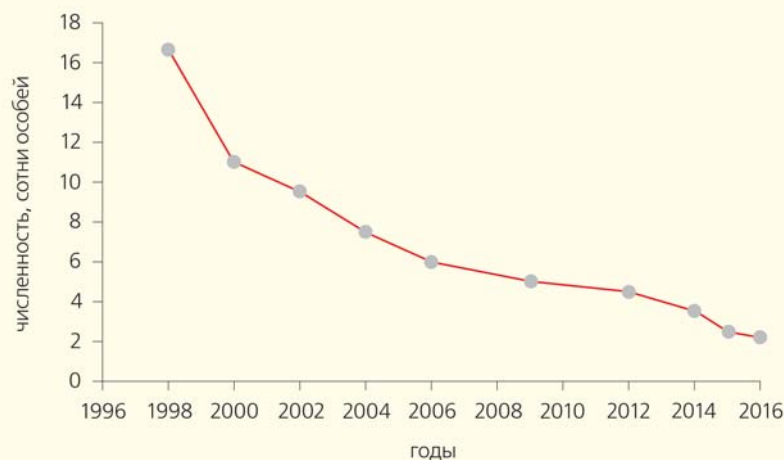
чением до 4 тыс. и снижением до 3 тыс. особей еще до того, как вступали в действие внутривидовые факторы, например территориальность, ограничивающая рост и плотность населения животных на островной территории.

Второй период, начавшийся со второй половины XIX в., продолжается до наших дней. На протяжении последних двух столетий подъемы численности животных сменялись двумя волнами депрессии, сравнимыми с началом фаз вымирания. Литературные источники свидетельствуют о катастрофическом снижении природных популяций кабарги в северной части ареала в конце XIX в., когда вид был на грани исчезновения [6, 7]. Причиной катастрофического сокращения численности вида стала охотничья деятельность человека. Характерной чертой того периода было синхронное снижение ресурсов сахалинского подвида, сравнимое с материковыми пропорциями изъятия животных. Исходная численность этих островных животных составляла в 1855 г. около 3 тыс. особей, но в результате пресса охоты снизилась к 1880 г. до 450–500 особей. Потребовалось не менее 100 лет для восстановления ресурсов сахалинской популяции до исходного асимптотического уровня, достигнутого в конце XIX в.

Обратимся к анализу факторов, влияющих на динамику населения сахалинского подвида кабарги. Промышленные лесозаготовки и лесные пожары послужили причиной очередного снижения ее численности в конце XX в. По некоторым своим особенностям эти факторы оказались особенно губительны для островной фауны. Несмотря на занесение этого подвида в Красную книгу России, с 1998 г. начался отрицательный тренд в динамике его численности, который продолжается до настоящего времени. По моей оценке, современная численность сахалинской кабарги снизилась до критически низкого уровня в 220–250 особей, т.е. ресурсы подвида сократились за эти годы в семь раз. Наблюдаемый спад численности происходит монотонно на протяжении последних 18 лет, отражая отсроченное вымирание животных на Сахалине.



Историческая и современная динамика популяции сахалинской кабарги.



Динамика снижения численности островной популяции за последние 18 лет (1998–2016). Кривая фактического угасания островной популяции построена по эмпирическим учетным данным, собранным автором.

Хозяйственная деятельность человека на острове, темпы которой возрастали с конца XIX в., привела к разрушению мест обитания кабарги и нарушению существовавших веками взаимосвязанных природных циклов. Современная мозаичность распределения островной формы, обусловленная пятнистостью горно-таежных местообитаний, выражена сильнее по сравнению с доисторическим временем из-за включения в этот процесс антропогенного фактора. Как установлено в ходе полевых исследований, площадь всех очаговых зон обитания сахалинской кабарги продолжает неуклонно сокращаться на фоне низкой численности внутривидовых группировок.



## Причины и риск вымирания

Для оценки рисков вымирания видов разработана шкала критериев, или «правило 50/500» [8–10]. Виды и популяции с численностью ниже 50 особей ожидает неминуемое вымирание из-за генетической депрессии, вызванной близкородственными спариваниями. Пороговое число 500 особей в этом правиле соответствует минимальной эффективной численности, при которой совокупная наследственная изменчивость популяций при генетическом дрейфе хотя и уменьшается, но компенсируется увеличением внутривидового разнообразия в результате мутаций. Фактически это правило позволило исследователям сформулировать концепцию минимальной жизнеспособной популяции (MVP), основанной на динамике численности видов [8, 11, 12]. При анализе жизнеспособности применяются приемы, устанавливающие нижние пределы численности, за границы которых популяции снижаться не должны по причинам уязвимости видов. Чаще в качестве пороговых значений используются генетические критерии [8]. Для определения численности минимальных жизнеспособных популяций растительноядных животных применяется показатель массы тела, который характеризует уровень метаболизма и имеет корреляционную связь с плотностью населения копытных, обитающих в умеренных ши-

ротах [13]. Предварительные расчеты (которые нет необходимости здесь приводить) с использованием средней массы тела кабарги в модели вымирания, показали, что минимальная численность жизнеспособной популяции этого вида составляет около 102 самок в фертильном возрасте. Этот параметр численности популяции укладывается в нижние пределы «правила 50/500», что дает мало шансов для выживания подвида на Сахалине.

На протяжении нескольких минувших десятилетий прогноз оценки численности островной популяции, обеспечивающей ее жизнеспособность, уточнялся по мере включения в анализ все новых и новых факторов, не зависящих от плотности населения [14]. Как будет показано ниже, флуктуации популяции обусловлены несколькими лимитирующими факторами (такими как лесозаготовки, лесные пожары и браконьерство), вследствие чего численность кабарги ежегодно снижается.

Уменьшение ресурсов сахалинской кабарги, вызванное усилением фрагментации местообитаний, привело к снижению общего генетического разнообразия и, возможно, возникновению инбредной депрессии, т.е. частых скрещиваний между близкими родственниками в изолированных малочисленных группировках. Сравнение нуклеотидной изменчивости (различий в нуклеотидных последовательностях, формирующихся в ходе му-



Местообитания кабарги на Сусунайском хребте.

Здесь и далее фото автора



тационного процесса) исследованного фрагмента (D-петли) митохондриальной ДНК среди видов диких копытных показало, что у кабарги значение этого показателя ( $p = 2.6\%$ ) находится на среднем уровне для группы диких жвачных. Однако гаплотипическое разнообразие (варианты встречаемости в популяции материнских гаплотипов\*, передаваемых от одного поколения к другому) и нуклеотидная изменчивость сахалинского подвида оказались в два-три раза ниже генетических показателей, характеризующих другие подвидовые формы кабарги, обитающие на Азиатском материке [5]. Снижение разнообразия происходит не за счет сокращения числа изолированных локальных группировок, а из-за снижения их численности и площади занимаемых ими территорий.

Отметим также, что мелкие размеры тела, пищевая специализация, а также стенобионтность\*\* оказались теми видовыми характеристиками, которые препятствуют долговременному выживанию сахалинской кабарги. Ежегодное уничтожение рубками спелых горно-таежных лесов влечет за собой исчезновение эпифитных лишайников — основного корма кабарги — и делает лесосеки, как показали наши полевые исследования, непригодными для обитания животных на протяжении десятилетий. Еще сохранившиеся островные хвойные леса, как продуценты эпифитных лишайников, оказываются уязвимыми в настоящее время при воздействии на них даже одного из абиотических факторов, например химического загрязнения воздуха. Из всех имеющихся на Сахалине промышленных источников химических выбросов завод для сжижения природного газа, построенный в начале 2000-х годов, стал основным производителем губительных отходов. Его выбросы оказались

\* Гаплотип (сокр. от «гаплоидный генотип») — совокупность аллелей на локусах одной хромосомы, обычно наследуемых вместе.

\*\* Стенобионты — виды узко адаптированные к среде обитания в силу морфологических, физиологических и поведенческих особенностей. Стенобионтность кабарги обусловлена пищевой специализацией и оборонительным поведением по отношению к хищникам.



Животные населяют горные леса Сахалина (Тонино-Анивский хребет).

наиболее опасны для среды обитания кабарги. Химические загрязнители выбросов газовой промышленности отрицательно воздействуют прежде всего на эпифитные лишайники. А это может привести к вымиранию кабарги из-за недостатка корма в первую очередь в южной и центральной частях острова.

До самых недавних пор охрана кабарги базировалась на мониторинге ее численности без контроля сохранности местообитаний, но этот подход не дал положительных результатов. По официальной статистике, площадь темнохвойных спелых и перестойных лесов (т.е. сохранившихся потенциальных местообитаний островного подвида) на Сахалине в настоящее время составляет около 650 тыс. га. Ежегодно на острове



Взрослый самец кабарги.





Экскременты и пахучие метки указывают на присутствие кабарги в очагах обитания.



Подросшие леса после рубок непригодны для обитания кабарги из-за отсутствия эпифитных лишайников.



Разрушенные пожарами местообитания.

в результате только лесных пожаров утрачивается 2,5–3% площади местообитаний кабарги, что в конечном итоге ведет к сокращению ареалов отдельных пространственных группировок и их численности. Ежегодная утрата площадей местообитаний от рубок леса и пожаров в совокупности достигает 5%. Демографические провалы сахалинской кабарги из-за влияния только этих негативных факторов значительны и будут определять вероятность вымирания этих копытных в течение ближайших 20 лет.

При разработке критериев выживания сахалинской кабарги важно учитывать особенности ее метапопуляционной структуры. Островная популяция, как уже отмечалось, представлена семью географически изолированными внутрипопуляционными группировками, или метапопуляциями. Как я установил, ни одна из существующих в настоящее время внутрипопуляционных группировок не обладает эффективной численностью, равной 102 размножающимся самкам. В четырех группировках их ресурсы (включающие самцов и самок всех возрастов) не превышают 30 особей, в других трех численность составляет от 30 до 125 животных, при этом только незначительная часть из них способна к размножению. Низкая и варьирующая численность островных



группировок, зависящая главным образом от внешних факторов, продолжит истощать генетическое разнообразие популяции в ряду последующих поколений. Только за период с 2009 по 2015 г., фактически за одно поколение, отмечено сокращение ресурсов островного подвида в два раза. Двукратное снижение численности популяции уже привело к значительной утрате общей гетерозиготности сахалинской кабарги, что подтверждается появлением на острове особей-альбиносов [15].

Низкие темпы воспроизводства — один из ключевых факторов спада динамики островной популяции кабарги. Наиболее продуктивная часть у этого подвида — это средневозрастные (3–5 лет) самки. Оказалось, что средняя реализуемая рождаемость для сахалинской кабарги (на маршрутах в природе встречено 11 взрослых самок и один теленок) составляет в благоприятные годы лишь 0.1 теленка на самку в год. Во всех обследованных группировках, размещенных в центральной и южной частях Сахалина, смертность уже превысила темпы рождаемости.

Отсутствие роста группировок за последние 20 лет объясняется также высоким уровнем смертности телят-сеголеток в критически трудный для животных зимний период. Сахалинской кабарге свойствен также низкий процент самок, принимающих участие в размножении. На темпы воспроизводства в основных группировках островного подвида существенное влияние оказывает соотношение полов среди взрослых особей. Во всех обследованных нами очагах обитания кабарги было отмечено преобладание самок над самцами (соотношение 3:1), в то время как в стабильных по численности материковых популяциях вида соотношение полов среди взрослых животных равно 1:1. Характер связи между низким уровнем выживания потомства и нарушением естественной пропорции полов объясняется высоким уровнем смертности среди самцов всех возрастов из-за разных стратегий кормодобывания у разнополых особей. По нашим наблюдениям, самки чаще кормятся у ветровальных деревьев или в местах локального скопления лишайникового корма, в то время как



Новорожденные телята кабарги встречаются редко.



Взрослая самка кабарги.

у самцов преобладает кормление во время перемещений по участкам обитания. Низкие запасы эпифитных лишайников (менее 1 кг/га) в очагах их существования ограничивают питание самцов, собирающих опавшие части с поверхности снега на маршрутах передвижения, из-за чего они чаще, чем самки гибнут в зимнее время. Для Сахалина характерна общая низкая продуктивность горно-таежных лесов, особенно по запасам лишайников, что сдерживает освоение кабаргой новых лесных территорий и объясняет пятнистый характер размещения животных в горной местности.

Незаконная добыча животных — это также важный фактор снижения численности кабарги на Сахалине. Только за период с 1990 по 1994 г.,

по нашей оценке, было незаконно добыто около 600–650 особей [16]. Общий урон от браконьерства достигает в последние годы 10–15 животных.

\* \* \*

Полученные на рубеже тысячелетий новые данные свидетельствуют, что причина катастрофического снижения численности и вероятного грядущего вымирания сахалинской кабарги обусловлена главным образом хозяйственной деятельностью человека. Многолетний отрицательный тренд указывает на то, что на заключительном этапе сокращения численности островной популяции задействован механизм снижения репродуктивного потенциала, включающий превышение смертности над рождаемостью. Он имеет опосредованные связи с процессами разрушения среды обитания, приводящими к утрате лишайников — основной кормовой базы кабарги. Современное снижение численности напоминает депрессию XIX в., когда ресурсы сахалинской кабарги сократились с нескольких тысяч до сотен осо-

бей, но спад не перешел рубеж необратимого исчезновения подвида в условиях сохранения в тот период еще не разрушенных человеком местобитаний. Прогнозируемое вымирание островной популяции последует при снижении ресурсов подвида ниже порогового уровня, близкого к двукратной численности (200–220 особей) минимальной жизнеспособной популяции, обусловленной как биологическими особенностями вида, так и факторами среды. Поскольку современная численность сахалинской кабарги практически достигла этого уровня, вероятность выживания островного подвида будет определяться продолжительностью существования всех его группировок, изолированных географически в настоящее время. Учитывая сложный характер отношений диких копытных со средой обитания и различия в продолжительности жизни отдельных особей, можно допустить существование сахалинской кабарги на протяжении всего лишь двух ближайших десятилетий. У нас остался последний шанс и есть еще время, чтобы спасти островную форму. ■

## Литература

1. Cuvier G. Essay on the Theory of the Earth. 5<sup>th</sup> ed. Edinburgh; L., 1827.
2. Данилкин А.А. Охота, охотничье хозяйство и биоразнообразие. М., 2016.
3. Приходько В.И. Эволюция кабарговых: морфологические, молекулярно-генетические, этологические и экологические аспекты. М., 2012.
4. Кожевников Ю.П., Железнов-Чукотский Н.К. Берингия: история и эволюция. М., 1995.
5. Холодова М.В., Приходько В.И. Молекулярно-генетическое разнообразие кабарги (*Moschus moschiferus* L., 1758) (Ruminantia, Artiodactyla) северной группы подвидов // Генетика. 2006. Т.42. №7. С.1–8.
6. Туркин Н.В., Сатунин К.А. Звери России. М., 1902.
7. Щербаков А.Н. Кабарга и ее мускус // Ученые записки Хабаровского педагогического института. 1959. Т.4. С.9–87.
8. Franklin I.R. Evolutionary change in small populations // Conservation Biology: an Evolutionary-Ecological Perspective / Eds: M.E.Soule, B.A.Wilcox. Sunderland, 1980. P.135–150.
9. Jamieson I.G., Allendorf F.W. How does the 50/500 rule apply to MVPs? // Trends in Ecology & Evolution. 2012. V.27. P.578–584.
10. Frankham R., Bradshaw C.J.A., Brook B.W. Genetics in conservation management: revised recommendations for the 50/500 rules, Red List criteria and population viability analyses // Biological Conservation. 2014. V.170. P.56–63.
11. Frankel O.H., Soule M.E. Conservation and Evolution. Cambridge, 1981.
12. Shaffer M.L. Minimum population sizes for species conservation // Bioscience. 1981. V.31. P.131–134.
13. Peters R.H., Raelson J.V. Relations between individual size and mammalian population density // The American Naturalist. 1984. V.124. P.498–517.
14. Приходько В.И. Динамика популяции и вымирание сахалинской кабарги, *Moschus moschiferus* L. (Moschidae, Cetartiodactyla) // Вестник охотоведения. 2016. Т.13. №3. С.162–169.
15. Козин А.Н. Находка кабарги (*Moschus moschiferus*) — альбиноса на Сахалине // Вестник Сахалинского музея. 2000. №7. С.263.
16. Приходько В.И. Стратегия сохранения сахалинской кабарги в России. М., 2010.

# Гравитационное линзирование сверхновой

О.Ю.Цупко,

кандидат физико-математических наук  
Институт космических исследований РАН  
Москва

Недавно произошло небывалое, казалось бы, событие: было заранее определено, где вспыхнет сверхновая, и предсказание полностью оправдалось. На самом деле ничего удивительного в этом факте нет, но, чтобы понять причину первого подобного успеха, придется сделать небольшое введение.

Напомним, что зрение, как и любой другой механизм человеческого восприятия, иногда может быть очень обманчивым. Вообще говоря, мы никогда не видим предметы такими, какие они есть. Во-первых, испущенному или отраженному объектом лучу света нужно время, чтобы дойти до нас, т.е. мы всегда наблюдаем их состояние в прошлом. Разумеется, запаздывание света становится существенным лишь на космических масштабах. Так, на путь от Солнца до Земли лучи тратят около восьми минут. В случае же еще более далеких объектов свету требуется миллионы и миллиарды лет, чтобы добраться до нас. Во-вторых, наше зрительное восприятие настроено на то, что свет распространяется прямолинейно. Если же по разным причинам луч идет к нам по криволинейной траектории, видимые положение и форма предметов искажаются. Например, из-за эффекта преломления изображение при взгляде через оптическую линзу отличается от истинного, ложка в стакане воды кажется сломанной, а глубина водоема — меньшей, чем в действительности. Бывает и еще более интересная ситуация: может существовать несколько траекторий, по которым луч света попадает от предмета нам в глаза. В этом случае видны несколько изображений одного и того же предмета, как это происходит, например, в зеркале.

Однако лучи света могут отклоняться от прямолинейного распространения не только из-за эффекта преломления, но и по другим причинам — например, около массивных объектов под действием их гравитации. Современное описание сильно гравитирующих масс основано на Общей теории относительности Эйнштейна (ОТО). ОТО позволяет описывать движение объектов в гравитационном поле более точно, чем закон всемир-

ного тяготения Ньютона. Кроме того, она предсказывает несколько физических эффектов, отсутствующих в ньютоновской теории (собственно, проверка этих эффектов при наблюдении за космическими объектами — их движением, строением, свойствами — и убедила ученых в справедливости ОТО).

В частности, согласно ОТО, лучи света при пролете около массивных объектов отклоняются (рис.1). Этот эффект и связанные с ним физические явления (круг которых довольно широк) можно обнаружить только в космосе, при астрономических наблюдениях, когда свет движется около очень тяжелых тел. По аналогии с самым известным оптическим инструментом — линзой — его обозначают как гравитационное линзирование.

Лучи света от далеких источников за свой долгий путь по Вселенной к Земле могут отклоняться

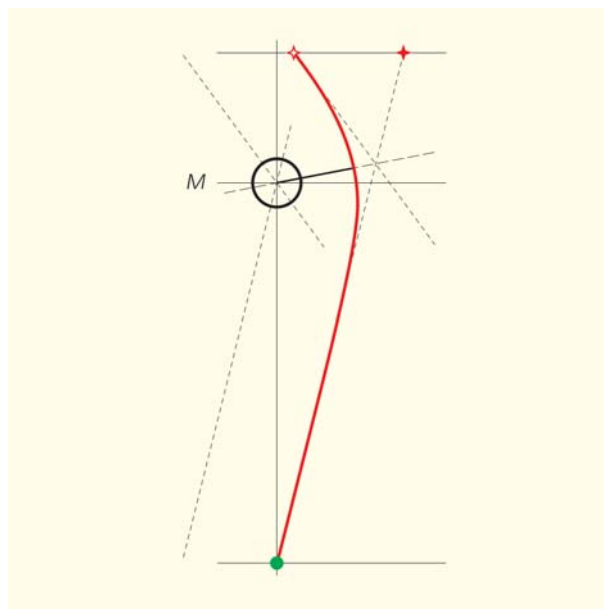


Рис.1. Отклонение луча света, проходящего около массивного тела. Угол отклонения тем больше, чем ближе луч оказывается к телу и чем больше масса тела. В результате наблюдаемое угловое положение далекого источника света изменяется из-за гравитационного линзирования.



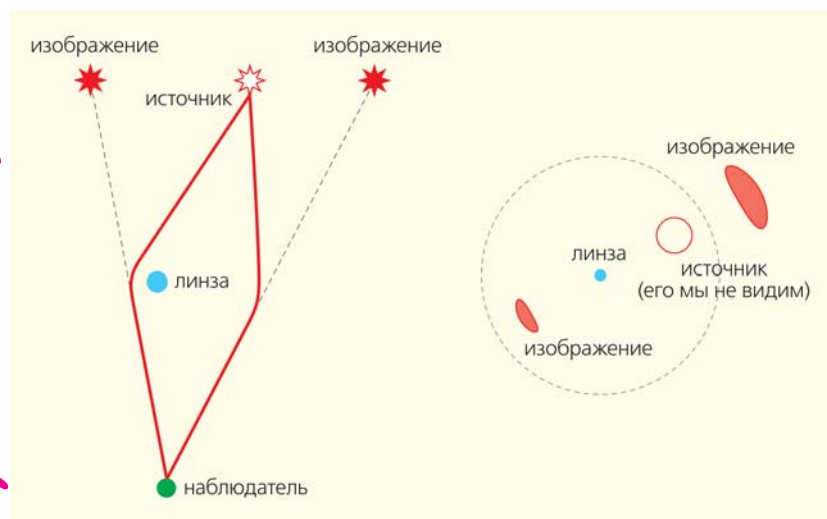


Рис.2. Возникновение двух изображений одного и того же источника при гравитационном линзировании за счет того, что лучи света огибают линзу с двух сторон. В том месте неба, где источник реально находится, он не наблюдается. Справа показано, как это видит наблюдатель.

различными астрономическими объектами: звездами, галактиками, скоплениями галактик. В этом случае звезда, галактика или скопление называется гравитационной линзой, наблюдатель же видит источник не там, где тот на самом деле находится, а в другом месте на небе (см. рис.1).

Одно из самых красивых проявлений гравитационного линзирования состоит в возникновении

многократных изображений одного и того же источника, если свет идет с разных сторон от линзы (рис.2). При этом изображения могут быть сильно искажены, что проиллюстрировано на рис.3. Иногда распределение массы в линзе таково, что существует несколько (более двух) траекторий, по которым лучи могут достичь наблюдателя, — тогда мы увидим на небе столько же изображений, находящихся близко друг от друга. Самый известный пример возникновения нескольких изображений при гравитационном линзировании — так называемый крест Эйнштейна, четыре изображения одного и того же удаленного источника (рис.4). Таких наблюдательных примеров, в которых есть несколько изображений, уже накоплено больше сотни.

Гравитационное линзирование сейчас служит мощнейшим астрофизическим инструментом для проверки ОТО, для изучения удаленных объектов, распределения темной материи и крупномасштабной структуры Вселенной, реликтового излучения и даже для открытия планет.

Одно из новых направлений в исследованиях гравитационного линзирования — учет плазмы [1]. При расчете и анализе эффектов гравитационного линзирования обычно считается, что свет распространяется в вакууме. Однако космическая среда заполнена межзвездным газом, который находится в ионизированном состоянии, т.е. реально лучи света на пути от источника к наблюдателю распространяются через плазму. В ее присутствии углы отклонения лучей отличаются от случая вакуума.

Углы отклонения света при одновременном влиянии и гравитации, и плазмы становятся существенно сложнее рассчитать. Во-первых, появится дополнительное отклонение за счет неоднородности плазмы, через которую распространяются лучи, т.е. преломление. Во-вторых, гравитационное отклонение само по себе становится другим, если луч движется не в вакууме, а в плазме. А наличие дисперсии (зависимости траектории от частоты света) плазмы приводит к тому, что получающиеся углы отклонения не только отличаются от вакуумных, но и зависят от частоты фотонов.

Если гравитационная линза окружена плазмой, лучи света разных частот отклоняются на разные углы, т.е. она, подобно призме, раскладывает свет в спектр. В тех гравитационно-линзовых системах, где мы видим несколько изображений, благодаря присутствию плазмы положение этих изображений будет немного различаться

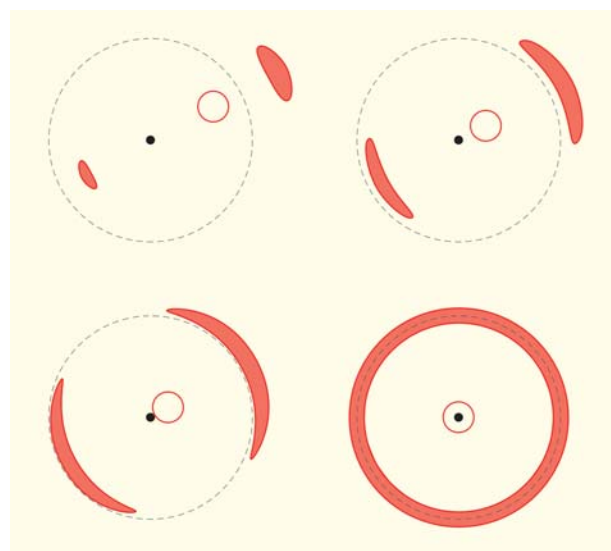


Рис.3. Возникновение вытянутых дуг и кольца Эйнштейна—Хвольсона при гравитационном линзировании. Чем ближе реальное положение источника к линии, проходящей через наблюдателя и линзу (т.е. к центру картинки), тем более вытянутыми становятся два изображения-дуги. Если источник, линза и наблюдатель находятся на одной прямой, наблюдатель видит одно изображение источника в виде кольца.

при наблюдении на разных частотах (рис.5). Наиболее существенно этот эффект проявляется для частот радиодиапазона, и попытаться обнаружить его можно, проводя наблюдения на радиотелескопах и сравнивая полученные результаты на разных частотах. Так можно получить информацию о свойствах вещества, окружающего гравитационную линзу, и, кроме того, дополнительно проверить ОТО.

Недавно и пронаблюдали впервые гравитационное линзирование сверхновой, причем сдвинутое по времени. Важная особенность систем типа креста Эйнштейна — то, что свет от каждого изображения идет к наблюдателю дольше, чем если бы он шел по прямой линии в отсутствие линзы. Временная задержка по сравнению с прямолинейным приходом света складывается из двух частей. Во-первых, при наличии гравитационного отклонения удлиняется сама траектория. Во-вторых, свет распространяется через гравитационное поле, а в соответствии с ОТО время около гравитирующих тел идет по-другому — медленнее. Поскольку лучи, формирующие каждое изображение, идут по различным траекториям, то и временная задержка для каждого изображения — немного разная. Значит, если в самом источнике произошло какое-то событие (изменение потока, например), астроном увидит это событие несколько раз в разное время! При этом хорошо, если это событие сильно выделяется на фоне остальных наблюдений, — тогда оно будет хорошо «узнаваемо» в каждом изображении. Взрыв сверхновой — очень удачный кандидат в этом отношении.

Сверхновая звезда, или просто сверхновая, представляет собой резкую вспышку звезды с выделением огромного количества энергии. Такой взрыв происходит в конце эволюции некоторых звезд и по яркости может сравниться с яркостью всей галактики, в которой эта звезда вспыхнула. Для ученых сверхновые представляют большой интерес, так как позволяют «заглянуть» и в теорию строения и эволюции звезд, и даже в космологию.

В 1964 г. норвежский астрофизик С.Рефсдал опубликовал теоретическую работу, в которой описывал гравитационное линзирование сверхновой [2]. Поскольку свет от сверхновой может идти разными путями, а разница между временами движения света по этим траекториям может составлять месяцы и даже больше, наблюдатель сначала увидит сверхновую в одном месте, а позже, через некоторое время, ее же — в другом. Исходя

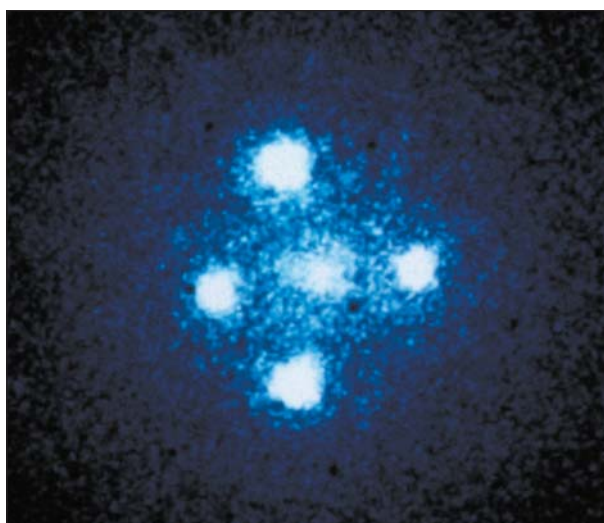


Рис.4. Гравитационная линза G2237+0305, часто называемая крестом Эйнштейна, по наблюдениям телескопа «Хаббл». Видны четыре изображения одного и того же квазара (далекого источника, представляющего собой активное ядро галактики — компактную область, окружающую сверхмассивную черную дыру). Этот квазар находится от нас на расстоянии 8 млрд св. лет. Линзой выступает галактика, находящаяся ближе, на расстоянии 400 млн св. лет. Яркое ядро линзирующей галактики видно на этом фото в центре. Считается, что в центре должно быть также пятое изображение квазара, очень слабое и потому трудно выделяемое на фоне галактики-линзы.

[hubblesite.org/image/22/news\\_release/1990-20](http://hubblesite.org/image/22/news_release/1990-20)

из разницы во времени, по идее Рефсдала, можно определить постоянную Хаббла и массу линзирующей галактики.

Впервые пронаблюдать подобное линзирование сверхновой удалось только спустя 50 лет. В ноябре 2014 г. астрономы увидели сразу четыре изоб-

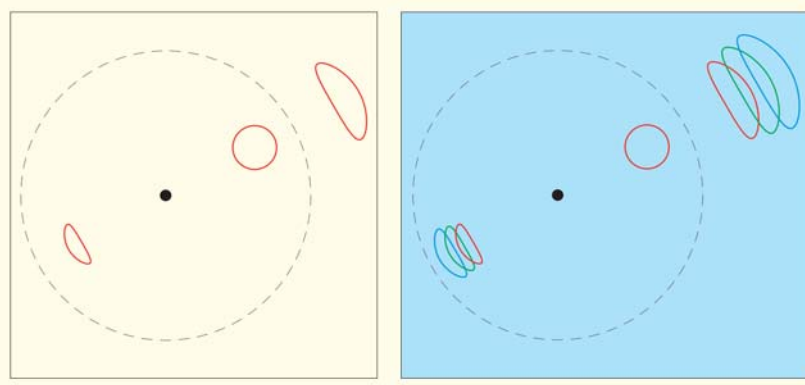


Рис.5. Картина линзирования при наличии плазмы вокруг гравитирующего тела. В этом случае при наблюдениях в разных диапазонах длин волн положение изображений будет различным. Можно сказать, что за счет плазмы изображения размываются в своеобразную радугу. Поскольку для космических условий эти эффекты существенны только для радиодиапазона, получается радиорадуга.

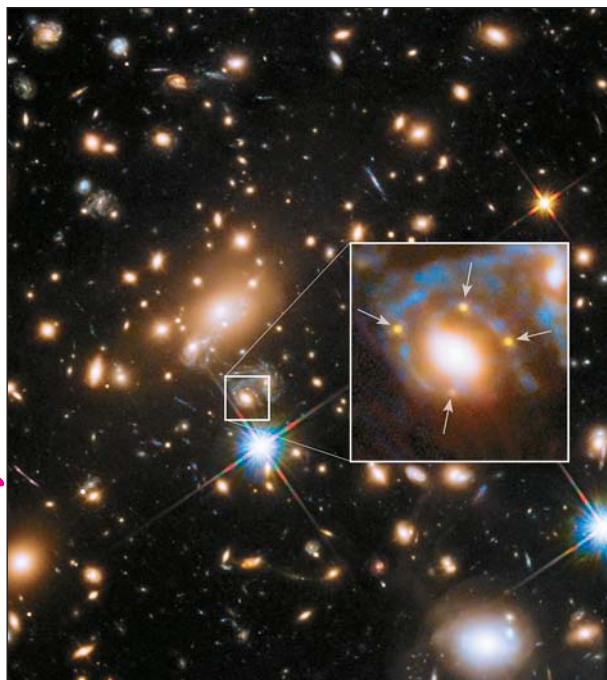


Рис.6. Наблюдение четырех изображений сверхновой при линзировании на одной из галактик, входящих в большое скопление галактик.

[apod.nasa.gov/apod/ap150309.html](http://apod.nasa.gov/apod/ap150309.html)

ражения одной и той же сверхновой [3] (рис.6). Гравитационной линзой здесь служит одна из галактик в большом скоплении галактик. Эта галактика-линза разделила свет от сверхновой на четыре луча, в результате чего возникло четыре отдельных изображения одной и той же сверхновой. Между этими изображениями наблюдалась временная задержка порядка нескольких дней. Таким образом, астрономы впервые увидели гравитационное линзирование сверхновой; назвать эту сверхновую предложили именем Рефсдала.

Однако все оказалось гораздо интереснее. Галактика, в которой находится вспыхнувшая сверхновая звезда (ее называют «родительской»), линзируется всем скоплением галактик как целым, в результате чего имеется три изображения этой родительской галактики. Значит, должно наблюдаться три изображения сверхновой, в каждом из галактических. Но при этом одно из изображений сверхновой еще дополнительно разделяется на четыре штуки, за счет линзирования на одной из галактик скопления (рис.7). Именно такие четыре изображения в одном из изображений родительской галактики и наблюдались. Возник вопрос, в какое время произошли или произойдут вспышки сверхновой в двух других изображениях родительской галактики, возникающие за счет линзирования сверхновой на всем скоплении.

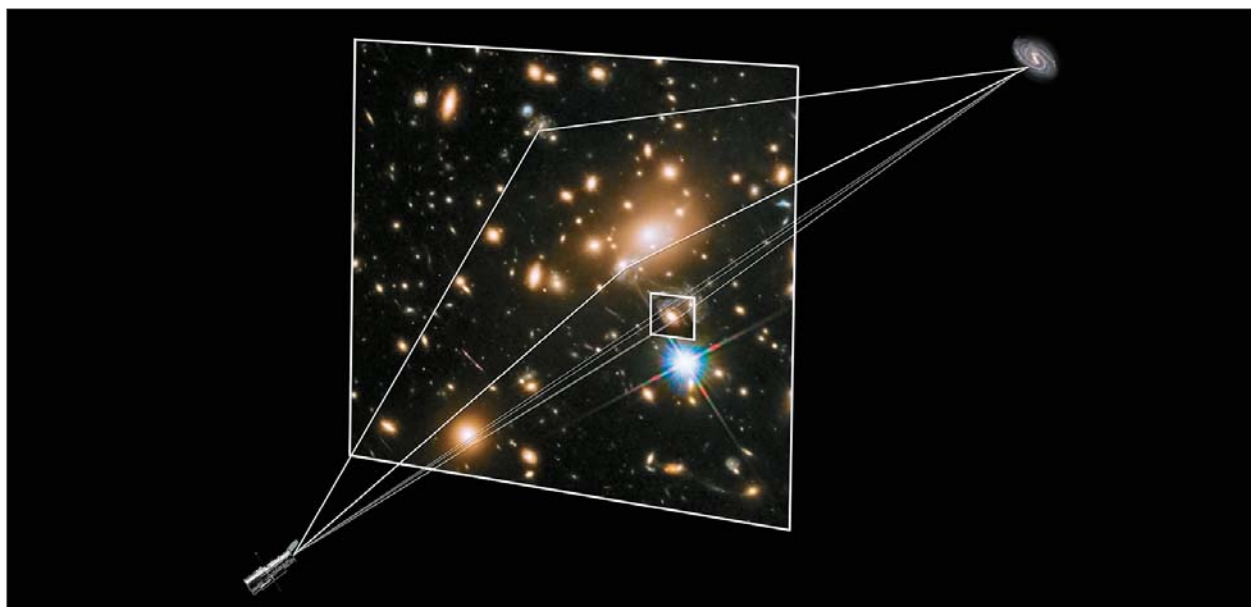


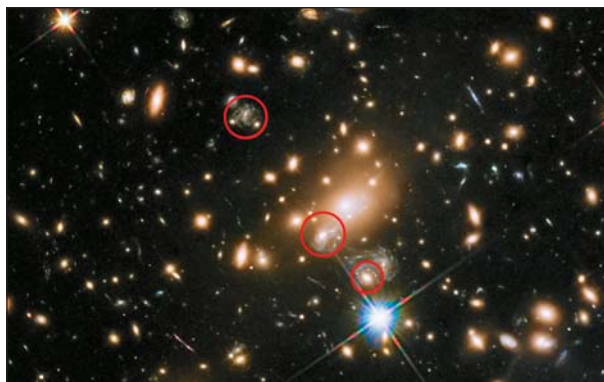
Рис.7. Возникновение нескольких изображений сверхновой Рефсдала, ход лучей. Удаленная галактика (в правом верхнем углу картинки) линзируется огромным скоплением галактик MACSJ1149.5+2223. В результате этого наблюдаются три изображения этой галактики. Свет от нее приходит к наблюдателю тремя разными путями и идет разное время (разница составляет годы). Поэтому сверхновая, вспыхнувшая в линзируемой галактике, должна наблюдаться три раза в разное время. Более того, одно из таких изображений сверхновой еще дополнительно линзируется отдельной галактикой большого скопления, за счет чего оно разделилось на четыре изображения, с временной разницей в несколько дней. Таким образом, можно сказать, что сверхновая Рефсдала участвует сразу в двух линзированиях: на большом скоплении галактик и еще на отдельной галактике из этого скопления.

[www.spacetelescope.org/images/heic1525c/](http://www.spacetelescope.org/images/heic1525c/)



Рис.8. Многократное появление сверхновой Рефсдала. В верхнем изображении галактики (внутри верхнего красного кружка) сверхновая была видна примерно 10–20 лет назад, но астрономы не зафиксировали это событие. В нижнем изображении галактики сверхновая вспыхнула в ноябре 2014 г. Ее изображение дополнительно пролинзировалось отдельной галактикой в скоплении, за счет чего разделилось на четыре, с временной разницей в несколько дней. Было предсказано, что в среднем изображении галактик сверхновая вспыхнет в будущем, и это произошло в декабре 2015 г.

[www.spacetelescope.org/images/ann1526a/](http://www.spacetelescope.org/images/ann1526a/)



В октябре 2015 г. (примерно через год после наблюдения сверхновой Рефсдала) появилась работа, авторы которой моделировали скопление галактик, служащее линзой [4]. В результате моделирования скопления несколькими научными группами было выяснено, что вспышка сверхновой в одном из изображений родительской галактики уже была в прошлом, между 1994 и 2004 гг., но не наблюдалась. А в другом изображении родительской галактики сверхновая должна вспыхнуть в будущем, в течение года. Тем самым ученые предвосхитили, что скоро появится новое изображение сверхновой (рис.8). Предсказание ученых сбылось: 11 декабря 2015 г. в ожидаемом месте вспыхнула сверхновая [5]. Она появилась именно в том из трех изображений родительской галактики, где и ожидалось (рис.9).

Итак, сверхновая Рефсдала стала уникальной сразу по двум причинам. Впервые наблюдалось несколько изображений одной и той же сверхновой, наподобие креста Эйнштейна (ноябрь 2014 г.).

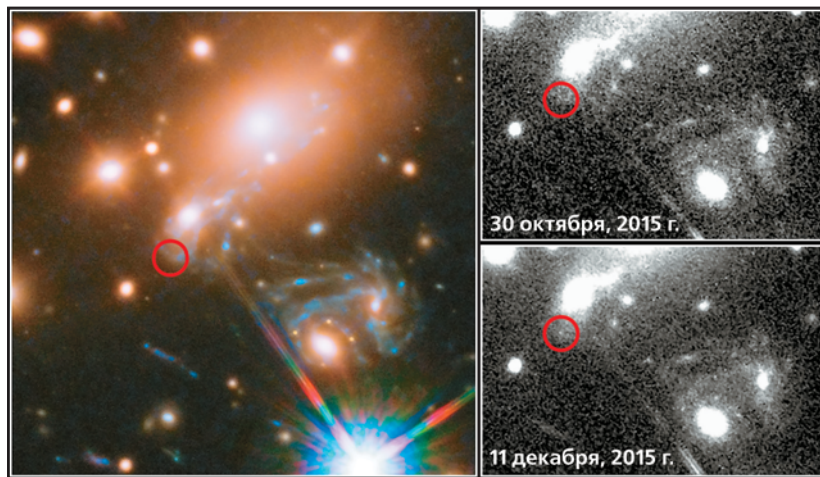


Рис.9. Появление предсказанного изображения сверхновой. На изображении слева кружком отмечено место, в котором должна была появиться сверхновая. Правее и ниже на этой же картинке видны четыре изображения сверхновой в другом изображении родительской галактики. Вверху справа показаны наблюдения в октябре 2015 г., когда была начата программа наблюдений для детектирования нового появления сверхновой. Справа внизу показано открытие сверхновой 11 декабря 2015 г.

[www.spacetelescope.org/images/heic1525a/](http://www.spacetelescope.org/images/heic1525a/)

Кроме того, это первый случай, когда с помощью анализа гравитационного линзирования удалось предсказать следующее появление нового изображения сверхновой (в декабре 2015 г.). ■

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 15-12-30016).

## Литература

1. *Bisnovatyi-Kogan G.S., Tsupko O.Yu.* Gravitational lensing in plasmic medium // *Plasma Physics Reports*. 2015. V.41. №7. P.562–581 (Физика плазмы. 2015. Т.41. №7. С.609–628.)
2. *Refsdal S.* On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1964. V.128. P.307.
3. *Kelly P.L., Rodney S.A., Treu T. et al.* Multiple images of a highly magnified supernova formed by an early-type cluster galaxy lens // *Science*. 2015. V.347. №6226. P.1123–1126.
4. *Treu T.* «Refsdal» meets popper: comparing predictions of the re-appearance of the multiply imaged Supernova behind MACSJ1149.5+2223 // *The Astrophysical Journal*. 2016. V.817. №1. Article id. 60. (Первоначальная версия статьи в электронном архиве препринтов публикаций [www.arxiv.org](http://www.arxiv.org) появилась 20 октября 2015 г.)
5. *Kelly P.L., Rodney S.A., Treu T. et al.* Deja vu all over again: the reappearance of Supernova Refsdal // *The Astrophysical Journal Letters*. 2016. V.819. №1. Article id. L8.

# УЧЕНЫЙ ПЕРВОГО РЯДА

## Памяти Л.Д.Фаддеева

Кончина Людвиг Дмитриевича Фаддеева коснулась нас напрямую — с 1990 по 1993 гг. он был главным редактором журнала «Природа» и, несмотря на свою географическую удаленность (он жил в Северной столице), по-настоящему вникал в редакционные дела. Внимательный к различным точкам зрения, он умел выбрать верный на перспективу вариант, в том числе и «разруливая» критические ситуации. Краеугольный научный вклад Фаддеева — в решение квантовой задачи трех тел, в создание теории квантовых калибровочных полей, в развитие метода обратной задачи теории рассеяния и др. — признан таковым во всем мире. Сам Людвиг Дмитриевич не раз очерчивал промежуточные итоги в публикациях, которые могут служить в некоторой степени его научной автобиографией (см., например: Faddeev L.D. 40 Years in Mathematical Physics. World Scientific Series in 20th Century Mathematics, 2. NJ, 1995). Мы представляем слово от имени его учеников, сотрудников лаборатории математических проблем физики в Ленинградском отделении Математического института имени В.А.Стеклова АН СССР, Михаилу Арсениевичу Семенову-Тян-Шанскому, который на протяжении нескольких десятилетий работал с ним бок о бок. В самом же обобщенном виде фундаментальные достижения Фаддеева концентрируются в лаконичном утверждении (редчайший случай!): вывел взаимодействие математики и физики на качественно новый уровень. Неслучайно одна из его статей в «Природе» называлась «Математический взгляд на эволюцию физики» (1989. №5. С.3–16). Целью, стоящей перед физиками-теоретиками и специалистами по математической физике, он видел «окончательную формулировку структуры материи, которая будет дана лишь на математическом языке».

Но прежде всего мы хотим вспомнить взгляды Фаддеева на роль науки в обществе, на черты, определяющие современное мировоззрение, на качества, необходимые ученому, на важность популяризации научных знаний, поэтому повторяем его небольшую, но программную статью в №1 журнала за 1991 г. Там сформулированы тезисы, как говорится, «на все времена», а отмеченные проблемы, увы, не утратили своей актуальности и спустя четверть века. Хотя на посту нашего главреда Людвиг Дмитриевич оставался недолго, эти четыре года были

переломными, когда вся наша жизнь переустраивалась на другой основе, совсем в иной стране. При всех трудностях периода «изменения первых принципов» журнал тогда сохранить удалось, как выжил он и в революцию, и в Гражданскую и в Великую Отечественную войны. Зато в этом у нас совсем нет уверенности сегодня, в эпоху всеобщей «оптимизации», во времена буйного повсеместного разрастания не просто бюрократической, а имитационной опухоли, когда реальная работа подменяется отчетами о ней, уровень компетентности начальства устойчиво сместился в область отрицательных значений, все живое выхолащивается, самостоятельное объявляется враждебным, а из яркой словесной шелухи выглядывают уши финансовых интересов. И если в начале 90-х поддерживала вера в то, что царство демократии не за горами и в итоге все окажутся в выигрыше от кардинальных перемен, теперь, к сожалению, таких надежд больше нет. Последние события вокруг выборов в Российской академии наук, нашем учредителе, только усугубили пессимизм.

Академию наук подвергли небывалому унижению, не дав выбрать своим президентом видного ученого с мировым именем и научно-организационным опытом. Подобные качества, непременно сочетающиеся с наличием собственного мнения и стремлением его отстаивать, оказываются перпендикулярными критериям властей, которые последовательно искореняют последние остатки автономии Академии, уже лишив ее своего исследовательского инструментария — институтов. Но не сервильное собрание, послушно выдающее «одобрямс» сомнительным, конъюнктурного характера начинаниям чиновников, нужно стране. Без настоящей науки у нее нет осмысленного будущего, академические же свободы — необходимое (хоть и недостаточное) условие успеха научного поиска в наши дни. Разумеется, в РАН есть проблемы, и немалые, но они только умножились при неестественном слиянии трех академий, так что применяемое лекарство оказывается страшнее болезни. В идеале Академия как сообщество лучших умов должна была бы формулировать научную повестку дня и обеспечивать смену ее «агрегатного состояния» — из плана в результат. Именно так представлял себе роль Академии наук Людвиг Дмитриевич.

# Научное мировоззрение и «Природа»

Л.Д.Фаддеев

Вступление на пост главного редактора журнала «Природа» дает мне удобную возможность выразить свои мысли о цели науки, ее месте в обществе. Я не думаю, что скажу здесь что-либо новое. Это скорее изложение моего собственного символа веры, данного мне моим образованием и опытом, обращение к единомышленникам, которых я надеюсь найти среди читателей журнала.

Уже почти 80 лет «Природа» поддерживает высокие традиции подлинно научного мировоззрения. Ее аудитория — широкие круги научной общественности, т.е. та социальная прослойка, которая имеет право называться учеными.

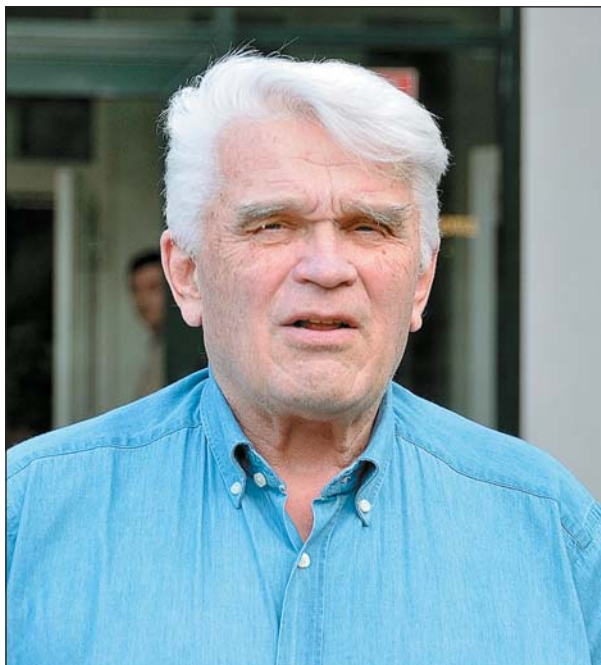
Оговорюсь заранее, что термины «наука» и «ученый» будут пониматься в узком смысле, т.е. применительно к естествознанию. То, что у нас называется отраслевой наукой (т.е. инженерное дело), а также гуманитарные и социальные науки имеют свои правила и методы, и я не могу их профессионально обсуждать.

Что, по моему мнению, составляет основу научного мировоззрения, что дает право называться ученым и естествоиспытателем? Из многих положений я бы выделил пять: профессионализм, убежденность, скептицизм, рациональность и интуицию. Остановлюсь на этом немного подробнее.

**Профессионализм.** Без профессиональных знаний и навыков нельзя быть ученым. Это очевидно и не нуждается в обсуждении. Впрочем, это положение в равной мере относится к любой профессиональной деятельности — от инженерного дела до искусства. В нашем случае основное отличие состоит в том, что общественное мнение не всегда может отличить профессионала в науке от самозванца-лжеученого — у читателя-неспециалиста нет для этого тех же профессиональных знаний.

Таким образом, только доверие может стать источником положительного отношения общества к ученым. Оно основано на историческом опыте, традициях научных школ, международном признании. Нарушение этого доверия — во имя самых важных, но сиюминутных интересов — тяжелое преступление перед наукой и обществом.

Многочисленные ссылки на научную обособанность своих действий, делавшиеся в недавнем прошлом людьми, не имеющими на это профессионального права, во многом дискредитировали науку и ее возможности. Поэтому каждый ученый нашей страны переживает неожиданные и незаслуженные упреки в адрес научного сообщества.



Академик Людвиг Дмитриевич Фаддеев (1934–2017).

Фото М.А.Семенова-Тян-Шанского

Всякий подлинный профессионализм связан с элитарностью. Естественно, это относится и к ученым. В наше время эгалитарных тенденций надо утверждать и отстаивать право ученых на присущую им выделенность.

**Убежденность.** Трудно заниматься научными исследованиями не будучи убежденным в своих знаниях, перспективности выбранного направления. Здесь большую роль играет доверие к коллегам в прошлом и настоящем. Научное мировоззрение — в отличие от средневекового мышления — исходит из того, что знания, накопленные за последние 300 лет, не будут отмечены будущими исследователями, а практически будут входить в их мировоззрение. Процесс накопления и формулировки знаний сам по себе эволюционен, новые законы включают в себя старые как более частный случай. Политические революции, полностью отрицающие свергнутый общественный строй, не имеют аналогов в жизни науки.

Все это приводит к определенному консерватизму ученых и научного сообщества в целом. Но важно понимать, что этот консерватизм не имеет ничего общего с застоєм, схоластикой



и идолопоклонством. Профессиональное понимание и уважение традиций, стремление к их сохранению и преумножению — это здоровый консерватизм.

Поэтому странно, нелепо и грустно видеть попытки опровергнуть, к примеру, законы релятивистской динамики (частную теорию относительности) или второй закон термодинамики, принимаемые подчас даже обладателями ученых степеней и званий на основании сведений, почерпнутых из научно-популярной литературы.непрофессиональное отрицание признанных достижений науки противоречит научному мировоззрению и не имеет ничего общего с новаторством.

**Скептицизм.** Процесс научного познания природы далек от завершения; одно это уже оправдывает существование ученых. Ученый, работающий над новыми закономерностями, должен быть свободен от догм, давления априорных соображений и предрассудков. Поэтому включение коллективного опыта в собственное сознание ученого сопровождается естественным скептицизмом, стремлением проверить, по возможности, самому то, что утверждают авторитеты. Не менее важно сознавать, что реально можно сделать или понять на данном уровне развития науки.

Так, в том, что большая теорема Ферма будет доказана, не сомневается ни один математик. Это не мешает относиться с оправданным скептицизмом к доказательствам, которыми постоянно заполнена почта математических институтов. Просто математика должна еще развиваться, прежде чем будет найден адекватный подход к этой проблеме. Это же относится и, скажем, к проблеме органической эволюции. Можно критиковать дарвинизм за его противоречия и неполноту, но выход будет найден (как во всяком случае считаю я) только на пути дальнейшего развития генетики и молекулярной биологии.

Здоровый скептицизм — незаменимое оружие в борьбе с априорными теориями. На заре современного научного мировоззрения с его помощью были отмечены астрология и теория флогистона, а в прошлом веке — теория самозарождения. Сейчас, когда антинаука снова подымает голову, его роль важна как никогда.

**Рационализм.** Более подробно этот термин можно расшифровать как уверенность во всемогуществе научного познания.

Ему не следует придавать какие-либо субъективные оттенки, скажем, говорить о целесообразности устройства окружающего нас мира. Просто если уж ученый взялся описывать законы природы, то он исходит из того, что они есть и их можно открыть. Более того, он знает, что они будут открыты при помощи методов, которые уже известны, или новых соображений, которые подскажет его собственный опыт или опыт его коллег.

**Интуиция.** Каждый работающий ученый знает, какую роль в его научной жизни играют пред-

чувствия, озарения и «вещие сны». Можно говорить об особенностях работы человеческого мозга, о подсознании, которые когда-то в будущем получат объяснение. Но пока имеет смысл отделить эту часть научного творчества в самостоятельную проблему. Интуиция играет огромную эвристическую роль в естествоиспытательстве, ее проявление, как правило, предшествует рациональному опыту.

Итак, в научном мировоззрении должны находиться естественное сочетание, казалось бы, противоречащие друг другу категории: консерватизм убежденности и новаторство скептицизма, уверенность рационализма и неуловимая трансцендентальность интуиции. Абсолютизация любой из этих категорий недопустима. Только гармоничное их сочетание дает то, что мы называем научным мировоззрением. И, конечно, во главе стоит профессионализм. Риска повториться, скажу, что именно обладание профессиональными знаниями и квалифицированное их использование выделяют сообщество ученых.

Обсудим теперь вкратце положение ученых в обществе и их взаимоотношения. Поскольку, как уже сказано, широкой общественности непонятны мотивы, цели и методы научного творчества, она вправе относиться к ученым с недоверием, и со своей стороны ученые, имея собственные стимулы для работы, предпочли бы удалиться в «башню из слоновой кости», т. е. стать независимыми от общества.

Это, конечно, невозможно. Ученый и наука нуждаются в средствах, которые им может дать лишь общество. В наше время речь идет о больших вкладах, использование которых общество не может контролировать (подчеркну еще раз, что речь идет лишь о фундаментальных исследованиях в области естественных наук). Примером «дорогой науки» являются космические исследования или физика высоких энергий. Некоторое время политические соображения престижа или военной безопасности поддерживали подобные направления, а заодно и всю фундаментальную науку. Сейчас, в период изменения общественного мышления, общество должно оценить роль науки как таковой, не думая о ее непосредственных приложениях, и считать, что ее поддержка «оплачена» учеными предыдущих поколений. Нетрудно подсчитать, что Фарадей и Максвелл окупили фундаментальную науку на несколько веков вперед.

В свою очередь, ученые могут лучше всего оправдать это доверие только своей работой, а также предоставлением своих результатов бесплатно в распоряжение общества. Научные открытия не патентуются, они публикуются в научных журналах, открытых для всех. В этом же смысле наука не имеет национальных границ и политического лица.

Упомянув термин «политика», не могу удержаться от того, чтобы не сказать несколько слов

о взаимоотношении науки и политики, ученых и политических деятелей. Здесь много противоречий, источником которых является различие этих областей деятельности. Так, цели науки определены в ней самой и не зависят от внешних обстоятельств, в то время как политика призвана действовать в быстро меняющемся мире и модифицировать свои средства под влиянием этих изменений. Политика и наука — это два различных призвания, рекрутирующих людей с резко отличным один от другого образом мышления. Можно сказать, что научное мировоззрение часто конфликтует с политическим. Хорошо известны примеры людей, которые потерпели неудачу на научном поприще и приобрели большой успех в политической деятельности, часто даже и прогрессивной.

Отсюда и отношение к науке со стороны политиков, которое в наше время выражается, в основном, средствами массовой информации. В переживаемый нами переходный период это отношение весьма недоброжелательно. Имманентный консерватизм науки сознательно или бессознательно смешивается с консерватизмом политическим. Характерный термин, которым пресса окрестила академические учреждения — «официальная наука», хорошо иллюстрирует это положение.

В подобных обстоятельствах наука беззащитна. Нет ничего нелепее изменять научное мировоззрение под непрофессиональным давлением. Поэтому ученым не остается ничего другого, как пренебречь незаслуженными упреками и продолжать заниматься своим делом.

Зато небывалую питательную среду получает антинаука — от отрицания второго закона термодинамики через возрожденную астрологию и мифическое биополе до летающих тарелок. Трудно сказать, чего здесь больше — шарлатанства или патологии. Ясно одно — вся эта чертовщина никак не входит в научное мировоззрение. Характерная методология антинауки — сначала вводится глобальный термин, скажем «летающие тарелки» или «биополе», а затем вся действительность подгоняется под оправдание его реальности. Ни рационального мышления, ни скептицизма здесь нет ни грана.

Прискорбно видеть, как в этот громкий хор служителей антинауки входят рассекреченные в ходе конверсии работники всевозможных «ящиков». ВПК, сделавший так много для деформации нашей экономики, вносит свой вклад и в деформацию отношения к фундаментальной науке.

Что может противопоставить наука этому средневековому феномену? Спорить с непрофессиональной прессой бесполезно. Можно надеяться, что синдром антинауки практически замрет при стабилизации политической ситуации (что мы и видим, скажем, во Франции или США, на которые так любят необоснованно ссылаться наши уфологи). Однако, как и во все времена, наука может и должна обосновывать свое существование путем популяризации своих достижений и пропаганды научного мировоззрения. Журнал «Природа» будет неуклонно продолжать свое дело в этом направлении.

## О нашем учителе

М.А.Семенов-Тян-Шанский,

доктор физико-математических наук

Санкт-Петербургское отделение Математического института имени В.А.Стеклова РАН;  
Бургундский университет (Дижон, Франция)

Уход Фаддеева — огромная потеря для российской и мировой науки. Для нас, его учеников, это еще и тяжелая человеческая утрата. Мы ведь его знали и с ним работали почти 50 лет. Людвиг Дмитриевич сам несколько раз возвращался к своей научной автобиографии. Теперь о нем должны написать мы.

© Семенов-Тян-Шанский М.А., 2017

Жизнь Л.Д. была и счастливой, и вместе с тем драматической. Многие из того, о чем он мечтал еще в юности, ему удалось реализовать. Вместе с тем фундаментальная наука, которой он посвятил всю свою жизнь, оказалась не нужна современной российской власти, 20 лет вымаривавшей науку на голодном пайке, а затем демонстративно навязавшей унижительную «реформу» Академии наук, вопреки мнению научного сообщества. Об этих со-



Л.Д. Фаддеев во время концерта в честь его 80-летия (Дом ученых в Санкт-Петербурге, март 2014 г.).

Фото автора

бытиях Л.Д. говорил с большой горечью. В разных формах его противостояние некомпетентной власти продолжалось долгие годы — в 1990-е годы это была борьба за сохранение организованного им Международного математического института имени Эйлера, которая стоила ему здоровья, спровоцировав инфаркт. Исход этой борьбы остается неясным и сейчас, после его кончины. Не хочется начинать статью, посвященную памяти Людвигу Дмитриевича, с этих печальных обстоятельств. Правильнее начать с последней и достаточно редкой почести, которой Л.Д. был удостоен, — увы, всего за несколько месяцев до смерти.

### Квантовая проблема трех тел

В августе 2016 г. во время конференции по теории нескольких частиц в датском городе Орхус было объявлено об учреждении специальной медали имени Людвиг Фаддеева за выдающиеся работы по физике систем нескольких частиц. Учреждение именной почетной медали при жизни ученого — очень редкий случай. Можно вспомнить медаль имени Макса Планка, учрежденную в 1929 г. по случаю 70-летия ученого, причем первые две медали вручили самому М.Планку и А.Эйнштейну.

Кстати, Л.Д. тоже получил медаль Макса Планка — причем он был всего лишь третьим российским ученым, удостоившимся этой награды (вслед за Л.Д.Ландау и Н.Н.Боголюбовым). Появление медали имени Фаддеева, к сожалению, немного запоздало, Л.Д. в это время был уже тяжело болен. Тем не менее он сам приехал в Орхус и присутствовал на официальной церемонии. Первая такая медаль будет присуждена только в 2018 г.

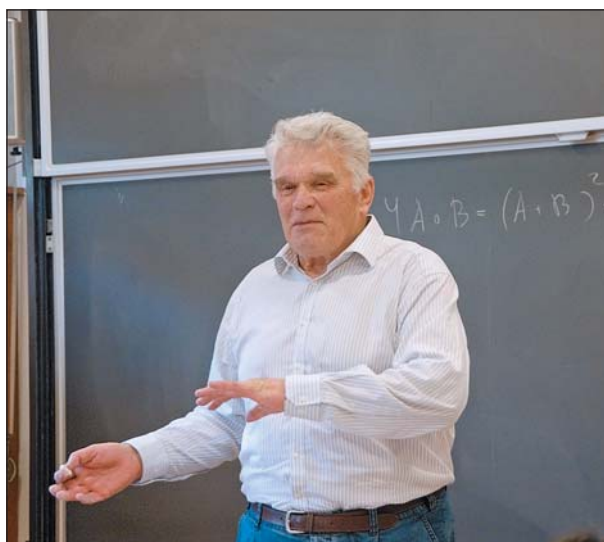
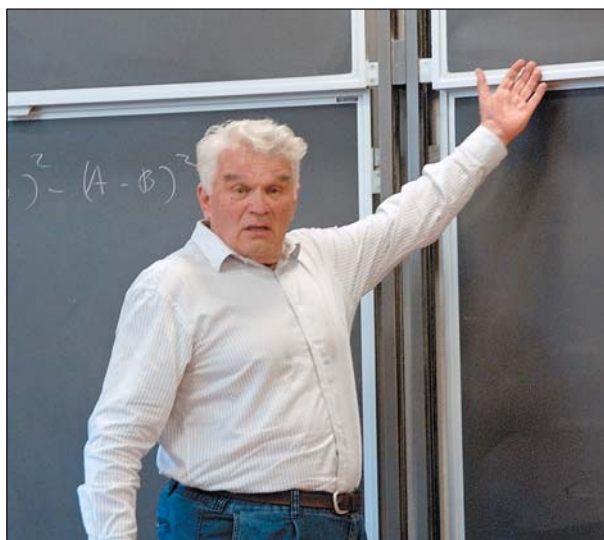
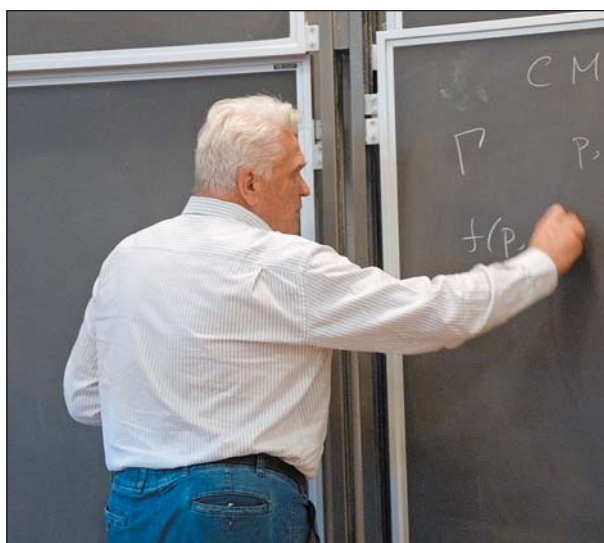
Учреждение новой медали было приурочено к 50-летию перевода его знаменитой монографии о квантовой задаче трех тел. Эта работа Л.Д. сразу же получила широкую известность. Задача трех тел в классической механике была поставлена самим И.Ньютоном. На протяжении 300 лет ею занимались крупнейшие математики, и она приобрела славу неразрешимой. Хотя численные методы, применяемые в астрономических расчетах, хорошо разработаны, вопрос о поведении трех тяготеющих тел при больших временах (в частности, о сходимости рядов теории возмущений и об устойчивости Солнечной системы) оказывается необычайно трудным. Квантовая задача оказалась проще — одной из любимых идей Л.Д. всегда была мысль, что квантовая механика проще классической. Сформулированные им интегральные «уравнения Фаддеева» послужили основой для эффективных численных вычислений.

Нужно сказать, что, хотя работа Л.Д. о квантовой задаче трех тел принесла ему заслуженную славу, сам он эту работу с самого начала рассматривал как пройденный этап. После публикации монографии «Математические вопросы квантовой теории рассеяния для системы трех частиц» (1963), он решительно перешел к другим задачам и больше ничего не писал на эту тему. (Это была его знаменитая формула — «если вы чувствуете, что вы готовы начать писать серийные статьи, нужно сменить тематику».) 1960-е годы были вообще для Л.Д. очень счастливым и плодотворным временем. После того как он завершил работу над квантовой задачей трех тел, в течение трех лет было получено решающее продвижение в теории Янга—Миллса, одновременно Л.Д. получил полное решение трехмерной обратной задачи (восстановление потенциала в уравнении Шрёдингера по данным рассеяния) — эту работу он считал своим лучшим аналитическим результатом — и кроме того, по просьбе И.М.Гельфанда, за несколько недель написал работу по теории автоморфных функций, где методы, пришедшие из квантовой механики, приводят к новым идеям и результатам в задаче аналитической теории чисел (теорией автоморфных функций занимался потом в нашей группе один из первых аспирантов Л.Д. А.Б.Венков). Работа о трехмерной обратной задаче была опубликована только через 10 лет — просто не было времени ее дописать, шла работа по квантовой теории поля, а потом еще и по теории солитонов.



В эти же годы Л.Д. начал формировать свою группу из студентов-старшекурсников физфака и матмеха, ставших затем его аспирантами и стажерами. Для нас, его учеников, время это было совершенно волшебное. Целый мир, можно сказать, открывался перед нами. Очень многие вещи, необходимые для работы с Л.Д., не входили в программу университета. Правда, базисная математика, связанная с квантовой механикой, на физфаке всегда преподавалась прекрасно — это была заслуга академика В.И.Смирнова, который разработал курс математики, специально ориентированный на квантовую физику; Л.Д. сам прошел эту школу в 1950-х гг. Но теперь нужно было выучить современную дифференциальную геометрию, группы и алгебры Ли, позже к ним добавилась алгебраическая топология, алгебраическая геометрия... Самое главное было ощущение связи «всего со всем» — фундаментальной физики и красивой математики. Л.Д. считал, что хорошие физические идеи должны привести к прогрессу в задачах чистой математики. В начале 1970-х гг. он вместе с Б.С.Павловым предпринял очень романтическую попытку доказать гипотезу Римана, одну из центральных нерешенных задач современной математики, методами квантово-механической теории рассеяния. Эта попытка не удалась, но идея очень красивая и, может быть, к ней еще вернуться. С другой стороны, Л.Д. всегда считал, что только очень красивая математика имеет шансы быть правильной в фундаментальной физике. В развитии физики было несколько таких знаменитых случаев, когда именно математическая красота приводила к открытию новой физики. Пожалуй, самый знаменитый пример — это открытие спиноров и античастиц П.Дираком. Л.Д. как-то полшутя жаловался, что в 1920-х годах великие физики — создатели квантовой механики — по существу не знали математики (многое, начиная с матричного исчисления, которое теперь студенты-математики учат на первом курсе, они переоткрыли по ходу дела), — а теперь мы знаем множество тонких вещей, и тем не менее решительного прогресса добиться не удается.

Знаменитый семинар Фаддеева в Ленинградском отделении Математического института имени В.А.Стеклова АН СССР (ЛОМИ) начинался как учебный, но постепенно, по мере того как его участники выросли и начинали писать первые работы, он превратился в полноценный исследовательский. Кроме этого по понедельникам и четвергам у доски происходили обсуждения всех рабочих сюжетов. Так постепенно формировался «командный стиль» работы в лаборатории, в котором Л.Д., как он сам с удовольствием говорил, отводил себе роль играющего тренера. Самое важное при работе над задачей, любил он говорить, — правильно загрузить подсознание. Это вещь, которой не так легко научиться, но каждый работающий математик, которому приходилось



Выступление на конференции в Орхусе (Дания, август 2010 г.).

Фото автора

концентрированно обдумывать какую-нибудь трудную задачу, знает, что результат никогда не бывает прямо пропорционален усилиям. И вдруг, после недель безуспешных попыток продвинуться, приходит неожиданное озарение. Этот эффект описан в свое время А.Пуанкаре, доказавшим свою знаменитую теорему об униформизации в тот момент, когда он сидел на подножку омнибуса, но в какой-то мере он знаком всем нам. Эти моменты абсолютного счастья после долгого обдумывания задачи и совместных обсуждений у доски — то, что вспоминается прежде всего.

### Квантование поля Янга—Миллса

Работы Л.Д. о теории поля Янга—Миллса — по-видимому, самые известные и важные из его работ 1960-х годов. Вместе с тем с ними связана и очень драматическая история. Сам Л.Д. недавно очень живо описал ее в своем выступлении на Общем собрании РАН по случаю присуждения ему медали имени М.В.Ломоносова — высшей награды Академии наук. Он озаглавил его «Моя жизнь среди квантовых полей». Интерес Л.Д. к квантовой теории поля сложился еще в студенческие годы, когда профессор кафедры математики физического факультета Ленинградского государственного университета (где он учился) О.А.Ладыженская организовала специальный студенческий семинар, посвященный математическим аспектам квантовой теории поля. Л.Д. там был главным докладчиком. Но в середине 1950-х годов квантовая теория поля переживала трудное время и надолго вышла из моды. За блестящими успехами квантовой электродинамики последовало целое десятилетие безуспешных попыток применить теорию поля для расчета внутриядерных сил. Но окончательный удар ей нанесло открытие Л.Д.Ландау и И.Я.Померанчуком так называемого «парадокса нуль-заряда» (обращения в нуль перенормированной константы связи). Этот парадокс относился к квантовой электродинамике (которая, в отличие от мезонной теории ядерных сил, прекрасно работала и позволяла рассчитывать тонкие эффекты с беспрецедентной точностью). Тем не менее результат тонкого (и правильного!) вычисления Ландау и Померанчука указывал, как считалось, на прямое логическое противоречие в ее основах. В своей короткой статье «Фундаментальные проблемы», которая оказалась последней, написанной незадолго до трагической автомобильной катастрофы, Ландау, ссылаясь на парадокс нуль-заряда, объявил гамилтонов метод в теории поля мертвым, нуждающимся в похоронах («со всеми почестями, которых он заслуживает»). «Ввиду краткости жизни, — заключал Ландау, — мы не можем позволить себе заниматься задачами, не ведущими к новым результатам». В начале 1960-х слова Ландау воспринимались его учени-

ками как завещание Учителя. Поэтому, когда в 1966 г. Л.Д. вместе с В.Н.Поповым получили решающее продвижение в квантовой теории Янга—Миллса (именно на основе традиционного гамилтонова подхода), их статья не могла быть ни принята к печати в одном из ведущих физических журналов в СССР, ни отправлена за границу (для чего требовалось положительное заключение Отделения ядерной физики АН СССР). В итоге с годичной задержкой было опубликовано лишь короткое сообщение в «Physics Letters», а полный текст работы издал Киевский институт теоретической физики в виде препринта; это препринт был переведен на английский и напечатан в материалах Fermilab только в 1973 г., уже в разгар бума, связанного с появлением последовательной теории квантовых калибровочных полей.

Геометрическая красота теории Янга—Миллса стала понятна не сразу — первоначально Л.Д. хотел заниматься квантовой гравитацией, поля Янга—Миллса казались скорее более простым модельным примером. Теперь мы знаем, что этот пример оказался исключительно удачным — он позволил обобщить квантовую электродинамику, объединив ее со слабыми взаимодействиями, и впервые построить последовательную теорию сильных взаимодействий. Геометрически теория Янга—Миллса — это, по существу, «общая теория относительности в зарядовом пространстве», и в этом смысле она очень близка по духу к теории тяготения Эйнштейна. Все эти захватывающие события произошли уже в начале 1970-х годов. Исходная работа Фаддеева и Попова, в которой было впервые получено корректное квантование теории Янга—Миллса, послужила базой для всего дальнейшего. Ключевое открытие начала 1970-х состояло в том, что теория Янга—Миллса свободна от парадокса нуль-заряда. Результатом стало построение «стандартной модели» в физике элементарных частиц, отмеченное несколькими Нобелевскими премиями. К сожалению, Л.Д. не попал в число лауреатов. Не только мы, его ученики, считаем, что это явная несправедливость. Старый друг Л.Д. и создатель теории Янга—Миллса великий физик Янг-Чжен-нин написал по этому поводу: «Многие, включая меня, считали, что Фаддеев должен был разделить Нобелевскую премию 1999 г. с 'т Хоофтом и Вельтманом. Среди физиков-теоретиков в XX в. существовало странное отношение к математике. В XIX в. работы Максвелла, Больцмана, Гиббса, Кельвина, Лоренца свидетельствовали о противоположном отношении к роли математики в физике. Кажется, что с некоторой заносчивости молодых Паули и Гейзенберга берет свое начало представление, что математика только вредит оригинальности в физике. Свидетельство тому — страдания и горечь Макса Борна или Вигнера. Хотя Гейзенберг в поздние годы изменил свои взгляды на математику, в американской физике это высокомерное пренебреже-

ние математикой надолго укоренилось. Я думаю, что это одна из причин, почему Фаддеев не был включен в число лауреатов 1999 г.».

Стоит заметить, что упоминание Паули в этом контексте не лишено некоторой персональной горечи — в 1954 г. на семинаре Р.Оппенгеймера Паули «зарубил» работу самого Янга, который рассказывал про свою теорию. Только молодость Янга и благожелательность Оппенгеймера спасли положение, и работа Янга и Миллса, изменившая фундаментальную физику, была опубликована.

Возвращаясь к работе Фаддеева и Попова, стоит особо подчеркнуть простоту и ясность предложенного ими подхода. Фактически они восстановили в правах в теории поля метод функциональных интегралов, изобретенный когда-то Р.Фейнманом. В начале 1960-х годов Фейнман тоже предпринял попытку проквантовать поле Янга—Миллса, но по непонятной причине этим методом не воспользовался и не смог довести работу до конца. Л.Д. любил говорить, что они с Поповым переиграли Фейнмана на его собственном поле. Ключевой момент состоял при этом в построении правильной меры интегрирования, т.е. в вычислении некоторого определителя. Первый вариант этого вычисления (так называемый трюк Фаддеева—Попова) был предложен Поповым, а затем Л.Д. нашел его очень красивое обоснование. Знаменитая статья Л.Д. с изложением этого метода открывала первый номер журнала «Теоретическая и математическая физика», основанного в 1969 г. (В 1970-х и 1980-х годах эта статья стала стандартным тестом при отборе студентов и аспирантов в лабораторию Л.Д. — статью полагалось понимать.) Вычисление функционального интеграла по теории возмущений приводит к диаграммной технике (когда-то именно изобретение этой техники «фейнмановских диаграмм», описывающих распространение и взаимодействие квантовых частиц, сыграло революционную роль в физике — с их появлением квантовая теория поля обрела наглядный и адекватный язык); поправка, связанная с учетом детерминанта, эквивалентна добавлению к этим диаграммам еще одной «фиктивной» частицы. Эти частицы — знаменитые «духи Фаддеева—Попова» — стали как бы визитной карточкой нового метода, о них слышали и те, кто не знает теории поля и вообще физики.

## Метод обратной задачи.

### Классические и квантовые солитоны

В начале 1970-х Л.Д., а за ним и все его ученики были увлечены новым сюжетом — удивительным новым методом решения нелинейных уравнений в частных производных. Исходная идея замечательного американского математика М.Крускала была совершенно фантастической — подставить профиль волны в нелинейном уравнении Корте-

вега—де Фриза (это уравнение описывает длинные волны на мелкой воде и известно с конца XIX в.) в квантово-механическое уравнение Шрёдингера и решить для него задачу рассеяния. Эволюция данных рассеяния описывается простым линейным уравнением, которое легко решается. Чтобы вернуться обратно и описать эволюцию исходной волны, нужно решить обратную задачу теории рассеяния. Как Крускал первоначально додумался до этой идеи, совершенно непонятно. Теперь-то мы знаем, с чем связан этот поразительный трюк, но в середине 1960-х это был гром среди ясного неба. Трюк Крускала был значительно прояснен в работе другого замечательного американского математика, П.Лакса, а вслед за тем В.Е.Захаров и А.Б.Шабат построили новые примеры нелинейных уравнений в частных производных, которые решались таким способом.

Л.Д. впервые услышал об этих поразительных вещах во время конференции в Новосибирске в начале 1971 г., где он делал доклад о трехмерной обратной задаче. Теперь неожиданно оказалось, что обратная задача для одномерного уравнения Шрёдингера (или близкого уравнения Дирака), которую Л.Д. решил еще в 1959 г. в кандидатской диссертации, непосредственно работает в этом новом контексте. Кандидатская диссертация Л.Д. была в свое время написана вслед за фундаментальными работами об обратной задаче рассеяния И.М.Гельфанда, Б.М.Левитана и В.А.Марченко. Они рассматривали обратную задачу для радиального уравнения Шрёдингера (возникающего из трехмерного уравнения при разделении переменных). Как теперь стало ясно, случай уравнения на всей оси (для него обратная задача немного сложнее) гораздо важнее для изучения нелинейных уравнений. Первым итогом обсуждения нового метода стала знаменитая работа Захарова и Фаддеева «Уравнение Кортевега—де Фриза как вполне интегрируемая система». Понятие полной интегрируемости возникло в аналитической механике в XIX в.; в середине 1960-х годов В.И.Арнольд привлек к нему внимание, предложив для него красивую геометрическую формулировку (это знаменитая теперь теорема Лиувилля—Арнольда). Математики XIX века придумали довольно много тонких примеров интегрируемых систем, для их решения использовались специальные замены переменных. В 19-м столетии все эти сюжеты одно время считались вершиной математического анализа и входили в программы университетских экзаменов, но постепенно стало понятно, что «общие» механические системы очень далеки от интегрируемости. После работ Пуанкаре интерес сместился в сторону доказательства неинтегрируемости, изучения хаоса и др., и интегрируемые системы надолго вышли из моды. Ни одного нетривиального примера бесконечномерной интегрируемой системы (т.е. системы полевого типа) не было известно. Хотя работа Захарова и Фадде-





На конференции в честь Л.Д.Фаддеева в Шамони. Л.Д.Фаддеев, А.Ю.Волков, Л.А.Тахтаджян, А.Ю.Алексеев, М.А.Семенов-Тянь-Шанский (Франция, март 2015 г.).

Фото А.Заднепровской

ева по существу была переформулировкой уже известных фактов, ее идеологическое значение было огромно — она означала, что бесконечномерные интегрируемые системы существуют и очень интересны и нетривиальны. Особенно интересным оказалось явное описание фазового пространства уравнения Кортевега—де Фриза в терминах «данных рассеяния» — в нем выделился вклад от знаменитых солитонных решений (уединенных волн), причем они вели себя как настоящие частицы. Произошла, как любил позже говорить Захаров, смена парадигмы.

С самого начала интерес Л.Д. к интегрируемым уравнениям был связан с надеждой применить новую технику в теории поля. Конечно, уравнение Кортевега—де Фриза с его нерелятивистской кинематикой — не слишком удачный пример, но новый метод исследования нелинейных уравнений позволял надеяться, что можно построить и примеры релятивистских интегрируемых уравнений. И такое уравнение — знаменитое впоследствии уравнение  $\text{sine-Gordon}$  — вскоре нашлось, причем это был хороший пример пользы международных контактов. В начале 1972 г. Л.Д. был в США, где он сделал серию докладов и рассказывал, в частности, о только что написанной работе с Захаровым, — и присутствовавший на докладе американский фи-

зик Дж.Клаудер упомянул уравнение  $\text{sine-Gordon}$ , возникшее первоначально в нелинейной оптике. Как и уравнение Кортевега—де Фриза, уравнение  $\text{sine-Gordon}$  содержит две переменных (координату и время); его непосредственные физические приложения включают, кроме оптики, теорию сверхпроводимости — но главный его интерес связан с тем, что это исторически первый нетривиальный пример релятивистски инвариантной вполне интегрируемой теории поля (в двумерном пространстве-времени). Основное техническое средство при изучении интегрируемого уравнения — построение для него так называемой «лаксовой пары» (вспомогательного линейного дифференциального уравнения, задача рассеяния для которого позволяет решить исходную нелинейную задачу). Поиском «лаксовой пары» для уравнения  $\text{sine-Gordon}$  занялся Леон Тахтаджян, только что принятый в ЛОМИ стажером после окончания матемеха. Одновременно этой задачей занималась группа американских математиков (М.Абловиц, Д.Кауп, А.Ньювелл, Г.Сегюр). Чуть позже к Тахтаджяну и Фаддееву присоединились Захаров; результатом этой работы стало полное описание решений и — самое главное — красивые и прозрачные формулы для энергии и импульса поля  $\text{sine-Gordon}$ ; в элементарной линейной теории аналогичные

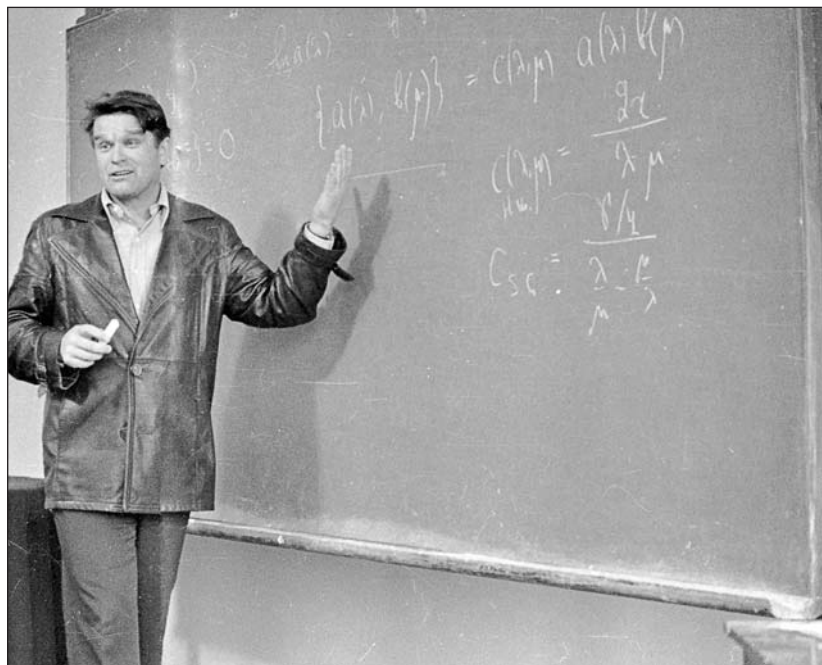
формулы служат основой для интерпретации решений полевых уравнений в терминах частиц (знаменитый «корпускулярно-волновой дуализм»). В новой модели, кроме частиц, связанных с исходным полем, возникал вклад, связанный с частицами нового типа — солитонами и их связанными состояниями. Идея связать солитонные решения с новыми частицами (отсутствующими при «наивном» квантовании модели) и сама возможность разрушить старую парадигму квантовой теории поля «одно поле — один тип частиц» поражали воображение. Я до сих пор помню блестящий доклад Фаддеева об этой работе на семинаре Смирнова по математической физике. Точное решение соответствующей квантовополевой модели заняло почти 10 лет. Первым его шагом стало «квазиклассическое» квантование, соответствующее по духу «старой квантовой теории» Бора—Зоммерфельда, которая предшествовала созданию последовательной квантовой механики. На первых порах эти идеи столкнулись с жесткой оппозицией физиков. Доклад Л.Д. на знаменитом теоретическом семинаре В.Н.Грибова во время зимней школы Ленинградского института ядерной физики 1974 г. закончился поражением — после четырех часов у доски Л.Д. сорвал голос и вынужден был уйти, сопровождаемый ироническими замечаниями о попытках воскресить «мечту Эйнштейна». После этой неудачи Л.Д. у Грибова больше не выступал — защита точки зрения нашей лаборатории была поручена его молодым ученикам. Ключевое вычисление по теории возмущений, подтверждавшее устойчивость солитонов при квантовании, сделали И.Я.Арефьева и В.Е.Корепин. Володя Корепин, в то время аспирант первого года, прошел на физфаке серьезную школу по квантовой теории поля и мог говорить с участниками грибовского семинара на их языке. В итоге его боевое крещение прошло успешно — теоретики признали наконец нашу правоту. А через несколько лет удалось достигнуть и настоящего прорыва — вместо приближенного «квазиклассического» решения построить точное.

Новый метод получил название «квантовый метод обратной задачи» — по аналогии с классическим методом обратной задачи, появившимся десятилетием раньше. Речь шла о действительно глубоком обобщении, в котором объединились идеи, связанные с построением «лаковских пар» для интегрируемых уравнений, старые тонкие методы квантовой теории, восходя-

щие еще к 1930-м годам («анзац Бете») и новейшие достижения квантовой статистической физики (связанные прежде всего с работами Р.Бакстера). Основой нового метода стала красивая алгебра, связанная с понятием «квантовой R-матрицы». Один из ключевых примеров квантовой R-матрицы извлекался из старой работы Янга, поэтому для ключевого тождества в новой теории Л.Д. предложил название «тождество Янга—Бакстера» — под этим именем оно и получило широкую известность. Программный доклад с наброском нового метода был сделан Л.Д. в конце мая 1978 г.

В истории новой области науки бывает короткий начальный период, когда каждое маленькое продвижение практически удваивает область известного. Мы переживали тогда именно такое счастливое время. В разгар этой работы, осенью 1978 г., в ЛОМИ состоялась первая конференция по квантовой теории солитонов. В ней участвовали и классики предыдущего этапа развития физики — А.Б.Мигдал и В.Н.Грибов, и лучшие эксперты по классическим интегрируемым системам — В.Е.Захаров и С.П.Новиков вместе со своими учениками, и молодые теоретики — А.М.Поляков, А.А.Белавин, А.Б.Замолотчиков. Эта конференция вспоминается сейчас как момент удивительного единства науки.

В течение следующего года большинство предположений, о которых Л.Д. говорил в своем докладе, были доказаны. В значительной степени это стало результатом коллективной работы всей лаборатории. Ключевой вклад был сделан Е.К.Скляниным, Л.А.Тахтаджяном, П.П.Кулишом. Создание



Л.Д. делает доклад на конференции по квантовым солитонам (Ленинград, октябрь 1978 г.).

Фото А.Будагова

квантового метода обратной задачи позволило более глубоко понять и старые результаты, в том числе и происхождение знаменитых «лаксовых пар», увлекательный поиск которых в начале 1970-х годов напоминал охоту. «Классические  $g$ -матрицы» Складина, возникающие как квазиклассический предел квантовых  $R$ -матриц, позволили внести порядок в эти вопросы и доказать красивые общие теоремы, в которых теория интегрируемых систем объединилась со знаменитым «методом орбит» Кириллова—Костанта в теории представлений групп Ли (этим сюжетом мы занимались вдвоем с А.Г.Рейманом).

Одним из важнейших побочных продуктов нового метода стала теория «квантовых групп». Первый пример квантовой группы построили П.П.Кулиш и Н.Ю.Решетихин в начале 1980-х годов, а затем В.Г.Дринфельд предложил общую аксиоматику и глубокое обобщение этого примера. Открытие квантовых групп стало, пожалуй, самым важным событием в некоммутативной алгебре после изобретения в конце XIX в. групп и алгебр Ли. В 1986 г. Дринфельд подготовил доклад о квантовых группах для Международного математического конгресса в Беркли. Так как Дринфельд в то время был «невъездным», Л.Д. привез текст его доклада на конгресс и попросил прочесть его французского математика П.Картье. Этот доклад немедленно привел к «квантово-групповой революции» в математике. Связанный с новыми концепциями прогресс затронул теорию узлов, геометрию и топологию маломерных многообразий, теорию представлений. В лаборатории Л.Д. яркие результаты в этих областях получил Н.Ю.Решетихин. Параллельно в работах В.Е.Корепина, А.Г.Изергина, Н.Н.Боголюбова, Ф.А.Смирнова, В.О.Тарасова развивались глубокие аспекты квантового метода обратной задачи. Явное вычисление корреляционных функций в работе Смирнова практически завершило построение квантовой модели sine-Gordon. К 1990 г. в лаборатории создавалась, возможно, самая сильная в мире рабочая группа по современной математической физике.

Исключительно успешная работа в «двумерной» физике несколько отодвинула на задний план физику «четырёхмерную», но и здесь в 1980-х годах были получены яркие результаты. Стоит особо упомянуть работу об аномалиях в квантовой теории поля, которую Л.Д. написал вместе с нашим молодым тогда сотрудником Самсоном Шаташвили. Эта работа Л.Д. особенно нравилась, потому что в ней неожиданно ключевую роль сыграли алгебраические открытия его отца, замечательного алгебраиста Д.К.Фаддеева, одного из основоположников гомологической алгебры, сделанные еще в 1940-х годах.

Конечно, романтические надежды на важную роль солитонов в «настоящей» физике сбылись лишь отчасти, но после идеологического прорыва, связанного с открытием солитонов, были найдены

и настоящие четырехмерные солитоны (в том числе знаменитый монополюс 'т Хоофта—Полякова). В определенном смысле обычный протон и другие барионы можно интерпретировать как солитоны. Эта красивая идея была предложена в начале 1980-х годов Э.Виттенем и потом развита Д.И.Дьяконовым и В.Ю.Петровым (учениками Грибова).

## Новые времена

Пейзаж изменился. После распада СССР многие ведущие сотрудники лаборатории Фаддеева оказались за границей. Те, кто остался, также проводили в заграничных командировках большую часть года. Лабораторный семинар стал собираться преимущественно в летние месяцы, когда старые участники приезжали в Петербург во время каникул. Некоторые не дожили и до 60 — к числу этих ранних потерь, вызванных стрессовыми ситуациями 1990-х годов, относятся Попов и Изергин. В лаборатории по-прежнему было немало талантливых студентов, но многие из них по завершении учебы тоже оказались за границей. В начале 1990-х большую роль сыграла поддержка российских ученых фондом Сороса, но чем дальше, тем больше становилось понятно, что фундаментальная наука не входит в число приоритетов новой российской власти.

И прошло 25 лет. Ученики Л.Д. занимают профессорские кафедры и работают в исследовательских центрах Франции, Швейцарии, США, Великобритании. Один из создателей квантового метода обратной задачи Складин избран членом Королевского общества (кстати, сам Л.Д. был избран иностранным членом Королевского общества несколькими годами позже). Решетихин стал членом Датской королевской академии наук, Шаташвили — Ирландской королевской академии и директором Международного математического института имени Гамильтона в Дублине. Л.Д. это очень радовало — его ученики стали академиками.

Л.Д. все эти годы продолжал активно работать. Он остался в Петербурге, отказавшись, в частности, от предложения возглавить Институт теоретической физики в университете Стони Брук после отставки Янга в 1999 г. От коллективного стиля работы 1970-х и 1980-х годов он в значительной степени вернулся к более индивидуальному методу своей молодости. В сотрудничестве с финским физиком А.Ниemi он много занимался красивой теоретико-полевой моделью, в которой солитоны не похожи на четко локализованные частицы, а образуют заузленные конфигурации. Их устойчивость обеспечивается благодаря наличию топологического инварианта — так называемого инварианта Хопфа. В этой модели аналитические вычисления исключительно сложны, а численными расчетами в какой-то момент Ниemi загружал все большие компьютеры Финляндии. Лагранжиан модели с за-



узленными солитонами удастся получить с помощью некоторых замен переменных из фундаментального лагранжиана поля Янга—Миллса; есть надежда, что солитоны с нетривиальным инвариантом Хопфа соответствуют гипотетическим коллективным возбуждениям поля Янга—Миллса в квантовой хромодинамике. Еще один сюжет, связанный с полями Янга—Миллса, которым Л.Д. занимался вплоть до последних месяцев жизни, — проблема возникновения массы. Л.Д. всегда несколько скептически относился к стандартному в настоящее время способу введения массы в теорию Янга—Миллса с помощью так называемого механизма Хиггса; он хотел связать ее с правильным способом перенормировки, в результате которой в теории, не содержащей первоначально никаких размерных параметров, возникает размерная константа, задающая масштаб масс. Л.Д. несколько раз возвращался к этому сюжету. Описанию сценария перенормировки поля Янга—Миллса посвящена и его последняя работа, написанная вместе с С.Э.Деркачевым и последним студентом-дипломником Л.Д. Сашей Ивановым.

Другой большой цикл работ (в сотрудничестве с Р.М.Кашаевым, А.Ю.Волковым, С.Э.Деркачевым) связан с глубокими аспектами квантового метода обратной задачи — изучением бесконечномерных реализаций квантовых R-матриц и введенной впервые в работах Фаддеева важнейшей концепции модулярной двойственности для квантовых групп и алгебр Ли. Работа Л.Д. о модулярном дубле квантовой группы представляет собой глубокий «задел» для будущих исследований, связанных с нетривиальными новыми главами теории представлений, некоммутативной геометрией, теорией специальных функций (q-дилогарифмы), квантовой гравитацией и множеством других сюжетов, изучение которых только начинается.

Как любил говорить Гельфанд, в математике, как в бильярде, хороший удар даром не пропадает. При своем возникновении квантовый метод обратной задачи казался многим несколько академическим изобретением — в силу того, что его применения ограничивались моделями теории поля в двумерном пространстве-времени и квантовой статистической физики на одномерных решетках. Потенциал нового метода стал понятен лишь постепенно. В 1990-х годах оказалось, что варианты интегрируемых спиновых моделей описывают высокоэнергетическую асимптотику в четырехмерной квантовой хромодинамике (то, что описание высокоэнергетической асимптотики приводит к эф-



Высота 3842 м. Южный Пик у Монблана. Последняя поездка в Альпы (март 2015 г.).

Фото автора

фективно двумерным теориям, было известно давно — но оказалось, что эти теории к тому же интегрируемые и для их явного решения непосредственно применим немного обобщенный квантовый метод обратной задачи). Это был еще один случай, когда фаддеевская математика пересеклась с техникой и задачами школы Ландау.

Еще одно нетривиальное применение квантового метода обратной задачи связано с изучением теорий Янга—Миллса. Когда-то, в первые годы развития теории интегрируемых систем, существовала романтическая надежда, что теория Янга—Миллса тоже окажется интегрируемой. Это неверно, но вариант теории, так называемая суперсимметричная теория Янга—Миллса, действительно близок к интегрируемости или точной решаемости. Как недавно обнаружил Шаташвили (вместе с Н.Некрасовым), описание вакуумного сектора в суперсимметричной теории Янга—Миллса (в том числе в четырехмерном пространстве-времени) непосредственно приводит к квантовым интегрируемым системам (уже изученных типов). В этом новом подходе к суперсимметричным теориям Янга—Миллса находят свое место все основные ингредиенты квантового метода обратной задачи. Активная работа в этой области продолжается и в настоящее время. Эта поражающая воображение связь между внешне далекими аспектами научного наследия Фаддеева — может быть, одно из лучших свидетельств его глубины. Все мы, его старые ученики, чувствуем сейчас, что — по слову римского поэта — *letum non omnia finit*\*. С нами остаются память о Л.Д. и его идеи и работы — и тем и другим суждена долгая жизнь. ■

\* Не все кончается смертью (полустипсия Проперция, высеченное на надгробии И.Бродского).

# Новости науки

## Астрофизика

### Модель с Q-шаром в центре нашей Галактики

Многочисленные астрономические наблюдения указывают на то, что в центрах галактик находятся сверхмассивные (от миллионов до миллиардов масс Солнца) объекты. Такой центральный объект хорошо изучен в нашей Галактике. Многолетние наблюдения за движением звезд вокруг него позволили найти массу объекта, составляющую примерно 4 млн солнечных. Наблюдать его с помощью оптических приборов тяжело, так как он скрыт большим количеством межзвездного газа и пыли, прозрачных для излучения лишь в двух узких спектральных диапазонах — инфракрасном и миллиметровом. Согласно наиболее разработанному сценарию, центральные объекты почти всех галактик идентифицируются как черные дыры. Действительно, трудно представить себе любой другой объект столь большой массы и столь малого размера, который удержался бы от коллапса в черную дыру. Тем не менее наблюдательно это утверждение не доказано.

Предполагается, что излучение от окрестности черной дыры может выглядеть примерно так, как показано в фильме К.Нолана «Интерстеллар» (2014) — единственном в истории кино, где художественные образы основаны на физико-математической модели: яркое кольцо вокруг центральной «тени» размером, определяемым массой черной дыры, и аккреционный диск. Однако то, что на самом деле видно в центре Галактики, выглядит по-другому: радиоисточник Sgr A\*, зарегистрированный в миллиметровом диапазоне, представляет собой маленькое, слегка вытянутое пятнышко, размер которого (от 30 до 40 мкс дуги) меньше ожидаемого размера тени (52 мкс)\*. Существуют объяснения такой картины в рамках моделей с черной дырой, но они весьма сложны, а потому интересно подумать о других вариантах.

\* Doeleman S, Weintraub J, Rogers A. et al. Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre // *Nature*. 2008. V.455. P.78–80. Doi:10.1038/nature07245; Fish V, Doeleman S, Beaudoin C. et al. 1.3 mm wavelength VLBI of Sagittarius A\*: detection of time-variable emission on event horizon scales // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V.727. №2. Doi:10.1088/2041-8205/727/2/L36.

Если заняться поиском ответов на вопрос, какие еще физические объекты, не «схлопывающиеся» в черную дыру, могли бы находиться в центрах галактик, то большинство из них будут противоречить тем или иным наблюдательным данным. Но один сценарий, отличный от черной дыры, оказался допустимым. В статье, опубликованной 11 ноября 2016 г. в *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, мне удалось показать, что в центре нашей Галактики (равно как и в других) может находиться не черная дыра, а гигантский объект из темной материи — так называемый Q-шар\*\*. Его можно представить как сгусток конденсата скалярного поля, подобного, но не идентичного полю Хиггса: конденсат последнего разлит по всему пространству, благодаря чему элементарные частицы оказываются массивными, а конденсат нового поля сконцентрирован внутри Q-шаров (связанные с ним частицы были бы массивными только внутри них). Темную материю могут составлять либо скалярные частицы, связанные с этим полем (аналоги хиггсовского бозона), либо такие же по устройству, но микроскопические Q-шары. В этом случае обычное вещество и излучение могут свободно проникать внутрь Q-шара, и там же вполне может находиться видимый радиоисточник.

Помимо вопроса о размере источника радиоизлучения модель с Q-шаром помогает разрешить еще несколько трудностей, связанных с описанием происхождения центрального сверхмассивного объекта и его нынешним поведением. Проверить ее можно в случае, если дальний космос будет зондировать телескопы с лучшим, чем сегодня, угловым разрешением. Через несколько лет улучшенные показатели разрешения (50 угловых секунд в диаметре) должна продемонстрировать глобальная система телескопов американского научно-исследовательского проекта ЕНТ (Event Horizon Telescope — Телескоп горизонта событий). Однако есть опасения, основанные на данных наземно-космического радиоинтерферометра «Радиоастрон», разработанного Астрокосмическим центром Физического института имени П.Н.Лебедева РАН совместно с учеными других стран, что из-за рассеяния излучения в межзвездной среде требуемая четкость изображения не будет достигнута. При рекордном на сегодня угло-

\*\* Troitsky S. Supermassive dark-matter Q-balls in galactic centers? // *JCAP*. 2016. V.11. Doi:10.1088/1475-7516/2016/11/027.

вом разрешении интерферометра центральные области близких галактик непрозрачны для его радиоволн. Окончательный ответ на вопрос, что находится в центре Галактики — черная дыра или Q-шар из темной материи, сможет дать отечественный космический инструмент «Миллиметр», который будет работать на более коротких волнах. Его запуск, к сожалению, отложен, по крайней мере до 2025 г. Но после развертывания обсерватории в космосе можно будет разглядеть центральные объекты не только нашей, но и ряда других галактик.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-22-00161).

© С.В.Троицкий,

член-корреспондент РАН

Институт ядерных исследований РАН

Москва

## Нанотехнологии и наноматериалы

### Необычное окисление наночастиц кремния в атмосфере кислорода

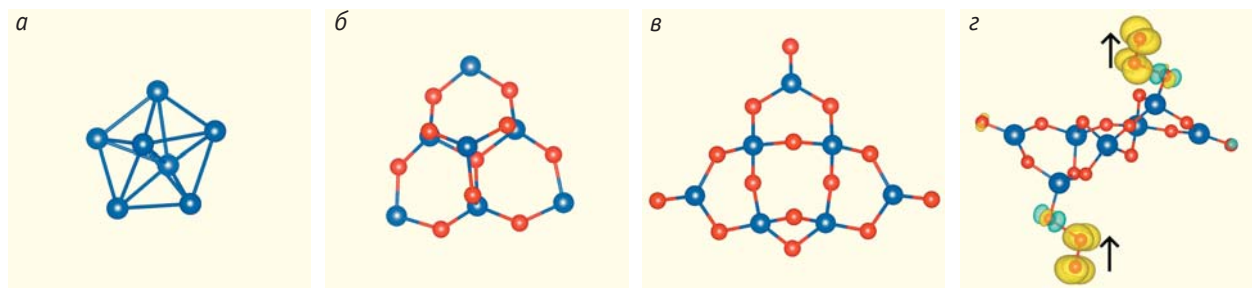
Окисление пластин кремния — один из основных процессов в производстве интегральных схем. При оксидировании в атмосфере кислорода, нагретого до 1100–1500 К, на поверхности пластины образуется плотный изолирующий слой  $\text{SiO}_2$  толщиной ~1 нм. Этот процесс хорошо изучен. Однако миниатюризация устройств, вышедшая на рубеж 10 нм, ставит вопрос об особенностях окисления частиц кремния нанометрового размера, важный для многочисленных электронных приложений, фотокатализаторов нового поколения и биомедицинских наносенсоров высокой чувствительности. То, что окисление нанокремния имеет свои особенности, не вызывает сомнений. На это, в частности, указывает высокая химическая активность наноматериалов — реакции в них идут намного быстрее и нередко качественно отличаются от реакций в кристаллах. Эти особенности вызваны малым размером частиц, из-за которого значительная часть атомов (около 50% при диаметре 2 нм) расположена на поверхности. У «поверхностных»

атомов мало соседей, поэтому часть их электронных орбиталей — свободные, т.е. не участвующие в химической связи. Чтобы усилить межатомную связь и понизить энергию, частицы, перестраиваясь, уменьшают число свободных орбиталей. Как следствие, малые частицы (нанокластеры) обычно теряют кристаллическую структуру, приобретая уникальное для каждого размера и химического состава строение.

Структуру наночастиц очень трудно установить экспериментально. В этой ситуации на первое место выходят квантово-механические расчеты «из первых принципов» (*ab initio*)\*, в которых определяется конфигурация (расположение) атомов, соответствующая наименьшей энергии кластера. В пространстве всех возможных конфигураций энергия имеет сложный рельеф с огромным числом локальных минимумов. Это сильно усложняет поиск абсолютного минимума, отвечающего равновесной структуре кластера. Эффективным методом поиска оказался алгоритм, имитирующий процесс биологической эволюции. В нем из первоначального набора структур выбираются лучшие (с наименьшей энергией), которые скрещиваются между собой, их потомство снова отбирается и скрещивается и т.д., пока не появится структура, остающаяся лучшей в нескольких поколениях. Но даже при использовании этого алгоритма для определения равновесной структуры одного кластера необходимо вычислить «из первых принципов» энергию и силы, действующие на атомы, в нескольких тысячах атомных конфигураций. Этот трудоемкий, но точный подход был применен исследователями Физического института имени П.Н.Лебедева РАН, Сколковского института науки и технологий и Московского физико-технического института (государственного университета) для изучения окисления нанокластеров кремния\*\*.

\* *Ab initio* (от лат. начала) — решение задачи из первых основополагающих принципов без привлечения дополнительных эмпирических предположений. — *Примеч. ред.*

\*\* *Lepeshkin S., Baturin V., Tikbonov E. et al. Super-oxidation of silicon nanoclusters: magnetism and reactive oxygen species at the surface // Nanoscale. 2016. V.8. P.18616–18620.*



Структура кластеров  $\text{Si}_n\text{O}_m$ :  $\text{Si}_7$  (а),  $\text{Si}_{10}$  (б), стехиометрический кластер  $\text{Si}_{14}\text{O}_{14}$  (в), «сверхокисленный» кластер  $\text{Si}_{19}\text{O}_{19}$  (г). Распределение спинов показано цветом, стрелками обозначены магнитные моменты.



В ходе работы были рассчитаны равновесная структура, термодинамические, магнитные и прочие свойства 90 кластеров  $\text{Si}_n\text{O}_m$  с  $n \leq 10$  и  $m \leq 2n + 9$ . На этой основе построена фазовая  $P$ - $T$ -диаграмма, показывающая зависимость степени окисления кремниевых кластеров от давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ) газа  $\text{O}_2$ . Согласно расчетам, процесс идет следующим образом. В начале окисления атомы кислорода размещаются внутри кластера, образуя крепкие мостиковые Si-O-Si-связи. Далее, когда все мостиковые позиции заняты, атомы O располагаются на поверхности кластера, причем многообразие поверхностных структур сводится к десяти характерным группам атомов Si и O. На поверхности сцепление атомов O с кластером более слабое, чем в Si-O-Si-связях. В кластерах  $\text{Si}_n\text{O}_m$  с  $m \leq 2n$  (рис.б) оно имеет энергию  $\sim 3$  эВ/атом. Особой стабильностью отличаются стехиометрические кластеры  $(\text{SiO}_2)_n$  (рис.в). Согласно  $P$ - $T$ -диаграмме, они полностью доминируют при  $T > 1000$  К, что на 100 К ниже температуры формирования плотного слоя  $\text{SiO}_2$  на поверхности пластин кремния. Все «сверхокисленные» кластеры  $\text{Si}_n\text{O}_m$  с  $m > 2n$  люминесцентно активны и обладают магнитными свойствами (рис.г). Они характеризуются малой энергией связи поверхностных атомов O (всего 0.1–0.7 эВ/атом) и присутствием групп атомов, являющихся аналогами пероксида, супероксида и озонида, — активных форм кислорода с потенциально опасными канцерогенными свойствами.

Неожиданный результат исследований, полученный расчетным путем и подтвержденный затем аналитическими оценками, состоит в том, что при температурах 100–700 К и нормальном давлении в термодинамических ансамблях преобладают не кластеры стехиометрического состава  $(\text{SiO}_2)_n$ , а «сверхокисленные» кластеры  $\text{Si}_n\text{O}_m$  с  $m > 2n$ . Этот факт заставляет по-новому взглянуть на воздействие частиц диоксида кремния на организм человека. Известно, что активные кислородные группы могут взаимодействовать с биомолекулами (протеинами, РНК и ДНК), вызывая окислительный стресс и повреждение клеток. Их присутствие на поверхности «сверхокисленных» кремниевых частиц при нормальных условиях — важное звено в понимании причин возникновения силикоза и рака легких под действием кварцевых наночастиц и тонкой кремнеземной пыли.

© Ю.А.Успенский,

доктор физико-математических наук

С.В.Лепешкин, В.С.Батулин,

кандидаты физико-математических наук

Физический институт имени П.Н.Лебедева РАН

А.Р.Оганов,

доктор физико-математических наук

Сколковский институт науки и технологий,

Московский физико-технический институт

(государственный университет)

Москва

## Палеомагнитология

### На севере Сибири открыта новая крупная магматическая провинция

Крупные континентальные магматические провинции, представляющие собой огромные по площади и объемам выходы магматических пород на поверхность Земли, давно стали объектом пристального внимания геологов разных специальностей. Таких провинций на нашей планете обнаружено около ста, однако для детального изучения доступны лишь два-три десятка. И все они расположены на континентах, в том числе уникальная и крупнейшая в мире — Сибирские траппы, образовавшаяся 252 млн лет назад. Повышенный интерес к магматическим провинциям не случаен: этапы геологического времени, в ходе которых происходило их формирование, считаются переломными в истории Земли и связаны с глобальными биосферными кризисами — массовыми вымираниями, игравшими ключевую роль в эволюции жизни на планете. В последние десятилетия ученые доказали, что образование крупных магматических провинций в результате мощных вулканических извержений и внедрения магмы в верхние горизонты земной коры (интрузивный магматизм) происходит в геологическом масштабе времени практически



Обнажение дайки долеритов Куонамской магматической провинции, р.Джогджо. 2007 г.

ки мгновенно, существенно быстрее, чем за 1 млн лет. Но все еще остается открытым вопрос, какие процессы в глубинах Земли приводят к их формированию.

Сегодня мы хорошо знаем геологическое строение поверхности нашей планеты, поэтому многие считают, что время открытий в этой области прошло. Однако коллективу исследователей, объединившему ученых из России, Швеции, США и Канады, недавно удалось обнаружить в пределах Российской Арктики новую крупную магматическую провинцию, названную Куонамской — по имени реки на севере Восточной Сибири\*.

Исследования были начаты в 2000 г., когда под руководством научного сотрудника Геологического института РАН П.Ю.Петрова мы, будучи студентами, изучали на севере Красноярского края, в бассейнах рек Джогджо и Котуйкан, интрузивные тела — долеритовые дайки и силлы. Отобрав на территории поперечником более 200 км значительное количество образцов горных пород и измерив их намагниченность в лаборатории Института физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН, мы обнаружили, что они образовались в геологическом масштабе времени практически одновременно. Чтобы изучить как можно больше магматических тел, пришлось неоднократно возвращаться в эти места. Позже к нашим исследованиям подключились зарубежные коллеги. В результате многолетней совместной работы, в ходе которой использовались современные методы палеомагнитологии, изотопной геохронологии и геохимии, удалось установить, что уцелевшие от эрозии интрузивные дайки и силлы — это остатки, своего рода «корни», крупной изверженной магматической провинции, возраст которой составляет  $1501 \pm 3$  млн лет. Она занимает более 100 тыс. км<sup>2</sup> и по площади сравнима с Португалией. Полтора миллиарда лет назад, сразу после катастрофически быстрого формирования, эта область была представлена мощными потоками базальтовых лав и туфов — продуктами интенсивных вулканических извер-



Обнажение силла долеритов Куонамской магматической провинции на р.Котуйкан. Палеомагнитный отряд Института физики Земли РАН (слева направо): Р.В.Веселовский, В.И.Паверман, А.В.Шацилло. 2007 г.

жений, ареной которых оказалась вся территория арктической части Сибири — от пос.Хатанга на западе до пос.Тикси на востоке. Однако разрушительная деятельность ледников, воды и ветра не оставила и следа от этих эффузивных пород, и мы наблюдаем и изучаем только породы, которые были образованы в результате застывания магмы на глубине нескольких километров.

В нашем исследовании интересен еще один аспект. Поскольку палеомагнитный метод позволяет восстанавливать положение континентов в прошлом, мы построили палеотектонические реконструкции Сибири и других древних платформ — какими они были 1.5 млрд лет назад. Как выяснилось, тогда Сибирь располагалась рядом с древними кратонами Сан-Франциско и Конго. Первый из них сейчас составляет «ядро» Южной Америки, а второй входит в состав Африканской платформы. Самое удивительное, что на этих кратонах обнаружены хорошо известные нам по экспедициям в Красноярский край интрузивные тела, причем того же возраста. Таким образом, мы не только открыли Куонамскую магматическую провинцию, но и доказали, что она — лишь часть значительно более крупной провинции, поперечный размер которой в прошлом мог достигать 2–3 тыс. км. В настоящее время она практически полностью уничтожена эрозией и разделена на части современными океанами.

© Р.В.Веселовский,

кандидат геолого-минералогических наук  
Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова  
Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН  
Москва

\* Evans D., Veselovsky R., Petrov P. et al. Paleomagnetism of mesoproterozoic margins of the Anabar Shield: A hypothesized billion-year partnership of Siberia and northern Laurentia // Precambrian Research. 2016. V.281. P.639–655; Ernst R., Okrugin A., Veselovskiy R. et al. The 1501 Ma Kuonamka large igneous province of northern Siberia: U-Pb geochronology, geochemistry, and links with coeval magmatism on other crustal blocks // Russian Geology and Geophysics. 2016. V.57. P.653–671.

# Эффект мезозойской бабочки, или Эволюция, которой не было

М.С.Архангельский,  
кандидат геолого-минералогических наук  
Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского  
Саратов  
А.Е.Нелихов  
Москва

*Quodcumque retro est.*

(Все, что прошло, — прошлое.)

Гораций

История не знает сослагательного наклонения. Что случилось — то случилось. Ничего нельзя переделать. Эта истина банальна, бесспорна, но ничуть не мешает строить прогнозы о том, как могла бы измениться наша жизнь или даже всемирная история, если бы что-то пошло по-другому.

На тему «что было бы, если бы» издано много книг, придумано немало занимательных гипотез. Наверное, самый яркий пример — рассказ Р. Брэдли «И грянул гром» о путешественниках в прошлое. Во время охоты на динозавра один турист случайно раздавил мезозойскую бабочку. Ничтожное действие повлекло за собой глобальные последствия, как маленький камень, порождающий лавину. В будущем произошли принципиальные перемены. Благодаря этому рассказу в культуре и в науке появился термин «эффект бабочки».

Про альтернативные пути истории рассуждал и советский фантаст, известный палеонтолог И.А.Ефремов. В 70-х годах XX в. он начал писать (но не успел закончить) повесть «Ретвизан» — о том, как развивалась бы история, если бы было возможно изменить самую малость: не позволить капитану русского корабля получить контузию во время Русско-японской войны.

В Желтом море броненосец «Ретвизан» шел на таран японской флотилии. Капитан хотел отвлечь противника, чтобы русские корабли вышли из окружения в Порт-Артуре, но во время обстрела был ранен. Управление взял на себя другой офицер, первым делом отменивший приказ о таране. «Ретвизан» вернулся в Порт-Артур, который вскоре был сдан японцам. А дальше — цепочка печальных последствий: поражение в войне, разочарование народа в самодержавии, революции 1905 и 1917 гг., Гражданская война, распад империи, передел влияния на всей планете. И все это следствие, по мнению Ефремова, осколка мины, угодившей в голову капитану. Если бы удалось изменить траекторию осколка всего на три-четыре сантиметра, вся история человечества сложилась бы иначе. Возможно,

если бы Ефремов успел закончить повесть, мы бы говорили не про «эффект бабочки», а про «эффект «Ретвизана»».

Зачем вообще нужна альтернативная история? На этот вопрос есть много ответов разной степени остроумия. Самый общий может быть таким: альтернативные варианты развития событий нужны, чтобы лучше понять причины и следствия истории. И конечно, для того, чтобы было интереснее ее изучать. Альтернативная история применима к любым феноменам. Ведь все, доступное нам в опыте, развивается во времени. Органический мир Земли — не исключение.

В 1981 г. вышла книга Д.Диксона «После человека: зоология будущего»\*, в которой автор попытался изобразить животных далекого будущего. Эта тема оказалась новой, интересной и плодотворной, и в 1988 г. вышла следующая его книга — «Новые динозавры»\*\* — о том, как могли развиваться динозавры, если бы не вымерли в конце мелового периода. В игровом формате книга показывала важные тенденции развития биосферы, наглядно демонстрировала действие законов эволюции. Позже Диксон развил эту тему и написал бестселлер «Дикий мир будущего»\*\*\*, по которому был снят многосерийный фильм.

С тех пор прошло не слишком много времени, но палеонтология уже очень существенно увеличила объем информации о разных группах вымерших животных и растений. Удалось глубже понять эволюционные тренды разных групп организмов, проследить генеральные линии в их развитии.

Интересные новые данные были получены и для позвоночных животных, обитавших на территории

\* Dixon D. After man. A zoology of future. N.Y., 1981. См. также: Крылов И.Н. Знакомьтесь: животный мир будущего (вместо рецензии) // Природа. 1983. №6. С.126–128.

\*\* Dixon D. The new dinosaurs. An alternative evolution. Topsfield, 1988.

\*\*\* Dixon D., Adams J. The future is wild: A natural history of the future. Firefly Books, 2002 (Диксон Д., Адамс Дж. Дикий мир будущего. М., 2003).



Поволжья в меловом периоде. Здесь располагалась южная окраина неглубокого Русского моря. Крупный Поволжский архипелаг протягивался от нынешней Пензы до Калача-на-Дону\*.

Палеонтологи нашли многочисленные ископаемые остатки морских рептилий (ихтиозавров, плезиозавров, мозазавров) и животных, населявших острова архипелага (водоплавающих бескрылых птиц гесперорнисов, летающих птерозавров, динозавров). Это сообщество организмов с небольшими изменениями просуществовало около 60 млн лет и окончательно исчезло в конце мелового периода, во время «великого вымирания динозавров». Причины этой катастрофы остаются загадочными. Вероятнее всего, их было много, по русской пословице «беда не приходит одна».

Интенсивные фазы горообразования и глобальные аноксические события, климатические изменения и появление лиственных лесов, усиленная активность вулканов и падение уровня Мирового океана. Своего рода окончательную точку, вероятно, поставило падение астероида. Судя по огромному кратеру в Мексиканском заливе, удар был чудовищной силы. Если бы этот астероид промахнулся мимо Земли, эволюция мезозойских организмов, вероятно, продолжалась бы еще многие миллионы лет.

Современный уровень знаний об обитателях Русского моря и Поволжского архипелага позволяет нарисовать гипотетическую картину, как могли бы выглядеть потомки мезозойских животных, если бы им удалось дожить до сегодняшних дней (при сохранении в регионе существовавших в меловом периоде географических условий).

**Ихтиозавры.** В мезозойских морях они занимали экологическую нишу, сходную с той, что сейчас принадлежит дельфинам. В основном это были хищники средних и относительно крупных размеров, от полутора до пяти метров. Судя по морфологии зубов и содержимому желудков, они питались не крупной рыбой и головоногими моллюсками.

В ходе эволюции у продвинутых представителей группы развился мощный хвостовой плавник, выполнявший основную локомоторную функцию. Появился и крупный спинной плавник. Передние конечности-ласты сильно расширились и превратились в своеобразные подводные крылья, игравшие роль руля-стабилизатора [1]. Наиболее широ-



Гипотетический неоихтиозавр.

Здесь и далее рисунки А.А.Сменцарёва

кие и длинные передние плавники были у меловых ихтиозавров рода *Platypterygius*.

Некоторые ихтиозавры были глубоководными ныряльщиками и, судя по огромным глазным орбитам черепа и кольцам склеротики, охотились в темноте. Ряд признаков указывает, что они использовали эхолокацию, как современные китообразные.

Поздние ихтиозавры из рода *Leninia* и некоторые виды рода *Platypterygius* имели сильно удлинённые тонкие челюсти, похожие на ножницы. У этих ихтиозавров были двойные носовые отверстия, функциональное значение которых не совсем понятно. Возможно, ихтиозавры обладали проточной носовой системой, аналогичной той, что предполагается для плезиозавров. Вода могла входить в хоаны, протекать через носовые камеры и выходить из внешних носовых отверстий. Не исключено, что одна пара ноздрей выпускала воду, а другая использовалась для дыхания [2].

У потомков меловых ихтиозавров эти признаки могли развиваться дальше и привести к уникальной специализации ночного охотника за гигантскими моллюсками.

В питании ихтиозавров одну из главных ролей играли головоногие, в том числе аммониты. В ходе эволюции аммониты увеличивали размеры и усиливали защиту раковины: возрастала толщина ее стенок, увеличивалось количество шипов и мощных ребер (пример — представители рода *Parapuzosia*). Возможные неоаммониты могли бы достичь размеров детской карусели. Толстые прочные раковины, покрытые шипами, надежно защищали моллюска от хищников. Неоихтиозаврам пришлось бы атаковать этих гигантов очень быстро, чтобы они не успевали втянуть голову

\* Архангельский М.С., Иванов А.В., Нелихов А.Е. Когда Волга была морем. Саратов, 2012.

в раковину. В случае удачного нападения хищник тонкими челюстями отрезал моллюску щупальца. Утрата не стала бы смертельной для неоаммонитов. Все головоногие обладают высокой способностью к регенерации и могут быстро восстанавливать утраченные конечности.

Огромные неоаммониты, вероятно, совершали бы суточные миграции и, как современные кальмары Гумбольдта, поднимались к поверхности моря по ночам. В связи с этим неоихтиозавры должны были бы стать ночными охотниками. Находить громадных моллюсков в темноте им помогали бы огромные глаза и дополнительная пара наружных носовых отверстий, обеспечивающих омывание обонятельного эпителия током воды. Передние лапы неоихтиозавров при этом сильно бы увеличились, как это наблюдается у современного горбатого кита.

**Плезиозавры.** Представители этой группы морских рептилий имели утолщенное веретенообразное тело и мощные конечности-ласты. У некоторых форм была длинная шея и относительно небольшая голова (Elasmosauridae и Cryptoclididae). У других — наоборот: шея сильно укорочена, а голова огромных размеров (Pliosauridae) [3]. Диета этих животных, в зависимости от размеров и морфологических особенностей, сильно различалась: от мелких рыб и головоногих до крупных рептилий. Некоторые длинношеие плезиозавры (*Mortueneria*, *Tatanectes*, *Kaiwhekea*), как предполагается, питались крилем: их тонкие длинные зубы образовывали решетку, которая при процеживании воды удерживала мелкую живность в пасти [4].

Проведенное компьютерное моделирование показало, что для перемещения под водой плезиозавры использовали так называемый подводный полет, подобно современным пингвинам. Они пе-

редвигались, производя машущие движения крупными передними лапами. Задние конечности практически не принимали участия в движении. Этот продвинутый тип плавания позволял плезиозаврам развивать значительную скорость.

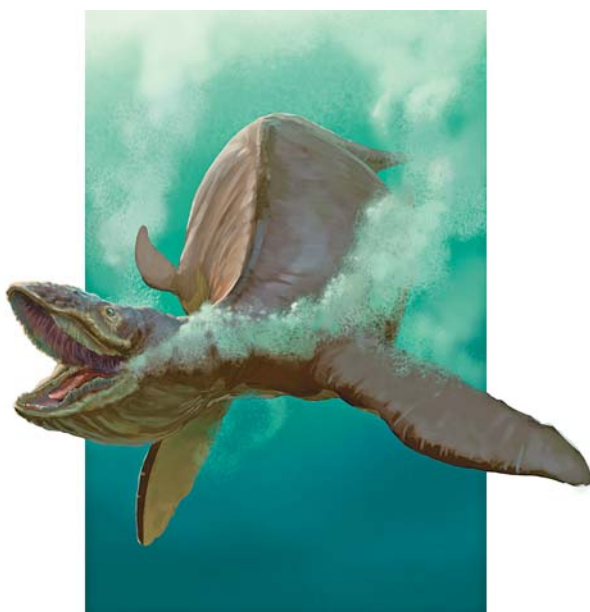
Большинству групп плезиозавров была свойственна эволюционная тенденция к увеличению размеров. У некоторых из них, например эласмозавров, сильно удлинилась шея, а голова стала относительно тела совсем небольшой. Несмотря на гигантские размеры (до 15 м), эти плезиозавры охотились лишь на мелкую рыбешку и головоногих. Вероятно, эти рептилии медленно парили в толще воды, время от времени схватывая зазевавшуюся добычу.

Можно предположить, что у неоэласмозавров-рыбоядов мог сохраниться тренд к дальнейшему увеличению шейного отдела позвоночного столба. В итоге размеры их туловищ не превышали бы 1/5 общей длины животного. Сверхдлинная шея позволяла бы охотиться, оставаясь практически на одном месте.

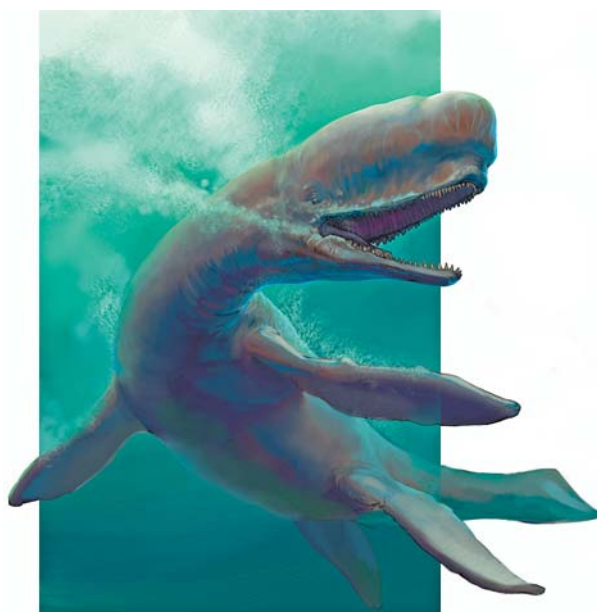
Утончение и удлинение зубов других эласмозаврид превратило бы их в гигантских пассивных фильтраторов, как это допускается для некоторых юрских и меловых плезиозавров. Тончайшие шиловидные зубы могли бы создать аналог китового уса. Активная охота даже на самых мелких пелагических животных стала бы невозможна. Шея этих морских рептилий могла бы стать несколько короче, а голова увеличилась. Неоэласмозавры-фильтраторы эволюционировали бы в своеобразные «морские пылесосы», которые засасывали креветок, водоросли, морских коньков и молодь кальмаров. Оба экологических типа громадных неоэласмозаврид населяли бы мелководья, где нет крупных хищников.



Гипотетический неоэласмозавр-рыбояд.



Гипотетический неозеласмозавр-фильтратор.



Гипотетический неоплиозавр.

Другая эволюционная стратегия могла развиться у плиозаврид с крупной головой и сильно удлинённой мордой. Их мощные зубы были приспособлены к разрыванию огромной добычи и в челюстях располагались на значительном расстоянии друг от друга, как у современных зубатых китов. Длина животных достигала 10 м. Возможно, плиозавры были глухими, на что указывают особенности строения некоторых костей основания черепа. Вероятно, во время охоты они полагались на зрение и специальные сенсорные органы, схожие с рецепторами давления (нейромастами) на морде крокодила. Эти сенсоры позволяли им чувствовать вибрацию, исходящую от животных, находящихся в воде даже на большом расстоянии.

По другой версии, плиозавры обладали весьма своеобразным слуховым аппаратом. Дело в том, что в воде не нужен специализированный орган слуха (среднее ухо), как на суше, поскольку звуковые волны хорошо распространяются в жидкой среде и передаются через кости черепа прямо во внутреннее ухо. Таким образом, плиозаврам органом слуха могло служить все тело.

Возможные потомки плиозавров были бы способны занять экологическую нишу кашалотов, став глубоководными ныряльщиками, рыскающими в поисках добычи в темных безднах. Их мощная морда вытянулась

бы еще больше, чтобы на ней разместилось огромное число сенсоров-нейромаст. Именно эти рецепторы играли бы главную роль при поиске добычи. Зрение неоплиозавров могло ухудшиться, а в передней части головы появился бы жировой мешок: он помогал бы регулировать плавучесть животного при нырянии и подъеме, а также амортизировал удары во время брачных схваток за самок. Схожие функции выполняет сперматозоидный мешок у кашалотов.

**Мозазавры.** Эти морские ящерицы — предполагаемые родственники варанов. Они были последней группой рептилий, сумевшей освоить Ми-



Гипотетический немозазавр.



ровой океан. Продвинутые представители мозазаврид обладали удлинённым телом, относительно небольшими конечностями-ластами и хвостовым плавником. Их анатомия позволяет предположить, что они плавали, волнообразно изгибаясь в горизонтальной плоскости, т.е. обладали «угревидной» локомоцией.

Длина большинства мозазавров не превышала 5 м, питались они рыбой. Но в конце своего эволюционного пути группа дала гигантские формы: мозазавр Гофмана (*Mosasaurus hoffmanni*) и тилозаврины (*Tylosaurinae*), длина которых достигала 17 м. Эти гиганты обладали мощными кинжаловидными зубами, охотились на более мелких собратьев, черепах и акул [5].

Также известны специализированные мозазавры рода *Goronyosaurus* с клыкообразными зубами и массивным черепом, они напоминали скорее крокодила, чем ящерицу [6]. Некоторые мозазавры (*Pannoniasaurus*), вероятно, обитали в пресной воде [7].

Тело неомозазавров могло значительно удлиниться, хвостовой плавник — сильно увеличиться в размерах, а голова — стать ещё более мощной и массивной. В сильных челюстях располагались бы дифференцированные зубы: округлые для дробления костей и раковин в задней части, острые для разрывания добычи — в передней. Нечто похожее наблюдалось у мозазавра прогнатодона (*Prognathodon*) [8].

У каких-то неомозазавров могли бы появиться ядовитые железы, как у современного комодского варана. Жертвы нападения этих морских рептилий умирали бы как от ран, так и от действия токсинов.

Некоторые неомозазавры охотились бы в мутных прибрежных водах или поднимались вверх по рекам, другие — приобрели бы гигантские размеры и заселили полярные широты. Плавать в холодной воде им позволила бы гигантотермия (инерционная теплокровность) — постоянство температуры тела в 20–25°C, связанное только с огромными размерами.

**Птерозавры.** В конце мелового периода на островах Поволжского архипелага гнездились представители последней группы птерозавров — аждархиды (*Azhdarchidae*). У представителей этой группы летающих ящеров отсутствовали зубы в клюве и были относительно узкие крылья [9].

В ходе эволюции шея аждархид удлинялась, увеличивались общие размеры животных. Не-

которые огромные аждархиды (*Quetzalcoatlus*), вероятно, уже не могли летать и стали пешеходами гигантских размеров. Они охотились на ящериц и мелких динозавров, собирали падаль и разоряли гнездовья других рептилий. По некоторым оценкам, такие птерозавры по высоте были сопоставимы с жирафами, а их вес мог составлять 250 кг [10].

Поволжские неоаждархиды тоже могли бы полностью разучиться летать. Этому способствовало бы обитание на островах, где нет естественных врагов. По внешнему виду и образу жизни они бы напоминали аистов и цапель и могли бы промысливать небольшими рептилиями, рыбой и беспозвоночными.

**Птицы.** Зубастые птицы гесперорнисы (*Hesperornis*) появились во второй половине мелового периода. Они отличались длинной шеей, а размеры их были сопоставимы с ростом взрослого человека. Гесперорнисы напоминали бескрылых гагарок и пингвинов, питались рыбой. Они были грузными и не умели летать, зато быстро плавали под водой [11].

Их вероятные потомки могли бы совсем перестать не только с воздушной средой, но и с суши, став полностью водными животными, подобно морским рептилиям. При этом они могли бы стать значительно крупнее, но, возможно, разучились бы нырять. Неогесперорнисы плавали бы по волнам и, как лебеди, опускали сверхдлинную шею в глубину, собирая со дна ракообразных и водоросли. Они могли бы объединяться в крупные колонии и тихо дрейфовать вдоль островов Поволжского архипелага, как гигантские поплавки. На сушу они вы-



Гипотетический неоаждархид.

ползали бы только для откладки яиц в горячий песок, как современные кожистые черепахи.

**Динозавры.** Самыми загадочными обитателями Поволжского архипелага были динозавры. Пока найдено крайне мало их остатков. Наиболее значительная находка — серия позвонков крупного титанозаврида из Ульяновской обл.

Титанозавры (*Titanosauria*) — одни из крупнейших наземных существ за всю историю планеты. Они достигали длины в 40 м и веса в 35 т. Это наиболее поздняя группа длинношеих завропод. Для них отмечается тенденция к укорочению хвоста и широкой постановке конечностей [12].

Неотитанозавры, обитавшие на островах Поволжского архипелага, могли бы уменьшиться в размерах (подобно *Magyarosaurus* из отложений маастрихтского яруса Румынии [13]), перейти к амфибийному образу жизни и почти все время проводить в прибрежной зоне, питаясь на водорослевых лугах. Их хвост, возможно, стал бы совсем коротким. Находиться в волноприбойной зоне им бы помогали удлинённые когти, выполняющие функции якоря. На голове могли бы появиться особые железы, выводящие избытки солей. Такие железы есть у современной морской игуаны амблиринха, которая питается водорослями. Потомки титанозавров могли бы, как амблиринхи, постоянно «вычищать» солёную слизь. Своим чиханием стадо неотитанозавров производило бы оглушительный шум — самый громкий звук Поволжского архипелага.

Этот архипелаг мог бы до сих пор располагаться на месте нынешних Саратова, Пензы, Ульяновска и Самары, если бы история планеты развивалась по другому сценарию. ■



Гипотетический неогесперорнис.



Гипотетический неотитанозаврид.

Авторы благодарят специалистов, поделившихся своими наблюдениями и гипотезами: А.О.Аверьянова (Зоологический институт РАН и Санкт-Петербургский государственный университет), Р.Бенсона (Оксфордский университет, Великобритания), Д.В.Григорьеву (Зоологический институт РАН), Н.Г.Зверькову (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова), Н.В.Зеленкову (Палеонтологический институт имени А.А.Борисяка РАН), С.Сакса (Музей естественной истории Билефельда, Германия), И.М.Стеньшину (Ульяновский областной музей краеведения), Д.Сурмика (Университет Силезии, Польша).

## Литература

1. McGowan C., Motani R. Ichthyopterygia. Handbook of Paleoherpertology. Pt.8. Munchen, 2003.
2. Fischer V., Arkhangelsky M., Naish D. et al. *Simbirskiasaurus* and *Pervushovisaurus* reassessed: implications for the taxonomy and cranial osteology of Cretaceous platypterygiine ichthyosaurs // Zoological Journal of the Linnean Society. 2014. V.171. №4. P.822–841.
3. Архангельский М.С., Сенников А.Г. Подкласс Synaptosauria // Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы. Ч.1 / Отв. ред. М.Ф.Ивахненко, Е.Н.Курочкин. М., 2008. С.224–243.
4. Cruickshank A.R.I., Fordyce R.E. A new marine reptile (Sauropterygia) from New Zealand: further evidence for a Late Cretaceous austral radiation of cryptoclidid plesiosaurs // Palaeontology. 2002. V.45. №3. P.557–575.
5. Lingham-Soliar T. Anatomy and functional morphology of the largest marine reptile known, *Mosasaurus hoffmanni* (Mosasauridae, Reptilia) from the Upper Cretaceous, Upper Maastrichtian of the Netherlands // Phil. Trans. Royal Soc. London B: Biological Sciences. 1995. V.347. №1320. P.155–180.
6. Azzaroli A., Guili C. De, Torre D. An aberrant mosasaur from the Upper Cretaceous of north western Nigeria // Rendiconti della Classe di Scienze Fisiche Matematiche e Naturali (Accademia Nazionale dei Lincei). 1972. V.52. P.53–56.
7. Makádi L., Caldwell M.W., Ösi A. The first freshwater Mosasauroid (Upper Cretaceous, Hungary) and a new clade of basal Mosasauroids // PLoS ONE. 2012. V.7. №12. e51781. Doi:10.1371/journal.pone.0051781.
8. Russell D.A. Systematics and morphology of American mosasaurs (Reptilia) // Bulletin of the Peabody Museum of Natural History, Yale University. 1967. V.23. P.1–240.
9. Witton M.P. Titans of the skies: azhdarchid pterosaurs // Geology Today. 2007. V.23. P.33–38.
10. Witton M.P., Naish D. A reappraisal of azhdarchid pterosaur functional morphology and paleoecology // PLoS One. 2008. V.3. №5. e2271. Doi:10.1371/journal.pone.0002271.
11. Немов Л.А., Янков А.А. Гесперорнисы в России // Русский орнитологический журнал. 1993. Т.2. №1. С.37–54.
12. Wilson J.A. Overview of sauropod phylogeny // The Sauropods: Evolution and Paleobiology / Eds. K.A.Curry Rogers, J.A.Wilson. Berkley, 2005. P.15–49.
13. Huene F. von. Die fossile Reptil-Ordnung Saurischia, ihre Entwicklung und Geschichte // Monogr. Geol. Paleontol. 1932. Ser.1. №4. S.1–361.

# ПРИРОДА

Ответственный секретарь  
**Е.А.КУДРЯШОВА**

Литературный редактор  
**Е.Е.ЖУКОВА**

Научные редакторы  
**М.Б.БУРЗИН**

Художественный редактор  
**Т.К.ТАКТАШОВА**

**Т.С.КЛЮВИТКИНА**

Заведующая редакцией  
**И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА**

**К.Л.СОРОКИНА**

**Н.В.УЛЬЯНОВА**

Перевод  
**А.О.ЯКИМЕНКО**

**М.Е.ХАЛИЗЕВА**

**О.И.ШУТОВА**

**А.О.ЯКИМЕНКО**

Графика, верстка:  
**С.В.УСКОВ**

Свидетельство о регистрации  
№1202 от 13.12.90

Учредитель:  
Президиум Российской академии наук

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

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

Подписано в печать 24.04.2017  
Формат 60×88 1/8  
Бумага офсетная. Цифровая печать  
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2  
Тираж 288 экз.  
Заказ 286  
Цена свободная

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



в следующем номере



С именем академика Д.К.Беляева (1917–1985) связано возрождение генетики во времена, когда в Советском Союзе она была еще официально запрещена. Возглавив в 1959 г. новосибирский Институт цитологии и генетики СО АН СССР (ИЦиГ), Беляев собрал «под одной крышей» уцелевших после репрессий выдающихся ученых (Ю.Я.Керкиса, З.С.Никоро, В.В.Хвостову, О.И.Майстренко, Р.Л.Берг и др.) для развития новых направлений теоретической и прикладной генетики. Научные интересы самого Дмитрия Константиновича были также связаны с эволюционной генетикой и селекцией животных. Он разработал генетические основы селекции пушных зверей, обосновал пути наследственной перестройки функции размножения у диких животных при их одомашнивании, сформулировал теорию дестабилизирующего отбора. Опыты по доместикации серебристо-черной лисицы, начатые Беляевым более полувека назад, продолжаются в ИЦиГ до сих пор. В день этого уникального научного эксперимента и в честь его автора 7 августа, в первый день проведения международной конференции «Беляевские чтения», организованной к 100-летию со дня рождения Дмитрия Константиновича, рядом с главным корпусом ИЦиГ будет установлен памятник выдающемуся ученому, запечатленному вместе с объектом главного исследования своей жизни.

## **ЭВОЛЮЦИЯ, НАПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА**

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

