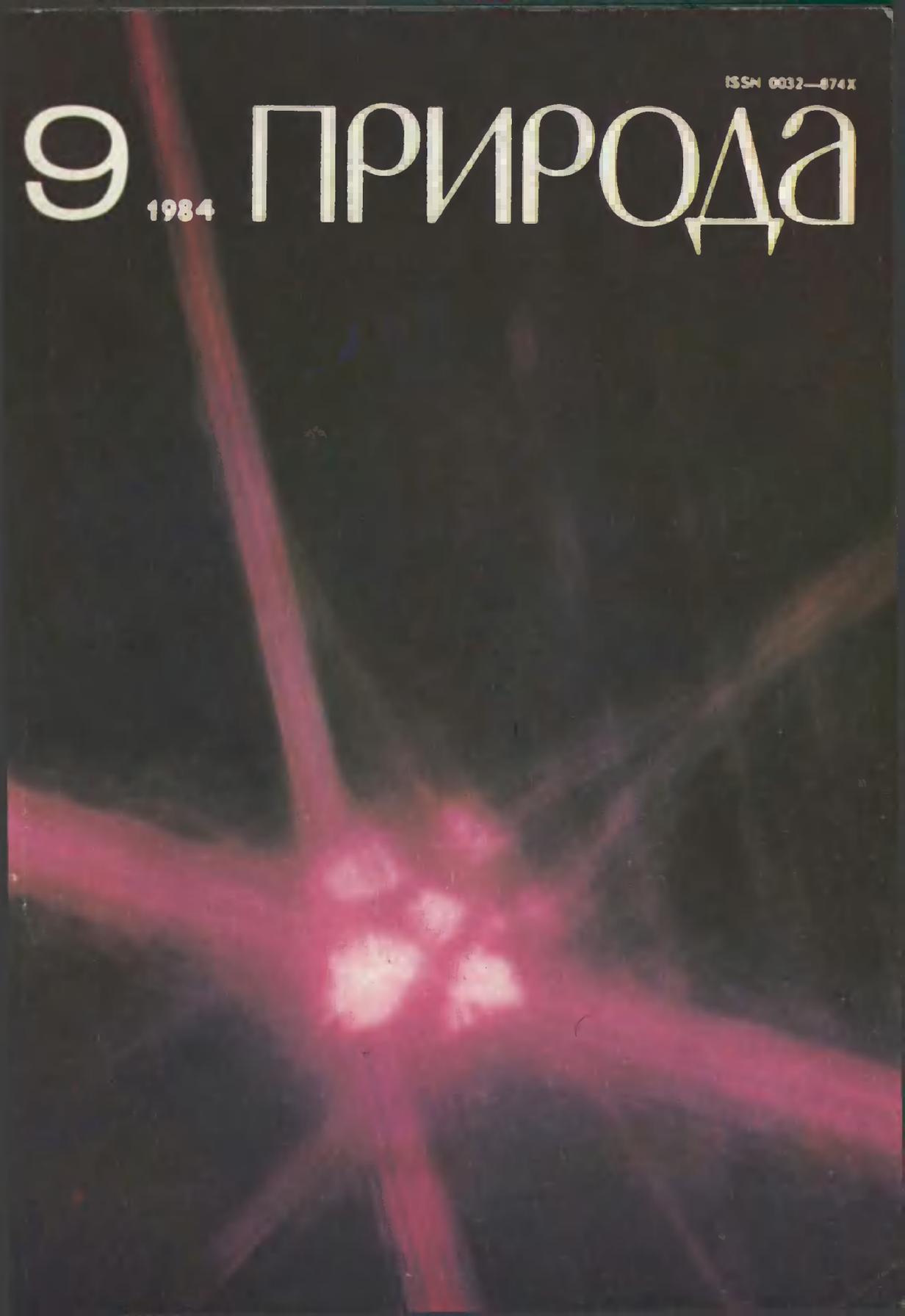


ISSN 0032-074X

9

1984

ПРИРОДА



Ежемесячный  
популярный  
естественнонаучный  
журнал  
Академии наук СССР

Основан в 1912 году



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
академик  
Н. Г. БАСОВ

Заместитель главного редактора  
кандидат физико-математических наук  
А. И. АНТИПОВ

Доктор физико-математических наук  
Е. В. АРТЮШКОВ

Академик  
Д. К. БЕЛЯЕВ

Член-корреспондент АН СССР  
Р. Г. БУТЕНКО

Доктор географических наук  
А. А. ВЕЛИЧКО

Член-корреспондент АН СССР  
В. А. ГОВЫРИН

Член-корреспондент АН СССР  
И. Р. ГРИГУЛЕВИЧ

Член-корреспондент АН СССР  
Г. А. ЗАВАРЗИН

Член-корреспондент АН СССР  
В. Т. ИВАНОВ

Доктор физико-математических наук  
Н. П. КАЛАШНИКОВ

Доктор физико-математических наук  
С. П. КАПИЦА

Академик  
Б. М. КЕДРОВ

Доктор физико-математических наук  
И. Ю. КОБЗАРЕВ

Кандидат физико-математических наук  
А. А. КОМАР

Академик  
Н. К. КОЧЕТКОВ

Доктор геолого-минералогических наук  
И. Н. КРЫЛОВ

Доктор философских наук  
Н. В. МАРКОВ

Доктор экономических наук  
В. А. МЕДВЕДЕВ

Ответственный секретарь  
В. М. ПОЛЫНИН

Доктор исторических наук  
П. И. ПУЧКОВ

Заместитель главного редактора  
член-корреспондент АН СССР  
Ю. М. ПУЩАРОВСКИЙ

Доктор философских наук  
Ю. В. САЧКОВ

Заместитель главного редактора  
доктор биологических наук  
А. К. СКВОРЦОВ

Академик АН УССР  
А. А. СОЗИНОВ

Академик  
В. Е. СОКОЛОВ

Доктор геолого-минералогических наук  
М. А. ФАВОРСКАЯ

Заместитель главного редактора  
кандидат технических наук  
А. С. ФЕДОРОВ

Заместитель главного редактора  
член-корреспондент АН СССР  
Л. П. ФЕОКТИСТОВ

Член-корреспондент АН СССР  
В. Е. ХАИН

Член-корреспондент АН СССР  
Р. Б. ХЕСИН

Доктор физико-математических наук  
А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Доктор физико-математических наук  
В. А. ЧУЯНОВ

Академик  
В. А. ЭНГЕЛЬГАРТ

На первой странице обложки. Излучение полупроводникового лазера на твердом растворе In Ga As P в проектируемых системах оптической коммуникации предполагается передавать по волоконным световодам. См. в номере: Елисеев П. Г., Мильвидский М. Г. Оптоэлектроника и кристаллоинженерия.

Фото Н. Н. Алексеева.

На четвертой странице обложки. Морские ежи на стеблях бурых водорослей. См. в номере: Зорин В. А. Перспективы командорского калана.

Фото В. Н. Кашо.

## В НОМЕРЕ

<b>ФЛАГМАН СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ</b>	<b>3</b>
<b>Елисеев П. Г., Мильвидский М. Г. Оптоэлектроника и кристаллоинженерия</b>	<b>4</b>
Современная технология позволяет выращивать кристаллы с заранее заданными физическими параметрами, которые могут изменяться в объеме кристалла на расстояниях, сравнимых с атомными. Такая технология — по аналогии с генной инженерией — может быть названа «кристаллоинженерией».	
<b>Булаевский Л. Н. Магнитные сверхпроводники</b>	<b>12</b>
Принято считать, что магнетизм и сверхпроводимость несовместимы. Магнитное поле разрушает сверхпроводимость или уничтожается само, «выталкиваясь» из сверхпроводника наружу. А могут ли в веществе одновременно наблюдаться магнитные и сверхпроводящие свойства?	
<b>Фрадков А. Б. Жидкий гелий в науке и технике</b>	<b>22</b>
Жидкий гелий — вещество уникальное. С одной стороны, вот уже три четверти века он представляет собой интереснейший объект физических исследований, с другой — служит основным средством получения сверхнизких температур, необходимых для изучения свойств других объектов.	
<b>Лебедев А. Н. Лазер на свободных электронах</b>	<b>28</b>
По принципу работы новый источник когерентного коротковолнового излучения есть «обращенный» ускоритель, в котором пучок релятивистских электронов отдает свою энергию волновому полю.	
<b>Зорин А. В. Перспективы командорского калана</b>	<b>37</b>
Изучение кормовых ресурсов командорского калана дает возможность прогнозировать его оптимальную численность и наметить пути развития в будущем каланьего хозяйства.	
<b>Фокин С. Ю. Биоакустика в разведении птиц</b>	<b>44</b>
Имитируя сигналы, которыми обмениваются в природе птенцы и наседка, можно обеспечить успех в разведении птиц в неволе.	
<b>Черняков И. Т. Утерянный остров Плиния</b>	<b>50</b>
С помощью подводной археологии на дне Днестровского лимана обнаружен остров тирагетов, о котором упоминал еще Плиний Старший.	
<b>Красносельский Э. Б. Одна из хибинских проблем</b>	<b>56</b>
Регулируя количество снега, ссыпаемого в отвалы хибинского апатитового рудника, удалось предотвратить сползание этих гигантских отвалов со склонов гор.	
<b>Сузюмов А. Е. 93-й и 95-й рейсы «Гломара Челленджера»</b>	<b>62</b>
Продолжалось изучение строения континентального склона и подножия Северо-Американского материка.	
<b>Маракушев А. А. Вулканизм Земли</b>	<b>64</b>
Главную роль в развитии вулканизма играют не широко известные вулканы, а трещинные зоны в земной коре, через которые поступают огромные объемы глубинных расплавов.	
<b>Токарев С. А. Символика огня в истории культуры</b>	<b>75</b>
Огонь как стихия, поднявшая человека над миром животных, в древние времена стал объектом мифологизации. У разных народов, стоящих на различных ступенях общественного развития, он является символом объединения и разъединения людей.	

Проблема рака, и в частности возможность быстрой и точной диагностики злокачественных опухолей, остается важнейшей задачей современной науки. Получение гибридом — гибридов нормальных и злокачественных лимфоидных клеток — не только облегчает своевременную диагностику, но и позволяет надеяться на успех в лечении некоторых форм рака.

### Артюшков Е. В. Как образуются глубокие впадины на континентах?

89

Недавно растяжение земной коры считали основным механизмом образования глубоких впадин на континентах. Однако появилось все больше данных, свидетельствующих о том, что многие впадины возникли при фазовом переходе базальтовых пород в более плотную ассоциацию минералов — эклогит.

## Владимир Александрович Энгельгардт

100

### НОВОСТИ НАУКИ

102

Запущены два японских спутника (102) • SS 433 — черная дыра? (102) • Проект искусственного космического лазера (103) • Открыт новый вид естественной радиоактивности (104) • Расход ядерного горючего измерен по нейтринному излучению (105) • Физические критерии возникновения жизни (105) • По синезеленым определяют температуру океана (106) • Графит из углеводородов (106) • Пептид сна против стресса (107) • Хлеб с добавкой отрубей (107) • Адаптация клеток к металлам (108) • Лечение диабета введением инсулина через рот (108) • Нейраминидаза возбудителя чумы (109) • Предупреждение бешенства (109) • Эндогенные опиаты и внимание (110) • Бессознательная жестикуляция (110) • Особенности социальной организации насекомых (111) • Бразильский опоссум — новое лабораторное животное (112) • Кенгуру сменяет календарь (112) • Санитарная оценка питьевых вод в Шри-Ланке (112) • «Черные курильщики» на Кипре (113) • Земля изменяет свою форму (114) • Погода в Азии связана с температурой воды в Тихом океане (114) • Обнаружена пропавшая арктическая станция (115) • Иридий в выбросах вулкана Килауэа (115) • Загрязнение воздуха в ФРГ (116) • Как помочь азиатскому слону (116) • Фламинго на Мангышлаке (117) • Древнейшее цинкоплавильное производство (117)

### РЕЦЕНЗИИ

Котляков В. М. Практическая польза науки о снеге (на кн.: А. К. Дюнин. В царстве снега)

118

Файвишевский В. А. Гипноз и психоанализ (на кн.: Л. Шерток. Непознанное в психике человека)

119

### НОВЫЕ КНИГИ

55, 122

Население и культура Крыма в первые века н. э. (55) • Кузнецов Б. Г. Идеалы современной науки (122) • Ильина Т. Д. Формирование советской школы разведочной геофизики. 1917—1941 гг. (123) • Гольденберг Л. А. Между двумя экспедициями Беринга (123)

### В КОНЦЕ НОМЕРА

Зарипов Р. X. Вариации на тему «Уральских напевов».

124

(Окончание)

# ФЛАГМАН СОВЕТСКОЙ ФИЗИКИ

В апреле этого года Ордена Ленина Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР награжден вторым орденом, орденом Октябрьской революции за большие заслуги в развитии физической науки и подготовке научных кадров.

Известно, что успехи науки XX века определились и определяются не столько открытиями отдельных талантливых ученых, сколько объединенными усилиями мощных научных коллективов, способных превратить эти открытия в развитие направлений науки и обеспечить все многообразие их применения в практике. В нашей стране имеется много физических институтов, плодотворно работающих в различных научных направлениях. «Однако Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР, известный физикам всего мира ФИАН, играет среди них уникальную роль. Именно ему, как «ведущему физическому институту», поручено партией и правительством «заботиться о развитии в стране новых, зарождающихся отраслей физики.» [Постановление ЦК КПСС «О работе партийного комитета Физического института им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР», 1970 г.]

История ФИАН насчитывает более двух с половиной веков, в ней много славных имен и знаменитых открытий. ФИАН ведет свое начало от физического кабинета Академии наук, который был основан в Петербурге одновременно с Академией в 1725 г.<sup>1</sup> Основание же современного, советского, ФИАН можно отнести к 1934 г., когда он вместе с Академией наук переехал в Москву и получил свое нынешнее наименование. Именно тогда, 50 лет назад, под руководством Сергея Ивановича Вавилова, назначенного директором преобразованного института, начал складываться уникальный коллектив ученых высшей квалификации и всех физических специальностей, который, как показало его дальнейшее развитие, оказался способен ставить и решать крупнейшие проблемы практически во всех актуальных направлениях физики, имеющих кардинальное значение для научно-технического прогресса. Более того, этот коллектив продемонстрировал — и продолжает демонстрировать — способность обеспечить зарождение и развитие таких направлений и при этом не пропустить ни одной существенной проблемы, диктуемой логикой развития науки или потребностями народного хозяйства страны.

Назовем несколько таких областей современной науки, у колыбели которых стояли ученые ФИАН: физика космических лучей и ускорителей (т. е. по сути все то, что ныне называется физикой высоких энергий); люминесценция, нелинейная оптика и спектроскопия; теория колебаний и радиофизика; эффект Вавилова — Черенкова, переходное и другие виды излучения, следующие из этого эффекта; радиовострономия и все направления «неоптической» астрономии (ультрафиолетовая, рентгеновская, нейтринная и т. п.); управляемый термоядерный синтез (оба важнейших направления — магнитное и инерциальное удержание плазмы); физика лазеров и мазеров, оптоэлектроника, интегральная оптика и другие новейшие направления, порожденные квантовой электроникой.

Наряду с развитием фундаментальных исследований, первостепенное внимание ФИАН всегда уделял практической реализации результатов научных достижений, совместным разработкам с промышленными институтами, конструкторскими бюро, заводскими лабораториями, клиниками.

Отмечая пятидесятилетие современного ФИАН, редакции «Природы» хочется отметить и свою постоянную связь с этим научным учреждением. На протяжении всех этих лет наши читатели знакомятся со всеми важнейшими достижениями фиановских ученых. Его ведущие сотрудники неизменно входят в состав редакционной коллегии журнала. В течение 15 лет, с 1936 по 1951 г., ее возглавлял директор ФИАН С. И. Вавилов. Сейчас главный редактор «Природы» — также директор этого института. Публикуемые ниже статьи — продолжение этого традиционного сотрудничества.

<sup>1</sup> Об истории и некоторых современных чертах ФИАН см.: Гончаров В. А., Каслин В. М., Тимофеев Ю. П. На передовых рубежах современной физики.— Природа, 1977, № 11, с. 28

## Оптоэлектроника и кристаллоинженерия

П. Г. Елисеев, М. Г. Мильвидский



Петр Георгиевич Елисеев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР. Основные исследования посвящены полупроводниковым лазерам — их технологии, физическим характеристикам и применениям, а также другим проблемам оптоэлектроники. Автор монографий: Полупроводниковые лазеры (совместно с О. В. Богданкевичем и С. А. Дарзеном). М., 1976; Введение в физику инжекционных лазеров. М., 1983.



Михаил Григорьевич Мильвидский, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Государственного научно-исследовательского и проектного института редкометаллической промышленности Министерства цветной металлургии СССР. Занимается проблемами технологии и материаловедения полупроводников. Автор монографий: Физико-химические основы получения разлагающихся полупроводниковых соединений. М., 1974; Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М., 1984. Лауреат Ленинской и Государственной премий СССР.

Полупроводниковая электроника является важнейшей частью материальной базы научно-технической революции. Самые смелые проекты кибернетики и робототехники, массовые бытовые радиоэлектронные приборы и сверхбыстродействующая вычислительная техника возникли исключительно благодаря успехам технологии выращивания полупроводниковых кристаллов. Развитие полупроводниковой электроники происходит лишь в последние 30—35 лет, если отсчитывать от создания первых лабораторных транзисторов, т. е. от того момента, когда необходимость быстрого прогресса в этой области стала очевидной.

Фундамент полупроводниковой тех-

нологии составляет материаловедение, не слишком заметное на переднем фронте разработок, но оказывающее необычайно важное влияние на весь ход научно-технического прогресса. Оно имеет дело со своеобразной «синтетической» природой веществ, обладающих сверхвысокой чистотой и кристаллическим совершенством. Уровень «полупроводниковой» чистоты является образцом для других материаловедческих направлений. Его освоение, например, в технологии стеклообразных материалов, позволило в миллиарды раз улучшить прозрачность волоконных световодов и создать новый перспективный вид лазерной связи — волоконно-оптические системы.

## МАТЕРИАЛЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Первые этапы развития промышленной полупроводниковой электроники были привязаны к элементарным полупроводникам — селену, германию, кремнию. Кремний и поныне является «хлебом» транзисторного производства и всей новой микропроцессорной техники. На следующих этапах в орбиту промышленности были вовлечены более разнообразные, в основном бинарные, полупроводниковые соединения. Они оказались незаменимыми в приемниках света различных диапазонов длин волн, а также в диодных источниках излучения. Примером может служить арсенид галлия (GaAs), применяемый в лазерах, светодиодах, фотодиодах, микроволновых генераторах, транзисторах и, наконец, в новейших интегрально-оптических схемах. Здесь мы хотели бы обсудить новые пути полупроводниковой электроники, связанной с испусканием и приемом оптических сигналов, т. е. с той областью, которую стали в последнее время объединять под названием «оптоэлектроника».

Если прежде можно было решать возникающие задачи путем подбора материала из числа известных полупроводников (так, например, решилась блестящая судьба кремния), то по мере расширения круга задач и повышения требований к материалам стала все определенной проблема «кристаллоинженерии» — создания материалов с заранее заданными свойствами. В число задаваемых параметров попадают и ширина запрещенной зоны, и тип зонной структуры, времена жизни носителей, тип и период решетки и т. д.

Быстрое развитие элементной базы оптоэлектроники началось с создания инжекционного лазера на основе арсенида галлия. Теоретическое предложение его последовало в 1961 г. в работе Н. Г. Басова, О. Н. Крохина и Ю. М. Попова, а практическое осуществление — уже в следующем году<sup>1</sup>. Почти одновременно было установлено, что арсенид галлия и ряд других бинарных полупроводников являются эффективными люминесцентными и фотоэлектрическими материалами и могут использоваться в светодиодах, фотодиодах, фотосопротивлениях и других приборах.

Дальнейшие успехи полупроводниковой лазерной техники были связаны с освоением гетеропереходов и гетероструктур, предложенных в 1963 г. Ж. И. Алфёровым и рядом других ученых<sup>2</sup>.

Напомним вкратце принцип действия диодных или инжекционных лазеров. Накачка в таких лазерах производится путем инжекции носителей тока (за счет приложения к полупроводниковому диоду электрического потенциала) в области р—п-перехода, т. е. между частями диода с разным типом проводимости — дырочным (р-тип) и электронным (п-тип). В результате такой инжекции происходит рекомбинация электронов и дырок с испусканием фотонов, энергия которых приблизительно равна ширине запрещенной зоны полупроводника. Если плотность тока накачки превышает определенную пороговую величину, такое спонтанное рекомбинационное излучение усиливается и возникает лазерный эффект. Резонатор (плоско-параллельные зеркала), необходимый для создания в лазере обратной связи и превращения его из усилителя в генератор, в инжекционном лазере создается простым скалыванием, поскольку сколотые торцы кристалла всегда параллельны друг другу.

Долгое время основным недостатком диодных лазеров были относительно жесткие температурные условия их работы: носители заряда, а также образующиеся фотоны сравнительно легко уходили в пассивные области полупроводника, где расстрачивали свою энергию на его нагрев. В результате диодные лазеры могли работать лишь при охлаждении (например, жидким азотом) или в режиме достаточно коротких импульсов.

Однако активную область, в которой происходит излучательная рекомбинация электронов и дырок, можно ограничить, если заключить ее между слоями другого полупроводника с большей шириной запрещенной зоны (это и называется гетероструктурой, в отличие от гомоструктуры, в которой контактируют области с разным типом проводимости, но одного и того же полупроводника). Образующийся на границе двух полупроводников потенциальный барьер отражает носители обратно в активную область. Более того, помимо такого эффекта «ограничения носителей» гетероструктура обладает и эффектом «свето-

<sup>1</sup> Подробнее об этом см.: Басов Н. Г. Полупроводниковые квантовые генераторы. Нобелевская лекция.— Природа, 1965, № 3, с. 42.

<sup>2</sup> См.: Гончаров В. А. Академик Ж. И. Алфёров — лауреат премии Европейского физического общества.— Природа, 1979, № 6, с. 103.

вого ограничения»: благодаря существенному, до нескольких процентов скачку показателя преломления на границе двух полупроводников, фотоны, отражаясь от него, распространяются вдоль активной области, как по волноводу.

Практические успехи в этом направлении были достигнуты при использовании пары полупроводников — арсенида галлия и родственного ему смешанного кристалла галлий — алюминий — мышьяк ( $Ga_xAl_{1-x}As$ , или, для краткости,  $GaAlAs$ ). Эта пара явилась своего рода подарком природы, поскольку в добавление к своим полезным электронным и оптическим свойствам, она отличается близостью периодов кристаллической решетки (такие материалы мы в дальнейшем будем называть «изо-периодическими»). Разумеется, речь идет об изоморфных кристаллах, т. е. имеющих одинаковый тип решетки. К счастью, многие бинарные полупроводники допускают смешивание в широком диапазоне составов, и твердые растворы наподобие  $GaAlAs$  давно уже имеют практическое применение.

### ИЗОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДЫ

Совпадение периодов решетки двух соединений — редкое явление.  $GaAs$  и  $GaAlAs$  благодаря этому могут образовать бездефектный гетеропереход, поскольку обе решетки «пристыковываются» одна к другой без деформаций и разрывов, неизбежных в том случае, когда периоды различны. Строго говоря, полное совпадение имеет место только при определенной температуре (в данном случае — при температуре  $890^\circ C$ , около которой ведется кристаллизация и происходит, собственно, пристыковка кристаллических решеток). Некоторое различие в коэффициентах теплового расширения приводит к тому, что при комнатной температуре периоды уже несколько расходятся (до  $0,1\%$ ), что, однако, сводится лишь к некоторой упругой деформации кристалла, но не сопровождается формированием дефектов «несоответствия».

Практика показала преимущества применения гетеропереходов в оптоэлектронике. Они позволяют создавать в пределах полупроводниковой среды волноводы для света и потенциальные ямы для носителей заряда (электронов и дырок), что сильно расширяет возможности конструирования и оптимизации оптоэлектронных устройств. Так, за счет применения гетеро-

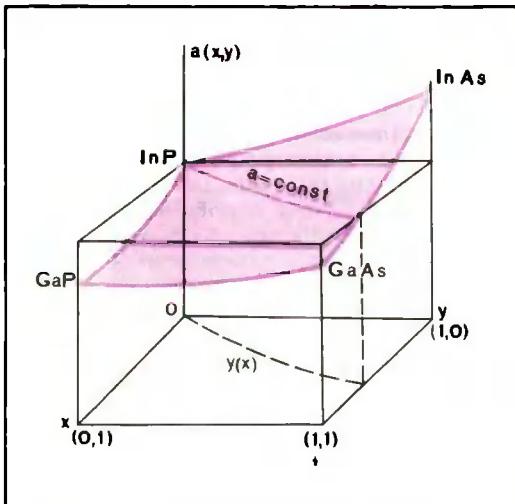
перехода  $GaAlAs-GaAs$  и создания соответствующих гетероструктур (с двумя или более гетеропереходами) КПД полупроводникового лазера при комнатной температуре удалось поднять от одного до  $30-50\%$ , а порог возникновения генерации снизить более чем в 100 раз. Полупроводниковый инжекционный лазер стал наиболее компактным, быстродействующим и долговечным изделием квантовой электроники.

Оставался нерешенным вопрос, как быть с теми спектральными диапазонами, которые не охватываются лазерами на основе  $GaAlAs-GaAs$ , излучающими в интервале длин волн  $0,6-0,9$  мкм. Со временем становилось все больше задач, где нужны другие длины волн. К таким задачам относятся голография, видеозапись, спектроскопия высокого разрешения. Поскольку длина волны излучения связана с шириной запрещенной зоны полупроводника (обратно пропорциональной зависимостью), для освоения новых, практически важных спектральных диапазонов потребовались новые полупроводниковые материалы. Особенно острая потребность возникла в технике волоконной оптической связи, где выяснилось, что длины волн около  $1,3$  мкм и  $1,55$  мкм соответствуют довольно глубоким минимумам затухания («окнам прозрачности») в стекловолокне на основе двуокиси кремния. Кроме того, на длине волны около  $1,3$  мкм материал световода обладает минимальной дисперсией, что обеспечивает возможность передачи без искажения большого объема информации в единицу времени (при использовании одномодовых световодов). Возможно, что по мере освоения волокон на основе двуокиси германия и других новых материалов станут актуальными диапазоны  $1,75$  мкм и более длинноволновые.

Еще в 1974 г. в совместной работе Физического института им. П. Н. Лебедева и Государственного института редкометаллической промышленности (ГИРЕДМЕТ) была создана лазерная гетероструктура нового типа, которой в дальнейшем выпала счастливая судьба. Речь идет об использовании изопериодических твердых растворов в рамках четверной системы индий — галлий — мышьяк — фосфор.

Способ подгонки периодов решетки является частным случаем так называемого изопериодического замещения в многокомпонентных системах. Возьмем за основу бинарное соединение фосфид индия ( $InP$ ). Это обусловлено тем, что мы собираемся использовать объемные монокристаллы

InP в качестве материала для «подложек», на которые наращиваются последующие слои гетероструктуры. Если часть атомов In заместить атомами Ga, то период решетки уменьшится, так как галлий имеет несколько меньший ковалентный радиус, чем индий. Если же произвести замещение в другой субрешетке и заменить часть атомов P на атомы As, то период решетки увеличится. Таким образом, одновременное дозированное введение в твердый раствор Ga и As может происходить с взаимной компенсацией их влияния на период



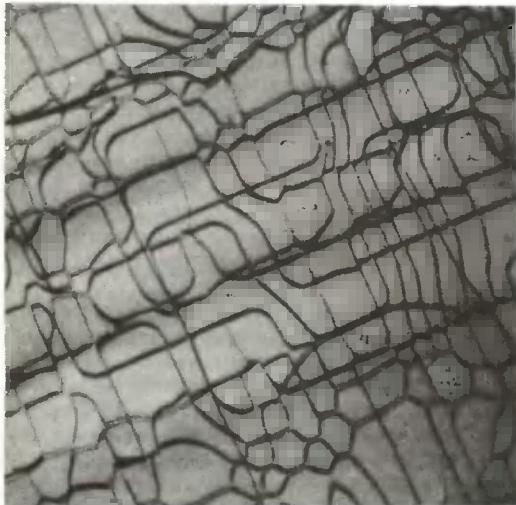
Зависимость периода решетки  $a[x, y]$  в четверной системе  $In_{1-x}Ga_xP_{1-y}As_y$  от соотношения компонент  $x$  и  $y$  (схематически). Показана изопериодическая линия  $a=const$ , соответствующая периоду решетки InP.

решетки, т. е. без его изменения («изопериодически»). Какое место в решетке занимает примесь, определяется ее валентностью. Валентности Ga и In совпадают, как совпадают валентности As и P.

В итоге компенсированного замещения мы получили четверную систему  $In_{1-x}Ga_xP_{1-y}As_y$ , совпадающую по периоду решетки с InP. Иначе говоря, мы сконструировали пару материалов, пригодных для образования бездефектного гетероперехода. Оказалось, что такое замещение в данном конкретном случае ведет к заметному уменьшению ширины запрещенной зоны, поэтому такой четверной твердый раствор является потенциальной ямой для электронов, если он окружен широкозонным InP.

Подобным же путем можно создать множество других пар изопериодических

материалов, практически для любых длин волн во всем диапазоне, перекрываемом полупроводниками. Как было видно, необходимо, чтобы имелись две или более химические «степени свободы» (т. е. два или более изменяемых независимо параметров состава смеси). Зависимость периода решетки  $a$  от двух параметров  $x$  и  $y$  представляется в виде гладкой поверхности, определяемой в квадрате координат  $0 \leq x \leq 1$  и  $0 \leq y \leq 1$ . Изопериодический ряд составов соответствует линии равной высоты («горизонтали»), спроектированной на плоскость



Электронная микрофотография сетки дислокаций несоответствия в плоскости гетерограницы кристаллов InP и InGaPAs при различных периодах решетки  $\sim 0,5\%$ . Увел. 30 тыс.

( $x, 0, y$ ). Такая линия, проходящая через вершину квадрата (т. е. включающая бинарное вещество), представляет наибольший интерес, поскольку дает возможность использовать бинарную подложку (большинство бинарных материалов научились выращивать в виде совершенных крупных кристаллов). Любая точка на изопериодической линии дает состав, пригодный для создания бездефектного гетероперехода с материалом подложки или с любым другим вдоль той же линии. Новые четверные составы удается изготовить в виде тонких пленок (толстые характеризуются сильной неоднородностью), однако этого вполне достаточно для практических применений.

Стоит обсудить, что происходит, когда стыкуются решетки с различающимися периодами. Если относительное расхождение

ние мало, скажем, составляет 0,1 %, то тонкий слой, прилегающий к подложке просто слегка упруго деформируется до тех пор, пока периоды не станут одинаковыми в касательном направлении. По принципу Пуассона в другом, нормальном направлении происходит упругая деформация противоположного знака, т. е. решетка четверного слоя претерпевает некоторое понижение кристаллографической симметрии. Например, из кубической превращается в тетрагональную, хотя и слабо отличающуюся от кубической.

Такая ситуация соответствует «когерентной» гетерогранице. С ростом различия периодов упругие напряжения растут и при некотором критическом значении начинают формировать дислокации несоответствия, «когерентность» решеток утрачивается. Сетка дислокаций несоответствия, в зависимости от сорта вещества и толщины слоев, может возникать при относительном несоответствии 0,3—0,5 % и более. При ее наличии излучательные и фотоэлектрические свойства гетерограницы деградируют.

Картина люминесценции кристалла выявляет дислокации несоответствия в виде темных линий. Они образуются потому, что вблизи дислокаций материал не излучает, а избыточные носители стекают к дислокации и рекомбинируют без испускания фотонов. С дальнейшим увеличением различия периодов сетка дислокаций уплотняется, дефекты «прорастают» в прилегающий материал, искажая морфологию границ и поверхностей. Эпитаксия (см. ниже) затруднена уже при расхождении решеток в 1 %. В дальнейшем может происходить рост поликристаллов, непригодных для оптоэлектронных применений.

## ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

С физико-химической точки зрения создание монокристаллических структур есть управляемый фазовый переход. Исходная фаза — это жидкость, пар или пучок атомов или молекул. Она содержит заданные компоненты и легирующие добавки. Для получения определенного состава кристалла требуется подача компонент в нужном отношении. Причем оказывается, что исходная фаза должна иметь состав, совершенно отличный от желаемого в твердой фазе. Подбор этого состава осуществляется для равновесных условий физико-химическими расчетами. На практике, в условиях отклонения от равновесия, многие задачи приходится решать эмпириче-

ским путем, поскольку расчеты в большинстве случаев недостаточно надежны.

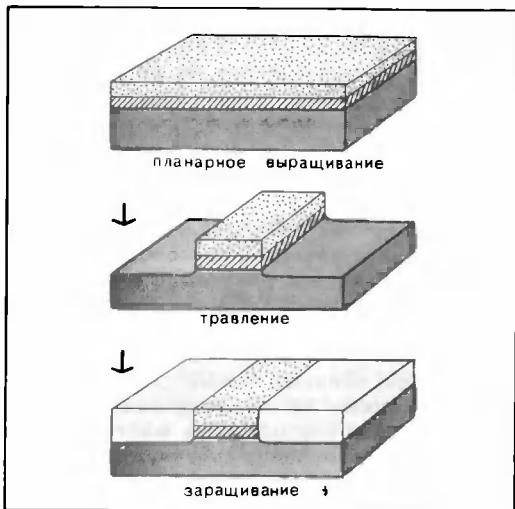
В многокомпонентной жидкой фазе при постепенном охлаждении вначале происходит кристаллизация наиболее тугоплавких соединений; например, в системе индий — галлий — фосфор — мышьяк вначале начнет затвердевать состав, близкий к фосфиду галлия, а в конце — почти чистый арсенид индия. Поэтому ранние попытки получения массивных слитков четверных смесей были малоуспешными. Слитки оказывались настолько неоднородными, что на несколько лет отбили охоту иметь дело с такими системами.

Новая волна интереса к многокомпонентным системам основывалась уже на ином технологическом приеме — методе эпитаксии, т. е. наращивании слоя кристалла на подложке (с воспроизведением в слое ее кристаллографической ориентации). Эпитаксия получила распространение в 60-е годы и была апробирована на системе GaAs. Наиболее распространенная методика — жидкофазная эпитаксия. Современные установки жидкофазной эпитаксии представляют собой сложные комплексы технологической и управляющей аппаратуры. В них осуществляется прецизионный контроль температуры и ее распределения по длине горячей зоны. Для выравнивания температуры используются тепловые трубки. Рост ведется в атмосфере ультрачистого водорода (примеси кислорода, воды или других активных веществ губят все дело). Управление температурным режимом и перемещение подложек в реакторе для смены жидкой фазы осуществляют автоматы, связанные с ЭВМ.

Достоинство метода состоит в том, что в зоне контакта жидкой и твердой фаз для многих вредных примесей энергетически выгоднее находиться в жидкой, а не в твердой фазе. Примеси, способные быстро диффундировать, могут быть извлечены из твердой фазы. Это обстоятельство облегчает борьбу с неконтролируемыми примесями и дает возможность вырастить материалы с высокими излучательными свойствами, нередко превосходящими свойства аналогичного материала, выращенного методами объемной кристаллизации. Недостаточно большая производительность жидкофазной эпитаксии заставляет развивать другие методы, более привлекательные для массового производства. К ним относятся газофазная эпитаксия и вакуумные методики.

Из разных методов газовой эпитаксии наибольшую популярность за последнее

время приобрела так называемая «МОС-гидридная» методика, основанная на применении для выращивания металлоорганических соединений (МОС) и гидридов. На подложке происходит химическое осаждение полупроводниковых веществ за счет разложения МОС (содержащих элементы III группы) и гидридов (содержащих элементы V группы). Скорость поступления и состав газовой фазы являются управляемыми факторами процесса, контроль над которыми поручается ЭВМ. Замечательной особенностью современной МОС-гидридной ме-



Последовательность изготовления полосковой лазерной гетероструктуры.

тодики является возможность необычайно однородного осаждения на большой площади пластины, что дает слои равномерной толщины. Это позволило освоить технику изготовления гетероструктур с ультратонкими активными слоями (5—10 нм) и периодических структур — «сверхрешеток»<sup>3</sup>. Ультратонкие гетероструктуры позволяют добиться снижения порога лазерного режима и использовать новые квантово-размерные эффекты.

Интересной разновидностью вакуумной эпитаксии является молекулярно-пучковая эпитаксия, которая является наиболее «физическим» эпитаксиальным методом кристаллизации. В ультравысоком вакууме (порядка  $10^{-10}$  мм рт. ст.) в нагреваемых

ячейках рождаются тепловые пучки атомов или молекул исходных веществ — компонентов. Пучки направляются на подложку, причем скорость притока всех компонентов контролируется температурой каждой ячейки. Кристаллизация происходит при соединением оседающих атомов к кристаллической решетке при некотором тепловом движении атомов вдоль поверхности. Для этого подложка поддерживается в нагретом состоянии, и компоненты, в зависимости от их летучести, могут частично испаряться. Таким образом, и здесь, как в жидкостной и газовой эпитаксии, необходимо эмпирическое определение отношения скоростей потоков компонентов для получения желаемого состава твердой фазы.

Методическое достоинство эпитаксии с молекулярными пучками состоит в возможности физической диагностики роста практически в его процессе (методами дифракции электронов, Оже-спектроскопии, масс-спектроскопии и т. п.). Установки молекулярной эпитаксии — это, как правило, агрегаты, насыщенные современной электронной аппаратурой.

## КОММУНИКАЦИОННЫЙ ЛАЗЕР

Обратимся к практическим результатам «кристаллоинженерии» в области оптоэлектроники, но ограничимся одним из них, возможно, наиболее важным — полупроводниковым лазером для систем оптической связи («коммуникационный» лазер). Речь идет о специализированной гетероструктуре, работающей на одной из оптимально распространяющихся по волокну длин волн (1,3 или 1,55 мкм) и предельно приспособленной для согласования с волоконно-оптическим световодом. Это миниатюрное устройство в форме кристаллического кубика с ребром 100—200 мкм имеет собственно активную область лазера из четверного твердого раствора InGaPAs в виде нитевидного или полоскового волновода (с сечением менее одного квадратного микрометра). Она окружена с боковых сторон полупроводниковой средой с более широкой запрещенной зоной и меньшим показателем преломления. В качестве такой среды используется тот же материал, что и в подложке, InP. Мы видим, что объем активной среды поистине микроскопический, около  $10^{-10}$  см<sup>3</sup>. Поэтому при высокой требуемой мощности накачки лазера ( $10^8$  Вт/см<sup>3</sup>) порог генерации достигается при приемлемом токе около 10 мА.

Активная нить вытянута между параллельными зеркальными гранями диода, об-

<sup>3</sup> Подробнее об этом см.: Басс Ф. Г. Полупроводники со сверхрешетками. — Природа, 1984, № 7, с. 80.

разующими оптический резонатор. К одной из них подводится волоконный световод, в который и передаются световые сигналы от лазера. Излучение мощностью около 10 мВт, вполне достаточной для передачи оптического сигнала на расстояние 50—100 км, вводится в сердцевину световода, сечение которой несколько больше (примерно 10 мкм в одномодовом световоде), чем сечение лазерной активной области. Накачка и модуляция излучения лазера обычно производятся током, имеющим постоянную и переменную компоненты, при-



Передающий модуль для стекловолоконной линии связи на основе инжекционного лазера на InGaPAs. Показаны отдельные диоды (в центре) и окончательное устройство в сборке с отрезком волоконно-оптического кабеля.

чем переменная несет полезную информацию, предназначенную для передачи. Внешние модуляторы такому лазеру не требуются, поскольку он совмещает функции генератора несущей частоты и модулятора. Ширина полосы передаваемых частот может превышать 2 ГГц, что эквивалентно более чем 200 тыс. телефонных каналов. Ясно, что коммуникационный лазер этого типа близок к идеальному источнику для лазерной связи, все возможности которого еще предстоит освоить. Он может выступать и в роли усилителя, и в роли гетеродина, и даже в роли приемника оптических сигналов.

Отечественная промышленность по прототипу, разработанному совместно ФИАНом и ГИРЕДМЕТОм, освоила выпуск низкороговых непрерывно излучаю-

щих лазеров такого типа с длиной волны 1,3 мкм, а также выпуск передающих модулей на основе такого лазера. Ресурс их работы составляет 10—20 тыс. часов и, по-видимому, будет увеличен.

Стоит заметить, что лазеры на основе InGaPAs—InP успешно конкурируют с более традиционными типами полупроводниковых лазеров не только потому, что они перекрывают более актуальный диапазон длин волн. Исследования показали, что у них имеется и ряд других привлекательных качеств, среди которых можно упомянуть повышенную оптическую прочность и химическую и фотохимическую стойкость, а также слабое влияние длительности функционирования на динамику излучения, т. е. практическое отсутствие опережающей деградации динамических характеристик.

### ДАЛЬНЕЙШИЕ ПРОБЛЕМЫ

Перед материаловедением многокомпонентных систем и технологией структур на их основе стоят новые задачи. Некоторые мы уже упомянули. Это — освоение композиций, излучающих в более длинноволновом и более коротковолновом диапазонах, включая новые смеси с дальними соседями по периодической таблице; получение ультратонких многослойных структур; изготовление сложных интегрально-оптических схем, плоских и нитевидных структур, обладающих квантово-размерными эффектами; направленное изменение таких свойств материала, как коэффициент теплового расширения, энергия электронного средства и т. д.

Стоит обратить внимание на практические успехи в изготовлении сложных структур на так называемых рельефных подложках с пространственным масштабом отдельных элементов рельефа около 10<sup>-4</sup> см и менее. В лазерной технике эти успехи позволили снизить пороговый ток лазеров до 5—10 мА при комнатной температуре и получить стабильное однододовое излучение. Рельефные подложки содержат объемные структуры — канавки и «мезополоски» различного сечения, которые затем селективно «заращаются» эпитаксиальными методами. Детали роста в микромасштабе имеют решающее значение в получении заданных структур. Они зависят от анизотропии скорости роста, поскольку отдельные фрагменты поверхности подложки имеют различную ориентацию, от закономерностей диффузии компонентов в исходной фазе, краевых эффектов.

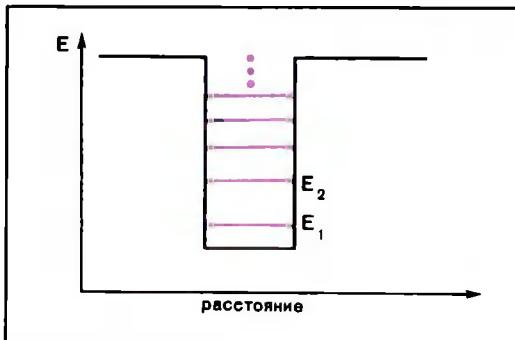
Оказывается, что ориентация локального фронта влияет на состав растущей твердой фазы, как влияют на него различие периодов решетки и упругие напряжения в твердой фазе. Между тем обоснованная модель роста на рельефной подложке пока не создана, и вся эта новая область зависит от искусства и опыта технологов.

Другая интересная проблема состоит в том, что стремление к полному соответствию периодов решетки на гетерогранице не всегда оправданно. Высоко совершенные слои (свободные от дислокаций), можно получать и в том случае, если между подложкой и наращиваемым слоем имеется некоторое малое различие периодов. Тогда возникающие упругие напряжения загибают ростовые дислокации и «укладывают» их в плоскость гетерограницы. Такой способ эмпирически апробирован, но еще не получил широкого применения.

В последнее время было показано, что упругие напряжения от несоответствия периодов могут быть использованы для получения заданной анизотропии излучательных свойств активной среды. Такая анизотропия может, например, увеличить эффективность испускания определенного, желаемого сорта излучения за счет других, не имеющих в данном случае применения. Так, в структурах  $\text{InGaPAs-InP}$  интенсивность излучения двух ортогональных поляризаций зависит от величины деформации в направлении нормали к плоскости излучающего слоя. Поэтому расчетный порог генерации для одной поляризации убывает с ростом деформации (одного знака), а для другой поляризации — повышается. По самому смыслу порога реализуется, разумеется, нижнее значение, чем и определяется поляризация излучения. На опыте видно, что когда анизотропная деформация отсутствует, т. е. имеется полное согласование решеток, пороговые токи обеих поляризаций примерно равны, так что действительное значение порога проходит через максимум. Некоторое дозированное введение анизотропной деформации будет давать снижение порога с устойчивой поляризацией излучения. Открытый вопрос заключается в том, какова допустимая доза несоответствия с точки зрения долговечности, надежности, а также других излучательных характеристик. Особенно серьезную озабоченность вызывает чувствительность излучения к температуре. Известно, что выше комнатной температуры излучательные характеристики полупроводникового лазера ухудшаются. Поэтому всякие

оптимизации лазерных структур должны включать и этот аспект.

В заключение остановимся на проблеме получения ультратонких слоев для так называемых квантово-размерных лазеров. Современные эпитаксиальные методы позволяют уменьшить толщины переходных слоев в гетероструктурах до 1—2 нм; поэтому при толщине активного слоя 5—10 нм его энергетический профиль уже близок к прямоугольному. Когда размер кристалла сближается с длиной волны де Бройля электронов, энергетический



Система энергетических уровней в квантово-размерной гетероструктуре, толщина которой сравнима с длиной волны де Бройля электронов.

спектр полупроводника заметно изменяется — он становится сходным с дискретным спектром атомных или молекулярных структур. Таким образом, нитевидная структура, имеющая «квантово-размерную» толщину уподобляется длинной искусственной «молекуле», излучательные свойства которой могут управляться за счет изменения размеров и профиля в поперечных направлениях. Технологія полупроводников приближается к уровню, когда такие удивительные структуры можно будет исследовать экспериментально.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Елисеев П. Г. ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ. М.: Наука, 1983.

Елисеев П. Г., Лавров В. Н. ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ В ВОЛОКОННООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ.— Квантовая электроника, 1980, № 9, с. 1845.

## Магнитные сверхпроводники

Л. Н. Булаевский



Лев Наумович Булаевский, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР. Основные научные интересы относятся к физике твердого тела. Автор свыше ста научных работ по физике твердого тела, квантовой химии и медицинской статистике. Один из авторов книги: Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. М., 1977.

Магнитными называют вещества, создающие магнитное поле. Сверхпроводники, кроме замечательной способности проводить электрический ток без сопротивления, обладают и второй характерной особенностью — они «уничтожают» внутри себя магнитное поле, «выталкивая» его наружу.

А могут ли в одном веществе одновременно наблюдаться магнитные и сверхпроводящие свойства? Этот парадоксальный вопрос поставил В. Л. Гинзбург в 1956 г. В более широком смысле он сводится к тому, могут ли вообще сосуществовать такие, на первый взгляд, взаимоисключающие явления, как магнетизм и сверхпроводимость.

К счастью, в физике есть универсальный инструмент для разрешения подобных противоречий — принцип минимума свободной энергии. Ниже мы увидим, к каким «хитрым» формам сосуществования двух антагонистических типов микроскопического упорядочения приводит столь простой принцип.

### МАГНЕТИЗМ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ПРИЧИНЫ ИХ «АНТАГОНИЗМА»

Все ли типы магнитного упорядочения несовместимы со сверхпроводимостью?

Для ферромагнетиков это, безусловно, так, ибо в них элементарные магнитные моменты ориентированы преимущественно вдоль одного направления, так что и внутри образца, и снаружи магнитное поле направлено одинаково (рис. 1а). Сверхпроводимость экранирует поле внутри образца, в связи с чем эти два типа упорядочения оказываются несовместимыми. В антиферромагнетике проблема уже не столь остра, поскольку направление магнитных моментов быстро (в атомных масштабах) меняется в пространстве и результирующее магнитное поле практически отсутствует (рис. 1б). Поэтому «мирное сосуществование» антиферромагнетизма и сверхпроводимости не кажется таким уж невероятным. Ниже речь пойдет еще об одном магнитном состоянии — так называемом спиновом стекле. Чтобы понять его природу, вспомним, что в ферромагнетике или антиферромагнетике при температурах  $T$  выше точки магнитного перехода (точки Кюри  $\theta$  или Нееля  $T_N$ ) магнитные моменты в каждом узле кристаллической решетки меняют направление в зависимости от времени хаотически, так что среднее их значение равно нулю (оно отлично от нуля только ниже точки Кюри или Нееля). В спиновом стекле выше точки перехода моменты меняются во времени тоже беспорядочно, так что среднее их значение равно нулю (оно отлично от нуля только ниже точки Кюри или Нееля). В спиновом стекле выше точки перехода моменты меняются во времени тоже беспорядочно, так что среднее их значение равно нулю (оно отлично от нуля только ниже точки Кюри или Нееля).

рядочно, ну а ниже — они как бы застывают. При этом средние значения каждого из моментов отличны от нуля, но их ориентация хаотична, т. е. корреляция в направлениях моментов на больших расстояниях отсутствует, или, как говорят, в системе нет дальнего порядка. На малом же расстоянии ориентации моментов нельзя считать независимыми — они могут быть близки к наблюдаемым в ферромагнетиках. Если это расстояние  $r_c$ , называемое корреляционным расстоянием или радиу-

сами моментами. Дипольное взаимодействие двух моментов падает обратно пропорционально кубу расстояния между ними, а знак его зависит от ориентации моментов относительно мысленной оси, их соединяющей (рис. 2). Если моменты расположены в кристалле регулярно, это взаимодействие приводит к ферромагнитному или антиферромагнитному упорядочению в зависимости от типа пространственной решетки, образуемой моментами. Температура перехода к такому упорядочению по

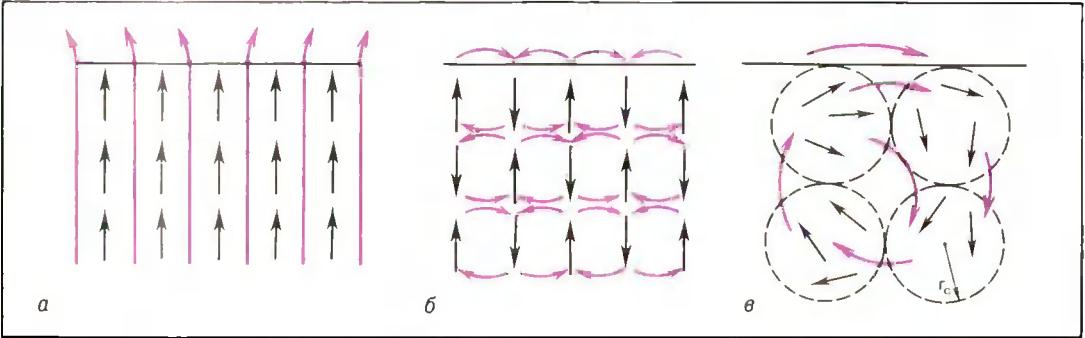


Рис. 1. Различные типы магнитного упорядочения: а — ферромагнитное; б — антиферромагнитное; в — спиновое стекло. Горизонтальными прямыми изображена поверхность образца, черными стрелками — направления магнитных моментов, цветными — силовыми линиями магнитного поля. В ферромагнетике силовые линии уходят далеко от поверхности образца, в антиферромагнетике переменное по направлению магнитное поле существует только в узкой области около поверхности, а в спиновом стекле ситуация промежуточная и приближается к одной из предельных в зависимости от размера областей когерентности  $r_c$ .

сом области когерентности моментов, порядка межатомного расстояния  $b$ , то спиновое стекло с точки зрения сосуществования магнетизма со сверхпроводимостью похоже на антиферромагнетики. При больших  $r_c$  ситуация напоминает существующую в ферромагнетиках (рис. 1в).

Чем же определяется тип магнитного упорядочения в конкретных металлах? Для ответа на этот вопрос необходимо учесть два механизма взаимодействия моментов, локализованных в узлах кристаллической решетки. Один из них — магнитное дипольное взаимодействие, пропорциональное произведению момента на напряженность магнитного поля, создаваемого дру-

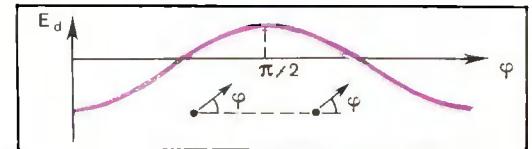


Рис. 2. Магнитное дипольное взаимодействие  $E_d$  двух параллельных моментов (показанных на рисунке стрелками) зависит от угла  $\varphi$  между ними и соединяющей их воображаемой осью, как  $[1 - 3\cos^2 \varphi]$ , и представляет собой знакопеременную функцию  $\varphi$ .

порядку величины равна  $\mu_B^2/b^3$  ( $\mu_B$  — магнетон Бора) и составляет около 1 К. При нерегулярном расположении в разных пар моментов магнитное дипольное взаимодействие хаотически меняет знак, его среднее (по углам сферической системы координат) значение обращается в нуль и возможно лишь упорядочение типа спинового стекла.

Кроме прямого магнитного дипольного взаимодействия в металле существует косвенное обменное взаимодействие моментов (через электроны проводимости). Оно ответственно за упорядочение локализованных моментов во всех металлах с температурой магнитного перехода выше

1 К. Чтобы понять его природу, необходимы дополнительные сведения об электронных состояниях в металлах.

В не сверхпроводящем (нормальном) состоянии электроны проводимости ведут себя как не взаимодействующие частицы с кинетической энергией  $E = p^2/2m$ , где  $p$  — импульс,  $m$  — масса электрона. Есть у электрона и еще одна характеристика — собственный момент количества движения, или спин  $\vec{\sigma}$ . Эта величина может принимать два значения, соответствующие про-

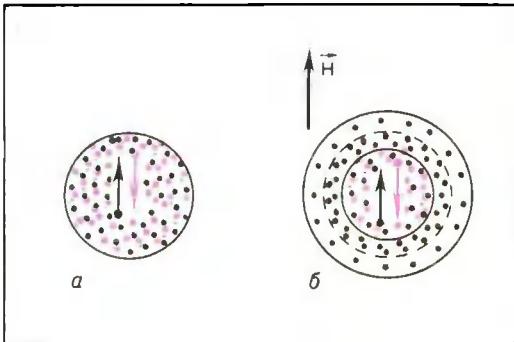


Рис. 3. Сфера Ферми для электронов проводимости в обычном (несверхпроводящем) металле и распределение электронов: а — без подмагничивающего поля; б — при наличии поля. Сплошные линии — границы распределения электронов (изображенных точками двух цветов) с различными направлениями спинов, указанными стрелками.

тивоположным направлениям вектора момента. В состоянии с данным импульсом и спином может находиться не более одного электрона. Это утверждение выражает суть знаменитого принципа Паули — одного из основных положений квантовой теории. Наименьшей энергии системы отвечает состояние, в котором все электроны обладают минимальной (с учетом принципа Паули) энергией. В прострстве импульсов этому состоянию соответствует заполненная электронами сфера, радиус которой определяется максимальным значением импульса в электронной системе (так называемым импульсом Ферми  $\vec{p}_F$ ) и зависит от концентрации электронов (рис. 3а). Саму сферу называю сферой Ферми. На ее поверхности (поверхности Ферми) энергия электронов максимальна  $E_F = p_F^2/2m$ . Обычно  $E_F$  составляет примерно  $10^4$  К. Все внешние поля, энергия взаимодействия которых

с электроном мала по сравнению с  $E_F$ , изменяют заполнение состояний лишь вблизи поверхности Ферми. Поэтому свойства металлов, обусловленные поведением электронов, в конечном итоге обусловлены именно этими состояниями.

Между локализованным в  $i$ -м узле кристаллической решетки моментом  $\vec{J}_i$  и электронами проводимости со спином  $\vec{\sigma}$  существует так называемое обменное взаимодействие  $|\vec{J}_i \cdot \vec{\sigma}|$ , где  $I$  — постоянный

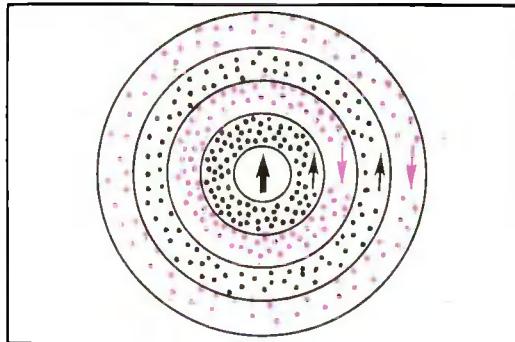


Рис. 4. Облако спиновой поляризации электронов проводимости около магнитного момента [жирная стрелка в центре]. Величина поляризации [плотность облака] падает по мере удаления от момента, а ее направление осциллирует в пространстве.

для данного вещества параметр. Для разных соединений  $I$  может быть положительным или отрицательным, а его абсолютная величина изменяется от 10 до 1000 К. Это взаимодействие стремится выстроить моменты решетки и спины электронов параллельно или антипараллельно в зависимости от знака  $I$ , иными словами, в магнитоупорядоченном состоянии обменное поле  $I \cdot \vec{J}_i$  «подмагничивает» спины электронов точно так же, как обычное магнитное поле. В отсутствие обменного поля все состояния внутри сферы Ферми заняты парами электронов с противоположно направленными спинами и полный спиновый момент в любой точке равен нулю. При наличии подмагничивающего поля состояния в узком слое вблизи поверхности Ферми оказываются занятыми электронами с одним направлением спина (вдоль поля) (рис. 3б). Эти электроны образуют вокруг

момента  $\vec{J}_i$  своего рода облако с упорядоченной ориентацией спинов. Плотность возникшего облака (его называют облаком спиновой поляризации) падает обратно пропорционально кубу расстояния до момента, а направление преимущественной ориентации спинов меняется в пространстве с периодом  $\hbar/2p_F$  ( $\hbar$  — постоянная Планка) (рис. 4). Облако поляризации, порожденное моментом  $\vec{J}_i$ , взаимодействует с моментами  $\vec{J}_k$ , расположенными в других узлах,

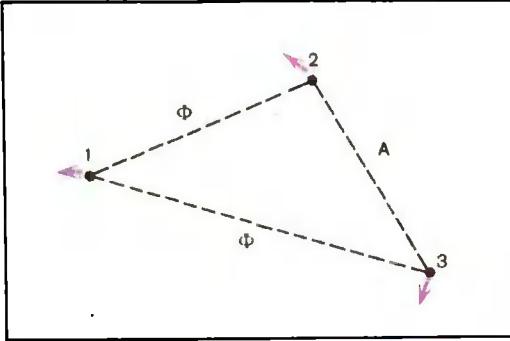


Рис. 5. Механизм магнитного упорядочения типа спинового стекла при нерегулярном расположении трех магнитных моментов. Взаимодействие между моментами 1, 2 и 1, 3 способствует их параллельной [Φ] ориентации, между моментами 2, 3 — антипараллельной [A]. Это объясняется знакопеременной зависимостью энергии обменного взаимодействия от расстояния между моментами. Минимум энергии не достигается ни для ферромагнитного [Φ], ни для антиферромагнитного [A] упорядочения, так как взаимодействия «мешают» друг другу. Поэтому в системе из многих нерегулярно расположенных моментов невозможно никакое упорядочение с дальним порядком.

причем энергия этого взаимодействия, пропорциональная  $I^2(\vec{J}_i \cdot \vec{J}_k)/E_F$ , меняет знак в зависимости от расстояния между узлами  $i$  и  $k$ .

В идеальном кристалле обменное взаимодействие приводит к ферромагнитному или антиферромагнитному упорядочению в зависимости от типа решетки, образуемой моментами, и величины  $p_F$ . Температура магнитного перехода, связанного с этим взаимодействием, лежит в интервале от 1 до 100 К. При нерегулярном расположении моментов из-за осциллирующего характера обменного взаимодействия устанавливается упорядочение типа спинового стекла (рис. 5).

При температурах ниже точки перехода металла в сверхпроводящее состояние ( $T_c$ ) становится существенным взаимодействие электронов с колебаниями кристаллической решетки (фононами). Оно приводит к эффективному притяжению между электронами, и в их движении выражаются корреляции. Наиболее сильно они выражены для электронов около поверхности Ферми, обладающих противоположными импульсами и спинами. В результате этого притяжения электроны в таких

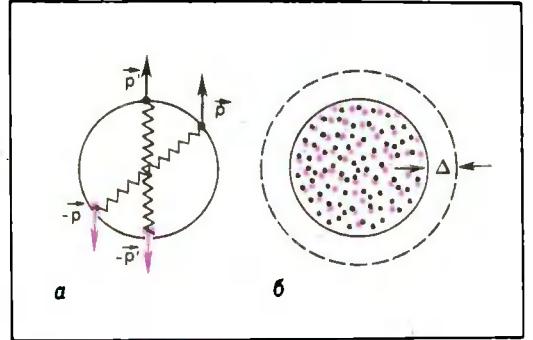


Рис. 6. Образование куперовских пар из электронов с противоположными импульсами и спинами [а]. Для разрыва такой пары нужно затратить энергию  $\Delta$ , иными словами, на поверхности Ферми для электронных возбуждений существует энергетическая щель шириной  $\Delta$  [б].

состояниях образуют так называемые куперовские пары (рис. 6а). Для разрыва пары нужно затратить энергию  $\Delta$ , величина которой возрастает от 0 (в точке  $T_c$ ) до значения порядка  $T_c$  при  $T=0$ . Другими словами, энергию электрона, связанного в куперовской паре, нельзя изменить на величину, меньшую  $\Delta$ , т. е. в энергетическом спектре электронов при  $T < T_c$  образуется щель, и система становится «жесткой» по отношению к внешним воздействиям (рис. 6б). В то же время все пары могут беспрепятственно двигаться как целое, и каждая из них переносит заряд  $2e$  ( $e$  — заряд электрона). Движение куперовских пар и представляет собой сверхпроводящий ток. Размер пар  $\xi \approx \hbar v_F / m \Delta$  называют также сверхпроводящей корреляционной длиной. Обычно  $\Delta \approx 10$  К и  $\xi \approx 10^3$  Å, так что пары велики по сравнению с межатомными расстояниями  $b \approx 1$  Å.

Способность сверхпроводника «выталкивать» магнитное поле связана с тем, что магнитное поле разрушает куперовские пары. Действительно, в магнитном поле  $\vec{H}$  на электроны действует сила Лоренца  $\vec{F} = (e/mc)[\vec{p} \cdot \vec{H}]$ . Импульсы электронов пары и, следовательно, действующие на них силы  $\vec{F}$  направлены в противоположные стороны, так что пара разрушается при определенном значении  $\vec{H}$  (рис. 7а). По принципу Ле Шателье система электронов реагирует на магнитное поле так, чтобы ослабить его влияние<sup>1</sup>. В данном случае куперовские пары под действием поля начинают двигаться и возникший в результате сверхпроводящий ток экранирует магнитное поле.

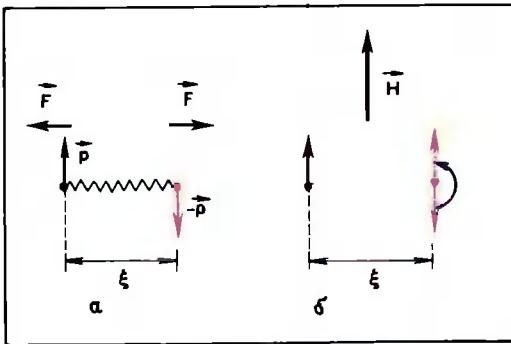


Рис. 7. Механизмы разрушения куперовской пары размером  $\xi$  магнитным полем  $H$ : а — под действием силы Лоренца  $F$  электроны с импульсами  $\vec{p}$  и  $-\vec{p}$  смещаются в противоположные стороны (направление  $H$  перпендикулярно плоскости рисунка); б — магнитное поле стремится выстроить спины электронов параллельно вектору  $H$ , тем самым также препятствуя куперовскому спариванию.

Кроме воздействия на орбитальное движение электрона (сила Лоренца) магнитное поле разрушает и спиновую структуру куперовской пары. Оно стремится выстроить спины электронов параллельно направлению поля (поляризует их), но такая ориентация непригодна для образова-

ния пары (рис. 7б). В свою очередь, спаривание мешает спинам электронов выстраиваться по полю.

Всякое ли магнитное поле одинаково влияет на сверхпроводимость? Нетрудно убедиться, что действие осциллирующего поля слабее, чем однородного, и падает с уменьшением отношения  $d/\xi$  ( $d$  — период осцилляций). При  $d/\xi \ll 1$  это влияние незначительно, ибо среднее значение поля на размерах куперовской пары мало. Таким образом, корреляционная длина  $\xi$  характеризует отклик системы на неоднородные внешние воздействия, и поля с периодом  $d \ll \xi$  слабо влияют на сверхпроводящее упорядочение.

Есть у величины  $\xi$  и другой важный смысл. Энергия неоднородного (например, за счет изменения концентрации пар в пространстве) сверхпроводящего состояния с характерным масштабом неоднородности  $d$  будет выше энергии однородного состояния на величину, растущую с увеличением отношения  $d/\xi$ . Поэтому параметр  $\xi$  определяет «жесткость» системы по отношению к появлению неоднородностей. Иными словами, чем больше  $\xi$ , тем слабее влияние на систему неоднородного поля с определенными значениями  $d$  и  $H$ .

Интересно сравнить сверхпроводящую корреляционную длину  $\xi$  с магнитной. Последняя определяется тем характерным масштабом, на котором меняется взаимодействие моментов. И для дипольного, и для обменного взаимодействия магнитных моментов этот масштаб порядка межатомного расстояния  $b$ . Таким образом, магнитное упорядочение значительно «мягче» сверхпроводящего. Ниже мы увидим, что соотношение корреляционных длин в основном и определяет возможность существования различных, на первый взгляд, взаимоисключающих типов упорядочения.

Не менее важна, конечно, и относительная «сила» конкурирующих эффектов. Она определяется энергией упорядочения. Для магнетизма эта величина составляет примерно  $3J^2$  в расчете на один момент, причем средний момент  $J$  возрастает от 0 при  $T = \theta$  до значения порядка единицы при  $T = 0$ . Выигрыш в энергии за счет сверхпроводящего спаривания в расчете на один электрон приблизительно равен  $\Delta^2/E_F \ll T_c^2/E_F$ , так как в образовании пар участвуют лишь электроны в слое  $\Delta$  около поверхности Ферми (их доля  $\Delta/E_F$  умножается на энергию спаривания  $\Delta$ ). В соединениях, рассмотренных ниже, концентрация магнитных моментов и

<sup>1</sup> По принципу Ле Шателье любое внешнее воздействие, выводящее систему из состояния равновесия, вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить результат такого воздействия. Этот принцип представляет собой следствие общего условия термодинамического равновесия (максимума энтропии).

электронов проводимости примерно одинакова. Поэтому энергия сверхпроводящего упорядочения в расчете на один магнитный момент намного меньше величины  $T_c$  и при  $T=0$  составляет около 0,01 К. Поэтому, даже если  $\theta < T_c$ , энергия магнитного упорядочения всюду, кроме окрестности точки  $\theta$ , существенно превышает энергию сверхпроводящего спаривания. Итак, практически всегда магнетизм «сильнее» сверхпроводимости, и он же отличается большей «мягкостью» по отноше-

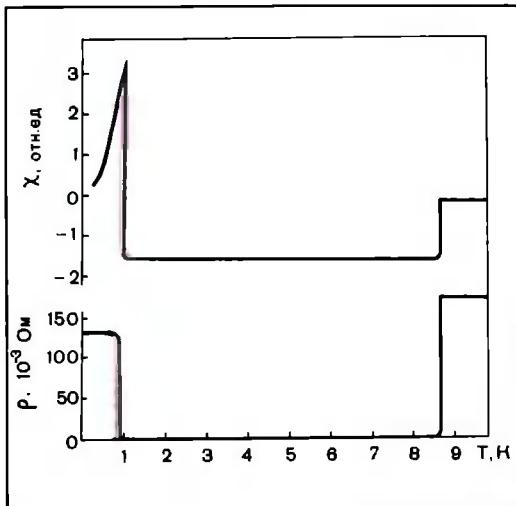


Рис. 8. Температурные зависимости магнитной восприимчивости  $\chi$  и удельного сопротивления  $\rho$  в сверхпроводнике  $\text{ErRh}_4\text{Si}$ . Ниже точки  $T_c = 8,6$  К сопротивление скачком исчезает и соединение становится сверхпроводящим идеальным диамагнетиком. В точке  $T_{c2} \approx 0,8$  К сопротивление восстанавливается, а восприимчивость становится положительной. Черные и цветные линии соответствуют охлаждению и нагреванию. Видно, что в точке  $T_{c2}$  есть гистерезис, характерный для фазовых переходов первого рода.

нию к появлению неоднородных состояний. Подобное сочетание характеристик вселяет надежду на возможность достижения желанного компромисса.

Теперь мы можем уяснить причину «антагонизма» между магнетизмом и сверхпроводимостью. Из анализа действия магнитного поля на сверхпроводимость следует, что в ферромагнетиках магнитное поле моментов разрушает сверхпроводимость из-за силы Лоренца и действия на спины. Кроме того, спаривание разрушает-

ся обменным взаимодействием, изменяющим ориентацию спинов. Сверхпроводимость тоже «не остается в долгу». Она экранирует поле, способствующее выстраиванию моментов в ферромагнетике, тем самым понижая температуру магнитного перехода и энергию упорядочения. Спаривание уменьшает и обменное взаимодействие моментов, формируя щель и ослабляя таким образом поляризуемость системы подмагничивающим полем.

Что же касается взаимного влияния сверхпроводимости и антиферромагнетизма, оно невелико. Действительно, в масштабах куперовских пар магнитное поле и обменное подмагничивающее поле в антиферромагнетике меняются очень быстро, и средние значения этих параметров малы (рис. 8). Такие поля не разрушают спаривания. Но тогда из принципа Ле Шателье вытекает, что и сверхпроводимость практически не экранирует поле, быстро меняющееся в пространстве, так что антиферромагнетизм и сверхпроводимость могут «мирно сосуществовать» в одном кристалле. Эти соображения подсказывают, в каком направлении следует искать компромисс и в случае ферромагнетизма.

#### НЕОДНОРОДНАЯ СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Уточним теперь постановку вопроса о сосуществовании ферромагнетизма и сверхпроводимости. Для этого рассмотрим металл с регулярным расположением магнитных моментов и предположим, что без спаривания ферромагнитное упорядочение моментов наступает при  $T \leq \theta$ , а при полном их разупорядочении металл переходит в сверхпроводящее состояние в точке  $T_c$ . Спрашивается, может ли сверхпроводимость появиться в ферромагнитной фазе, если  $T_c < \theta$ , либо ферромагнетизм в сверхпроводящей при  $\theta < T_c$ ?

Ответ на первый вопрос заведомо отрицателен, поскольку ниже точки Кюри энергия магнитного упорядочения очень велика по сравнению с возможным выигрышем от сверхпроводящего упорядочения.

Второй случай интереснее — ферромагнетизм должен появиться в сверхпроводящей фазе при  $\theta < T_c$ . Хотя вблизи точки Кюри магнетизм и «слабее» сверхпроводимости, его «выручает» способность к образованию неоднородных структур.

В 1959 г. американские ученые П. Андерсон и Г. Сул указали на возможность компромисса в этой ситуации, исследовав

модель, учитывающую только обменное взаимодействие. В такой модели ферромагнетизм возникает за счет поляризуемости системы электронов однородным обменным полем. Но из-за образующейся при спаривании энергетической щели поляризуемость значительно уменьшается, в результате чего ферромагнитное упорядочение становится энергетически невыгодным. Выше, однако, уже отмечалось, что влияние спаривания на поляризуемость электронов осциллирующим полем гораздо слабее. Если период осцилляций  $d \ll \xi$ , то разность поляризуемостей сверхпроводящего и нормального состояний мала и пропорциональна  $d/\xi$ . Другими словами, сверхпроводимость как своеобразный фильтр «пропускает» лишь неоднородное намагничивание, но не ферромагнетизм.

Но выгодно ли энергетически при  $T \approx \approx \theta$  образование осциллирующего по направлению магнитного упорядочения вместо ферромагнитного? По предположению, в нормальном (несверхпроводящем) состоянии наступает ферромагнитное упорядочение, а формирование неоднородных структур с периодом  $d \gg b$  не исключено, но лишь при температурах, меньших  $\theta$  на величину, примерно равную  $\theta(b/d)^2$ . При  $b \ll d \ll \xi$  поляризуемость может быть достаточно большой, а температура магнитного упорядочения не слишком малой.

Следовательно, чтобы пройти через «фильтр» сверхпроводимости, ферромагнетизм должен превратиться в неоднородное упорядочение, и энергетически это обходится для него сравнительно недорого. Такую модифицированную магнитную структуру Андерсон и Сул назвали криптоферромагнитной (крипто — скрытый). Проведенные ими расчеты показали, что чуть ниже точки Кюри должно появиться неоднородное осциллирующее магнитное упорядочение с периодом  $d \approx (b^2 \xi)^{1/3}$ . Ясно, что сосуществование сверхпроводимости и неоднородного магнитного упорядочения может сохраниться и при температурах заметно ниже точки Кюри, где амплитуда осциллирующего обменного поля уже не мала. Последующие работы подтвердили вывод о появлении неоднородной магнитной структуры взамен ферромагнетизма при  $\theta < T_c$  и для магнитного дипольного взаимодействия<sup>2</sup>.

## МАГНЕТИЗМ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В РЕАЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Экспериментальные исследования магнитных сверхпроводников начались в 1958 г. С этой целью в сверхпроводящие соединения вводили примесные ионы, обладающие магнитными моментами. Однако магнитное упорядочение с дальним порядком в таких системах не наблюдалось. Позднее стало ясно, что в этих случаях возникает упорядочение типа спинового стекла. Для исследования проблемы сосуществования сверхпроводимости и дальнего магнитного порядка нужны были сверхпроводники с регулярным расположением магнитных ионов. Такие кристаллы удалось получить в 1976 г. на базе тройных соединений типа  $REMo_6S_8$ ,  $REMo_6Se_8$  и  $RERh_4B_4$  ( $RE$  — редкоземельные магнитные ионы:  $Er$ ,  $Dy$ ,  $Ho$  и т. п.). Для этих соединений характерны температуры сверхпроводящего перехода от 2 до 10 К и очень низкие температуры магнитного перехода (от 5 до 0,5 К), что объясняется малым вкладом обменного взаимодействия из-за хорошего пространственного разделения магнитных ионов и электронов проводимости. Дело в том, что электроны в тройных соединениях движутся в основном по компактным группам атомов (кластерам)  $Mo_6S_8$ ,  $Mo_6Se_8$  или  $Rh_4B_4$ , а магнитные ионы  $RE$  находятся как бы в стороне. Поэтому параметр  $I$  в этих соединениях оказывается весьма малым (от 20 до 70 К). Именно это обстоятельство и способствует сосуществованию магнетизма и сверхпроводимости в тройных соединениях.

В большинстве таких соединений обнаружено антиферромагнитное упорядочение с точкой Нееля  $T_N \ll T_c$ . Эксперименты подтвердили теоретические предсказания о слабом взаимодействии между сверхпроводимостью и антиферромагнетизмом.

Поведение ферромагнитных сверхпроводников совершенно иное. Так, например, соединение  $ErRh_4B_4$  в точке  $T_c = 8,7$  К переходит в сверхпроводящее состояние, а при  $T = 0,9$  К по аномалии теплоемкости и рассеянию нейтронов в нем обнаружен переход к неоднородному магнитному упорядочению с периодом  $d \approx 100$  Å. В точке  $T_{c2} = 0,8$  К скачком исчезает сверхпроводимость и наблюдается возврат в нормальное ферромагнитное состояние (рис. 8). В  $HoMo_6Se_8$  обратный переход отсутствует вплоть до самых низких температур.

Эти экспериментальные факты под-

<sup>2</sup> В этом случае существенной оказывается малость магнитной корреляционной длины  $b$  по сравнению с глубиной проникновения в сверхпроводник магнитного поля.

тверждают вывод о появлении неоднородного магнитного упорядочения в сверхпроводящем состоянии. Но какова магнитная структура в фазе сосуществования, чем отличаются сверхпроводящие свойства этой фазы, при каких условиях она устойчива по отношению к переходу в нормальную ферромагнитную? Пока эксперимент не дает однозначного ответа на эти вопросы, ибо кристаллическая структура образцов еще несовершенна (кроме  $\text{ErRh}_4\text{B}_4$ , все они получены только в виде поликристаллов). Поэтому сейчас поиск ответов приходится ограничить рамками теоретических исследований.

### ФАЗА СОСУЩЕСТВОВАНИЯ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Теоретическому рассмотрению ферромагнитных сверхпроводников с учетом дипольного и обменного взаимодействий, а также магнитной анизотропии кристаллов посвящено уже немало работ<sup>3</sup>. В реальных магнитных сверхпроводниках теория предсказывает в фазе сосуществования только один тип магнитного упорядочения — одномерную поперечную доменную структуру (рис. 9), соответствующую минимуму энергии электронов и магнитных моментов. Действительно, для уменьшения взаимовлияния сверхпроводимости и магнетизма необходимо, чтобы направление обменного поля менялось в пространстве. В то же время энергетически выгодна ориентация магнитных моментов вдоль так называемой оси легкого намагничивания. Компромисс достигается за счет того, что направления моментов резко изменяются лишь в доменных стенках, а в основном объеме образца (внутри доменов) моменты направлены вдоль упомянутой оси. По оценкам, период доменной структуры  $d \approx \approx (b\xi)^{1/2}$ , толщина стенки (в рассматриваемых соединениях с сильной магнитной анизотропией) равна примерно  $b$  и значительно меньше толщины самих доменов.

Подчеркнем, что такая структура необходима для уменьшения энергии взаимодействия сверхпроводимости и магнетизма, а не энергии магнитного поля рассеяния (поля вне образца), как в обычных фер-

ромагнетиках. Поскольку сверхпроводимость — эффект объемный, а поле рассеяния — поверхностный, толщина доменов в этом случае намного меньше, чем в обычных ферромагнетиках.

Магнитная структура, даже неоднородная, все же влияет на спаривание. При  $T < \theta$  с понижением температуры среднее значение моментов и обменное поле растут, уменьшая величину щели  $\Delta$ . При этом сверхпроводящее упорядочение остается практически однородным, ибо толщина доменов мала по сравнению с размерами

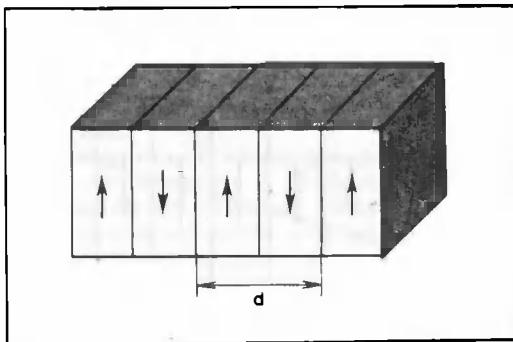


Рис. 9. Доменная магнитная структура фазы сосуществования [для одноосных ферромагнетиков]. Стрелки показывают направление магнитных моментов внутри доменов — вдоль легкой оси намагничивания. Направление пространственного изменения моментов перпендикулярно направлению самих моментов, т. е. структура поперечна. Толщина доменов равна половине периода структуры  $d$  и велика по сравнению с толщиной доменной стенки, близкой к межатомному расстоянию.

куперовских пар, так что сверхпроводимость «не замечает» структуры обменного поля. В чистых сверхпроводниках (без примесей), где электроны двигаются прямолинейно, величина щели зависит от ориентации их траекторий относительно доменных стенок. Электроны, перемещающиеся вдоль домена, все время «чувствуют» однородное обменное поле  $|\vec{J}|$ , и при  $|\vec{J}| > T_c$  спаривание и щель для таких электронов отсутствуют, тогда как для электронов, траектории которых пересекают домены, среднее обменное поле на длине  $\xi$  мало. Оно не разрушает пары, образованные такими электронами, и именно эти пары поддерживают сверхпроводящие свойства системы электронов — незатухающий ток и выталкивание магнитного поля

<sup>3</sup> Bulaevskii L. N., Rusinov A. I., Kubic M. L.— J. Low Temp. Phys., 1980, v. 39, p. 256; Bulaevskii L. N., Buzdin A. I., Panjukov S. V., Kubic M. L.— Phys. Rev., 1983, v. B28, p. 1370; Bulaevskii L. N., Panjukov S. V.— J. Low Temp. Phys., 1983, v. 52, p. 137.

(рис. 10). Таким образом, в чистых соединениях сверхпроводимость имеет бесщелевой характер<sup>4</sup>.

В сверхпроводниках с примесями траектории электронов изломаны из-за рассеяния на примесях и пересекают домены, так что бесщелевая сверхпроводимость в таких сверхпроводниках невозможна.

Итак, при  $T < \theta$  ферромагнетизм в сверхпроводнике не может возникнуть в обычном «облике» и образуется неодно-

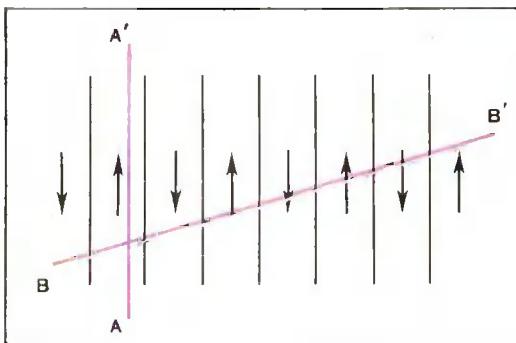


Рис. 10. Происхождение бесщелевой сверхпроводимости в фазе сосуществования для чистых ферромагнитных сверхпроводников. Куперовская пара, движущаяся по траектории AA', «чувствует» постоянное в пространстве обменное поле  $I \cdot J$ , и при  $I \cdot J > T_c$  оно разрушает пару. Вдоль траектории BB' это поле меняется по направлению, и магнитная структура оказывает слабое влияние на сверхпроводимость. Таких траекторий большинство, и именно они поддерживают сверхпроводящее упорядочение в фазе сосуществования.

родное магнитное упорядочение. При уменьшении температуры ниже точки Кюри оно быстро принимает вид криптоферромагнитной доменной структуры, сохраняющейся вплоть до точки  $T_{c2}$  перехода в нормальную ферромагнитную фазу (если он имеет место).

<sup>4</sup> Бесщелевая сверхпроводимость предсказана А. А. Абрикосовым и Л. П. Горьковым для сверхпроводников с магнитными примесями. Магнитные сверхпроводники с доменной структурой — второй пример систем со сверхпроводимостью такого типа.

На первый взгляд, эта структура сильно отличается от ферромагнитной и более сходна с антиферромагнитной — ведь на ее периоде  $d$  среднее значение магнитного момента равно нулю (рис. 11). Однако относительное изменение магнитной энергии и других параметров доменной структуры по сравнению с ферромагнитным состоянием порядка  $b/d \approx (b/\xi)^{1/2} \ll 1$ , так что магнетизм «жертвует» во имя сосуществования очень немногим. В то же время «жесткая» и «слабая» сверхпрово-

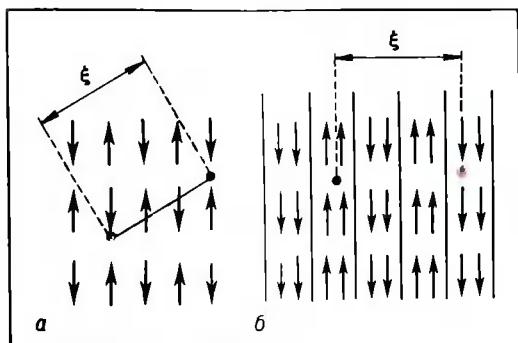


Рис. 11. В масштабах куперовских пар среднее магнитное поле в антиферромагнетике [а] и криптоферромагнитной доменной структуре [б] мало и не разрушает сверхпроводимость.

димость «теряет» намного больше. Если параметр  $I > T_c$ , то сверхпроводящая энергия и щель уменьшаются в несколько раз при охлаждении от точки  $\theta$  до точки  $T_{c2}$ , а в чистых кристаллах сверхпроводимость и вовсе становится бесщелевой.

Нам осталось рассмотреть вопрос о переходе от фазы сосуществования к нормальной ферромагнитной структуре. Он происходит, если свободная энергия при обычном ферромагнитном упорядочении меньше, чем в этой фазе. Различие этих энергий определяется суммой положительной энергии доменных стенок, положительной энергии взаимодействия сверхпроводящего и магнитного упорядочения и отрицательной энергии сверхпроводящего упорядочения. Именно за счет последнего слабого фазы сосуществования в определенных условиях оказывается энергетиче-

ски выгодней нормальной ферромагнитной. При понижении температуры среднее значение момента и вместе с ним первые два слагаемых растут. Переход в ферромагнитное состояние становится неизбежным, если энергетический выигрыш от сверхпроводящего спаривания не может компенсировать увеличение энергии системы из-за образования доменных стенок и взаимодействия конкурирующих типов упорядочения. Как следует из расчетов, это происходит, когда параметр обменной энергии  $I$  превышает критическое значение  $I_c \approx T_c(\xi/b)^{1/3}$  в чистых сверхпроводниках и  $T_c(\xi/b)^{1/4}$  в кристаллах с большим количеством дефектов. Например, в  $\text{HoMo}_6\text{S}_8$  величина  $T_c$  мала (1,8 K), условие  $I > I_c$  выполнено здесь с большим запасом, и точка  $T_{c2}$  близка к точке Кюри  $\Theta$ , так что переход происходит вблизи этой точки. В то же время в  $\text{HoMo}_6\text{Se}_8$  фаза сосуществования сохраняется при самых низких температурах из-за довольно большой величины  $T_c$  (5,5 K) и сравнительно малого значения параметра обменной энергии  $I$ .

Мы видим теперь, что вся сложная структура этой фазы держится на малой энергии сверхпроводящего упорядочения (так, в  $\text{HoMo}_6\text{S}_8$  эта энергия составляет всего около 0,002 K на один ион Ho). Поэтому даже небольшие нарушения в более сильном магнитном упорядочении сразу же ликвидируют фазу сосуществования, компромисс становится невозможным, и при охлаждении около точки  $\Theta$  наблюдается скачок из немагнитной сверхпроводящей фазы в ферромагнитную нормальную. По той же причине доменная структура в фазе сосуществования невозможна в спиновых стеклах.

Для дальнейшего исследования этой фазы нужны совершенные кристаллы, проблема синтеза которых пока не решена.

\*

С познавательной точки зрения рассмотренная нами проблема интересна тем, что на заданный в начале статьи вопрос — допустимо ли одновременное существование ферромагнетизма и сверхпроводимости — по существу нельзя ответить ни утвердительно, ни отрицательно. Действительно, фаза сосуществования есть, но оба типа упорядочения в ней модифицированы, и мы не имеем права утверждать, что какое-либо вещество обладает и ферромагнитными, и сверхпроводящими свойствами.

Наш анализ показывает, что компромисс двух конкурирующих типов упорядочения возможен лишь в том случае, когда они характеризуются разной «жесткостью». Неоднородным при этом становится более «мягкое» упорядочение и оно же меньше «теряет» в количественном отношении.

Для физики твердого тела фаза сосуществования имеет большое значение, позволяя исследовать ферромагнетики с огромной концентрацией доменов и доменных стенок. Процесс их рождения и движения при низких температурах оказывается чрезвычайно медленным, и соответствующее время установления равновесия достигает десятков часов. О кинетике таких процессов известно пока очень мало, и их изучение важно для понимания магнитных свойств вещества при низких температурах.

Магнитные сверхпроводники позволяют лучше понять и особенности сверхпроводимости в сильных обменных полях, влияющих в основном на спиновую структуру куперовских пар. Ранее такой экспериментальной возможности не существовало, так как в обычных сверхпроводниках влияние магнитного поля определяется преимущественно силой Лоренца.

Из сказанного ясно, почему магнитные сверхпроводники привлекают к себе пристальное внимание физиков, занимающихся исследованием магнетизма и сверхпроводимости. И хотя в объяснении свойств магнитных сверхпроводников достигнуты определенные успехи, можно с уверенностью сказать, что их изучение еще только начинается. Следующий крупный шаг будет, несомненно, сделан после синтеза совершенных монокристаллов, на которых предстоит всесторонне исследовать свойства фазы сосуществования.

## Жидкий гелий в науке и технике

А. Б. Фрадков



Абрам Борисович Фрадков, доктор технических наук, заведующий криогенным отделом Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР. Область научных интересов — физика низких температур и криогенная техника. Лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

Среди множества веществ, с которыми связана человеческая деятельность, особое место занимает жидкий гелий. Обладая удивительными физическими свойствами, гелий сам по себе представляет интереснейший объект для научных исследований, расширяющих наши познания фундаментальных законов природы. Но выделенное положение жидкого гелия среди других веществ определяется, в первую очередь, его многочисленными применениями.

Жидкий гелий — одно из главных, а в некоторых случаях единственное рабочее вещество для получения низких (криогенных) температур, значение и масштабы использования которых в современной науке и технике непрерывно и быстро возрастают.

Интерес исследователя к криогенным температурам (согласно принятой сейчас классификации, к ним относятся температуры ниже 120 К) связан с их сильнейшими воздействиями на свойства вещества, а также с возможностью обнаружения новых явлений, скрытых при более высоких температурах тепловым движением молекул. Область криогенных температур очень обширна. Действительно, температура на поверхности Солнца, примерно равная 6000 К, по абсолютной шкале всего лишь в 20 раз выше комнатной (300 К), в то время как с помощью жидкого гелия сравнительно

просто получают температуру около 1 К, что в 300 раз ниже комнатной. А во многих криогенных лабораториях исследования ведутся при температурах порядка 0,3 К, т. е. в тысячу раз ниже комнатной. При таком значительном понижении температуры проявляются новые, специфические свойства вещества, что неоднократно подтверждалось в экспериментах.

Криогенные температуры обеспечивают работоспособность квантовых усилителей и генераторов (мазеров и лазеров), во много раз повышают чувствительность приемников излучения, электронных и других приборов, помогают получать сверхвысокий вакуум, очищать различные вещества, разделять изотопы и газовые смеси, имитировать на Земле космические условия и т. д. и т. п. Способность криогенных температур замедлять химические и биологические реакции все шире используется в медицине, пищевой промышленности, технологиях многих производств.

Из всех известных низкотемпературных явлений наиболее значительное по своим применениям — сверхпроводимость, открытая Х. Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Возможности использования сверхпроводимости столь многочисленны, что даже простое перечисление их в журнальной статье затруднительно. Поэтому упомянем только основные направления, по которым сейчас

ведутся интенсивные разработки и получены практические результаты, к ним относится получение сверхсильных магнитных полей с напряженностью 100 кЭ и более, необходимых для установок термоядерного синтеза, МГД-генераторов, разнообразных приборов и устройств ядерной физики, а также для решения ряда других крупных научно-технических проблем. Огромные надежды связываются с созданием сверхпроводящих линий электропередач, высокоэффективных мощных электрогенераторов со сверхпроводящими обмотками, быстродействующих ЭВМ, приборов высочайшей чувствительности и многих других сверхпроводящих устройств.

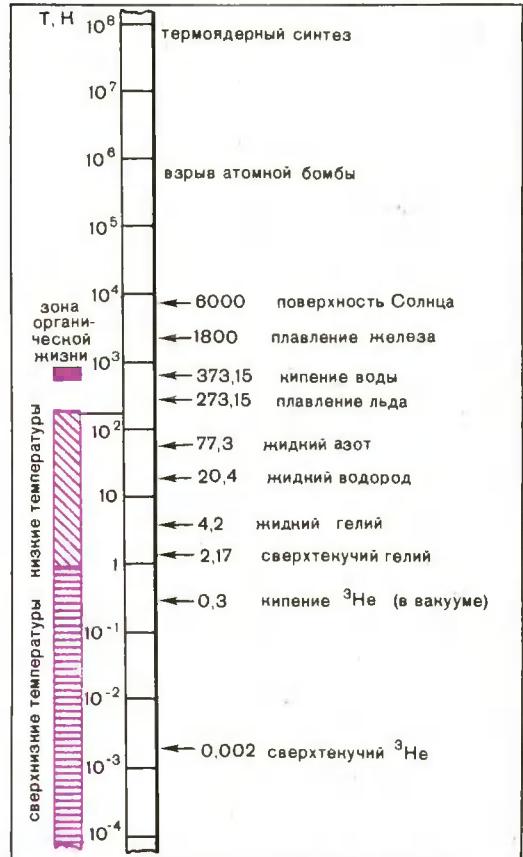
Хотя уже получены материалы, переходящие в сверхпроводящее состояние при температурах жидкого водорода (20—23 К), практически сверхпроводящие устройства работают в настоящее время только при гелиевых температурах.

Возможности, которые жидкий гелий дает для изучения свойств различных веществ при низких температурах, а также для использования сверхпроводимости, привлекают к нему внимание все более широких кругов исследователей и инженеров — работников самых разнообразных специальностей. Поэтому целесообразно осветить современное состояние проблемы получения и использования жидкого гелия. Но сначала кратко остановимся на его свойствах<sup>1</sup>.

### СВОЙСТВА ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

Обычно, говоря о гелии, подразумевают более распространенный в природе изотоп  ${}^4\text{He}$ . В атмосферном воздухе его содержится (по объему)  $5,2 \cdot 10^{-4} \%$ . Гелий обладает самой низкой температурой кипения из всех элементов таблицы Менделеева и остается в жидком состоянии, не затвердевая, под давлением собственных паров вплоть до абсолютного нуля. При атмосферном давлении температура кипения жидкого гелия примерно равна 4,2 К и понижается с уменьшением давления, как у всякой обычной жидкости. Удельная теплота его испарения составляет всего-навсего 0,6 ккал/л. Необычные свойства жидкий  ${}^4\text{He}$  приобретает при температуре  $T_\lambda = 2,17$  К, когда он переходит в так

называемое сверхтекучее состояние, открытое П. Л. Капицей в 1938 г. Этот переход принято называть  $\lambda$ -переходом (по виду кривой, изображающей зависимость теплоемкости от температуры, которая напоминает греческую букву «лямбда»), а температуру  $T_\lambda$  —  $\lambda$ -точкой. Чтобы подчеркнуть отличия в свойствах обычного и сверхтекучего гелия, состояния при температурах выше  $T_\lambda$  обозначают HeI, ниже — HeII. Свойства HeI во многом похожи на свойства обычных жидкостей, тогда как HeII представляет собой яркий пример квантовой



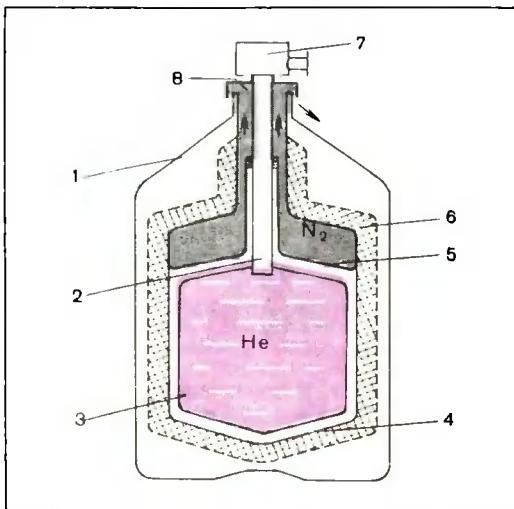
Температурная шкала с логарифмическим масштабом. На рисунке отмечены характерные температуры некоторых физических объектов и процессов.

жидкости и обладает рядом особенностей, резко отличающих его от классических жидкостей. Теоретическое объяснение основных свойств HeII дал в 1941 г. Л. Д. Ландау в своей феноменологической теории

<sup>1</sup> О свойствах жидкого гелия и способах получения низких температур рассказывается также в статье: Цакадзе Д. С. Сверхтекучесть в природе. — Природа, 1984, № 2, с. 3.

сверхтекучести, но кое-что в поведении этой загадочной жидкости остается неясным до сих пор<sup>2</sup>.

При использовании HeII в качестве охлаждающего вещества (хладоагента) важную роль играет тонкая (около  $3 \cdot 10^{-6}$  см) пленка сверхтекучего гелия, которая непрерывно поднимается по стенкам сосуда, достигает зоны высоких температур и испаряется, увеличивая таким образом потери гелия и ухудшая существующий в системе вакуум. Именно эта пленка затрудняет откачку паров жидкого HeII и его использо-



Сечение лабораторного сосуда для хранения и перевозки жидкого гелия. Внутри корпуса 1 на тонкостенной трубке-горловине 2 из нержавеющей стали подвешен резервуар 3 для жидкого гелия, окруженный со всех сторон охлаждаемым жидким азотом экраном 4 из меди. Жидкий азот периодически заливается в ванну 5. Чтобы уменьшить испарение азота, экран и ванна покрываются теплоизоляцией 6, состоящей из чередующихся тонких слоев стеклоткани и алюминиевой фольги. В полости между корпусом и резервуаром 3 создается глубокий вакуум. Заливают и сливают жидкий гелий, а также выпускают испаряющийся газ через специальную аппаратурную головку 7 с патрубком для отвода газообразного гелия. Заполнение ванны 5 жидким азотом производится через отдельную горловину 8.

вание для получения температур ниже 1 К.

Благодаря огромной теплопроводности HeII оказывается весьма эффективной теплообменной средой и все чаще применяется для получения низких температур в самых различных областях науки

и техники. При обращении с ним, однако, необходимо учитывать ряд довольно тонких эффектов<sup>3</sup>.

Помимо <sup>4</sup>He имеется еще стабильный изотоп гелия — <sup>3</sup>He, встречающийся в природе крайне редко (на  $10^8$  атомов <sup>4</sup>He приходится в среднем один атом <sup>3</sup>He). Его получают главным образом в ядерных реакциях. При атмосферном давлении жидкий гелий <sup>3</sup>He кипит при 3,2 К и становится сверхтекучим при температурах ниже 0,003 К. Откачкой паров <sup>3</sup>He получают температуру до 0,3 К, т. е. гораздо ниже, чем с помощью <sup>4</sup>He.

### ПОЛУЧЕНИЕ И СЖИЖЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ГЕЛИЯ

Для промышленного производства газообразного гелия используют природные газы, которые служат также топливом и сырьем для других технических нужд. Обычно содержание гелия в природных газах невелико (0,1—0,15 %). Месторождения природного газа с содержанием гелия более 0,4 % считаются богатыми, но встречаются они редко.

Из-за малой концентрации гелия в исходном сырье извлечение его обходится дорого, так что цена газообразного гелия довольно высока — 5—10 руб. за 1 м<sup>3</sup> (в зависимости от чистоты). Поэтому образующийся при использовании жидкого гелия газ не выпускают в атмосферу, а собирают и направляют на повторное ожижение. Из-за чрезвычайно низкой критической температуры ( $T_{кр} = 5,26$  К) получить жидкий гелий весьма нелегко<sup>4</sup>. В этом смысле он представляет собой самый «неподатливый» из всех газов. Все же в 1908 г. жидкий гелий удалось получить Х. Камерлинг-Оннесу, впоследствии удостоенному Нобелевской премии.

В промышленных масштабах для ожижения газов с низкими температурами кипения (помимо гелия к ним относятся водород, азот, кислород и некоторые другие) в наши дни, как и раньше, наиболее эффективным остается понижение темпе-

<sup>2</sup> О теории Ландау см., напр.: Пятаевский Л. П. Макроскопические квантовые явления. — Природа, 1980, № 4, с. 40.

<sup>3</sup> Здесь подразумевается так называемый температурный скачок Капицы (различие температур жидкого гелия и стенок содержащего его сосуда), зависимость теплового потока от глубины погружения и размера образца, своеобразные механизмы кипения жидкого гелия и т. п.

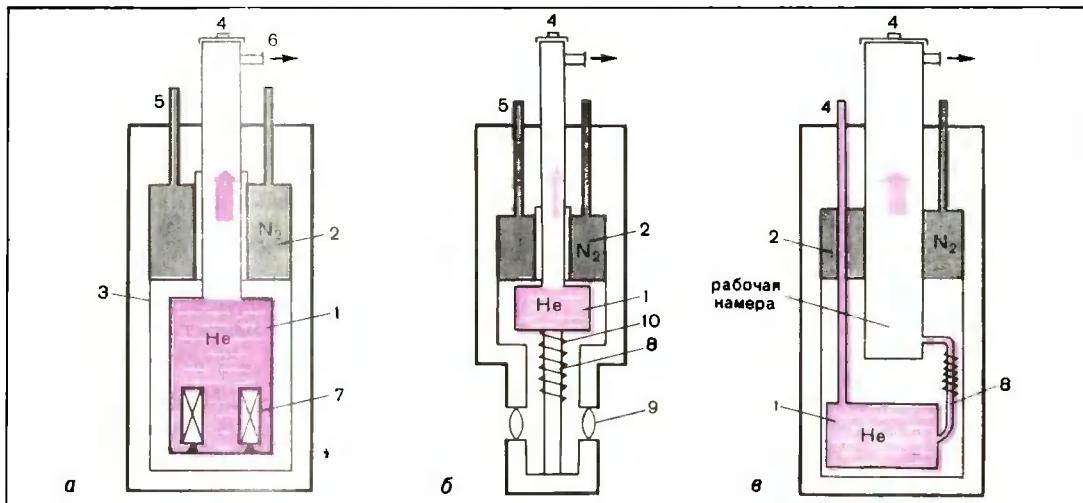
<sup>4</sup> Под критической температурой здесь понимается максимальная температура, при которой газ еще можно перевести в жидкое состояние.

ратуры за счет расширения предварительно сжатого газа. Технически это осуществляют, как правило, пропуская газ через сужение (такой метод получил название дросселирования) или же заставляя его производить внешнюю работу в специальной расширительной машине — детандере. Последний метод, с точки зрения термодинамики, более выгоден и широко применяется в современных установках для получения жидкого гелия. Теоретически минимальная работа, необходимая для сжижения гелия, составляет  $1,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$ . Прак-

поставки) колеблется от 2 до 10 долл. за литр. Следует иметь в виду, что техника сжижения достигла уже достаточно высокого уровня и в цене жидкого гелия основная часть принадлежит именно стоимости газа<sup>5</sup>.

### ХРАНЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

Как уже упоминалось, наряду с низкой температурой кипения жидкий гелий отличается еще и крайне малой теплотой



Схемы гелиевых криостатов (а — для радиотехнических и электромагнитных исследований; б — для оптических исследований; в — для охлаждения исследуемых образцов газом): 1 — резервуар с жидким гелием; 2 — азотная ванна; 3 — радиационный теплоизолирующий экран; 4 — горловина для заливки жидкого азота; 5 — горловина для заливки жидкого гелия; 6 — патрубок для отвода газообразного гелия; 7 — сверхпроводящий электромагнит; 8 — холодопровод; 9 — оптическое окно; 10 — нагреватель.

тически же затраты энергии, зависящие, в частности, и от размера установки, достигают  $20\text{—}30 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$ .

Установки для сжижения гелия, серийно выпускаемые зарубежными промышленными фирмами, имеют производительность от нескольких десятков до сотен литров в час. (В СССР наибольшее распространение получила установка КГУ 150/4,5, сжижающая в час  $40\text{—}45$  литров гелия.) Наряду с такими установками фирмы производят на продажу и сам жидкий гелий. В США, например, его стоимость (в зависимости от объема и дальности

испарения — всего  $0,6 \text{ ккал/л}$ , т. е. почти в 900 раз меньше, чем у воды. (Миниатюрная электрическая лампочка мощностью 2 Вт испаряет за час около 3 литров жидкого гелия.) Поэтому сосуд для хранения жидкого гелия следует хорошо изолировать от всех притоков тепла из окружающей среды. Чтобы в сосуде емкостью  $10\text{—}20$  литров жидкий гелий хранился в течение  $1\text{—}2$  месяцев, тепловой поток через изоляцию не должен превышать тысячных долей ватта.

В физике и технике низких температур для хранения и транспортировки жидкого азота и других сжиженных газов применяют преимущественно сосуды Дьюара с двойными стенками, между которыми поддерживается глубокий вакуум, обеспечивающий необходимую теплоизоляцию. Однако для хранения жидкого гелия такие сосуды совершенно непригодны, ибо даже

<sup>5</sup> Литр жидкого гелия получается примерно из 720 литров газообразного гелия.

при высоком разрежении между стенками поток тепла в результате излучения наружной стенкой сосуда, соприкасающейся с окружающей средой, в сотни раз превосходит допустимую величину. Поэтому приходится использовать особые сосуды, в которых емкость с жидким гелием окружена специальным радиационным экраном, охлаждаемым каким-либо хладагентом, как правило, жидким азотом. Так как интенсивность теплового излучения пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры излучающего тела, применение экранов, охлаждаемых жидким азотом, уменьшает приток тепла к жидкому гелию за счет излучения в 200—250 раз.

Наша промышленность выпускает такие сосуды емкостью в 10, 25 и 40 литров, в которых жидкий гелий может храниться до 3 месяцев (т. е. за сутки испаряется около 1%). Жидкий азот в них заливают 1 раз в неделю. Для перевозки подобных сосудов пригоден любой транспорт, в том числе и авиация, поскольку головка сосуда снабжена клапаном, поддерживающим над жидким гелием давление в 1 атм независимо от давления снаружи.

Из-за низкой температуры кипения и очень малой теплоты испарения долговременное хранение жидкого гелия даже в лабораторных условиях представляет собой весьма трудную задачу. Ее удалось решить только в конце 50-х годов, т. е. примерно через полстолетия после получения жидкого гелия.

Еще более сложно обеспечить сохранение жидкого гелия в условиях космического полета, так как при этом наблюдается целый ряд дополнительных трудностей, отсутствующих на Земле.

Эта проблема возникла сравнительно недавно в связи с бурным развитием космических исследований и необходимостью поддержания гелиевых температур, требуемых для нормальной работы некоторых устройств, находящихся на борту космических летательных аппаратов. Основная трудность обусловлена невесомостью и связанной с ней неопределенностью границы раздела жидкой и газообразной фаз, так что отделить пар от жидкости становится довольно трудно. Помимо этого приходится учитывать непрерывное изменение положения сосуда в пространстве и возможность появления ускорений, направленных под любым углом к его оси, что может привести к выбросу жидкости; большие нагрузки на активном участке траектории и ряд других неприятных факторов.

Проблема долговременного хранения жидкого гелия в космосе была решена

в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР в середине 70-х годов. Отличительная особенность космических сосудов для жидкого гелия — наличие так называемого разделителя фаз, препятствующего выбросу жидкого гелия из занимаемого им объема (при свободном выходе пара) независимо от ориентации сосуда в пространстве. Имеются и другие особенности конструкции и теплоизоляции сосудов для хранения гелия в космосе<sup>6</sup>.

Исследования при низких температурах проводят в специальных устройствах — криостатах. Жидкий гелий из сосуда, где он хранится, переливают в криостат через трубку с вакуумной теплоизоляцией, создавая незначительную разницу давлений между ними. Для экономии жидкого гелия криостат предварительно охлаждают жидким азотом. В зависимости от назначения и характера исследований конструкции криостатов могут сильно различаться (существуют десятки их разновидностей).

Для прочности и долговечности большинство криостатов изготавливают из металла, хотя нередко встречаются и стеклянные криостаты, к преимуществам которых следует отнести возможность непосредственно наблюдать за исследуемым образцом.

В общих чертах криостаты напоминают лабораторные сосуды для хранения гелия. Основная часть криостата — резервуар, заполняемый жидким гелием. Этот резервуар расположен внутри вакуумного кожуха, подвешен на тонкостенной трубке-горловине (подвеске) и окружен экраном, охлаждаемым обычно жидким азотом.

Исследуемый объект погружается в жидкий гелий через подвеску или крепится к холодопроводу, присоединенному к резервуару с гелием. В первом случае температуру образца изменяют, откачивая пары гелия вакуумным насосом, во втором — с помощью намотанного на холодопровод электронагревателя. При оптических исследованиях излучение подводится к образцу через прозрачные окна из соответствующего материала.

Чтобы расширить интервал регулировки температур, образец в криостате обдувают газообразным гелием, полученным в результате испарения жидкого криопродукта и нагреваемым до нужной температуры.

<sup>6</sup> Подробнее о хранении жидкого гелия в космосе см.: Фрадков А. Б., Троицкий В. Ф. — Космические иссл., 1974, № 6, с. 936.

В криостатах, предназначенных для исследований во внешнем магнитном поле, нижняя часть иногда делается суженной, с тем чтобы ее можно было вставить между полюсами магнита. Сверхпроводящие же электромагниты обычно помещаются внутри криостата.

Крупные, уникальные установки для низкотемпературных исследований, отличающиеся большим потреблением жидкого гелия, снабжают самостоятельными высокопроизводительными гелиевыми ожижителями-рефрижераторами, имеющими замкнутую систему циркуляции гелия. В большинстве же случаев, когда проведение исследований не связано жестко с работой ожижительной установки, используют привозной жидкий гелий. Необходимое для опытов количество жидкого гелия при этом доставляется в транспортных сосудах с ожижительной станции, расположенной подчас на больших расстояниях от экспериментальной аппаратуры.

Поддержание необходимого уровня жидкого гелия в криостате и температуры исследуемого образца может производиться автоматически. Системы автоматического регулирования температуры образца, погруженного в жидкость, основаны на управлении давлением над ее поверхностью. При охлаждении газом изменяются количество газа и степень его подогрева. Из экономических соображений испаряющийся газообразный гелий собирают в специальные газгольдеры, откуда он закачивается компрессорами в стандартные стальные баллоны, после чего возвращается на станцию для повторного ожижения. Такие устройства представляют собой неотъемлемую часть криогенной системы, работающей на привозном жидком гелии.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ НИЖЕ 1 К

Как указывалось выше, из-за появления пленки сверхтекучего HeII, затрудняющей откачку паров, с помощью жидкого  $^4\text{He}$  обычно получают температуру до 1 К.

В настоящее время в физических исследованиях все чаще требуются более низкие температуры. Так, например, понижение температуры приемников инфракрасного излучения с 1,5 до 0,3 К позволяет увеличить их чувствительность примерно в 50 раз.

Для получения температур от 1 до 0,3 К пользуются преимущественно жидким  $^3\text{He}$ . При атмосферном давлении температура кипения  $^3\text{He}$  составляет 3,19 К, т. е. на целый градус ниже, чем у  $^4\text{He}$ . Поэтому

ожижение  $^3\text{He}$  осуществляется с помощью жидкого  $^4\text{He}$ , кипящего под давлением ниже атмосферного (50—100 мм рт. ст.) и имеющего температуру 2,3—2,6 К. Криостаты для  $^3\text{He}$  отличаются от криостатов для  $^4\text{He}$  наличием дополнительного резервуара, где конденсируется жидкий  $^3\text{He}$  и устанавливается исследуемый образец.

Для охлаждения жидкого  $^3\text{He}$  его пары откачивают специальными вакуумными насосами. Таким методом удается достичь температуры 0,28 К. Чтобы понизить температуру, скажем, до 0,3 К, необходимо над его поверхностью создать разрежение примерно  $1,5 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.

Значительно более низкие температуры, вплоть до нескольких милликельвинов, сегодня получают либо с помощью метода магнитного охлаждения, состоящего в адиабатическом размагничивании парамагнитных солей, либо в несколько этапов, используя растворение  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , а также метод Померанчука (переход жидкого  $^3\text{He}$  в твердое состояние при повышенном давлении).

Наконец, рекордно низкая в настоящее время температура порядка  $10^{-6}$  К достигнута в так называемых рефрижераторах с ядерной ступенью охлаждения, где на заключительном этапе применяют адиабатическое размагничивание парамагнитных ядер, предварительно ориентированных приложенным магнитным полем<sup>7</sup>.

В заключение отметим, что для подавляющего большинства современных низкотемпературных исследований и тем более для практических применений вполне достаточны температуры до 0,3 К, способы получения и измерения которых хорошо освоены, а необходимое оборудование и приборы серийно выпускаются нашей промышленностью.

<sup>7</sup> Следует подчеркнуть, что измерение температур ниже 0,1 К само по себе представляет весьма сложную задачу.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Есельсон Б. Н. и др. СВОЙСТВА ЖИДКОГО И ТВЕРДОГО ГЕЛИЯ. М.: Стандарты, 1978.

СПРАВОЧНИК ПО ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИМ ОСНОВАМ КРИОГЕНИКИ. М.: Энергия, 1973.

Лоунасмаа О. В. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НИЖЕ 1 К. М.: Мир, 1977.

## Лазер на свободных электронах

А. Н. Лебедев



Андрей Николаевич Лебедев, доктор физико-математических наук, заведующий сектором лаборатории проблем новых ускорителей Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, профессор Московского инженерно-физического института. Специалист в области физики ускорителей и физики сильноточных пучков. Автор монографий: Теория циклических ускорителей (совместно с А. А. Коломенским). М., 1961; Основы физики и техники ускорителей (совместно с А. В. Шальновым). М., 1981—1983, т. 1—3.

Экзотическое название нового источника когерентного коротковолнового излучения — лазер на свободных электронах (ЛСЭ) — призвано подчеркнуть его отличие от квантовых генераторов, где излучающие электроны связаны в атоме, молекуле или кристаллической решетке. Именно эти связи определяют энергетические уровни, задающие частоту индуцированного излучения при квантовых переходах.

В принципе работы ЛСЭ нет ничего или почти ничего от квантовой физики. «Рабочим телом» и одновременно источником энергии является пучок релятивистских электронов, подчиняющийся законам классической механики. По существу ЛСЭ является модификацией традиционных приборов СВЧ-электроники, но модификацией принципиальной, позволяющей продвигаться в инфракрасный, видимый, а возможно, и в ультрафиолетовый участок спектра. Подчеркнем, что речь идет о макроскопическом приборе, все размеры которого существенно превышают длину излучаемой волны.

### ПРИНЦИП СИНХРОНИЗМА

В квантовых генераторах энергия связанных электронов имеет тот же порядок, что и энергия излучаемого кванта, т. е. очень мала по классическим масштабам

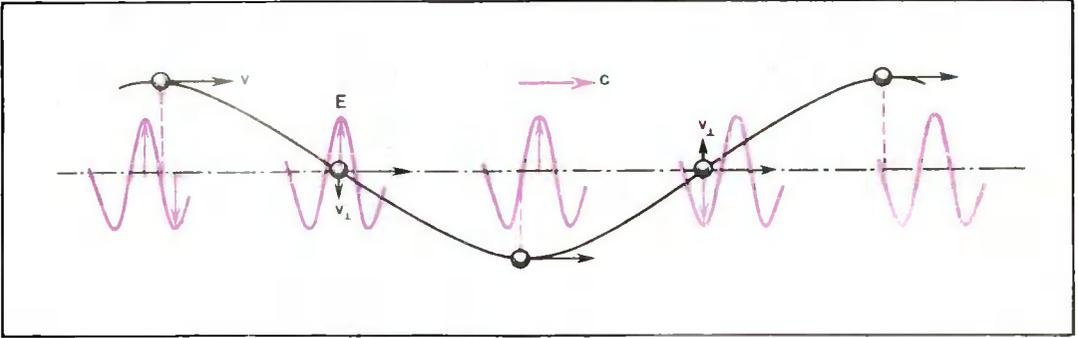
(квант видимого света уносит энергию порядка  $1 \text{ эВ}$ ). Большая мощность получается здесь за счет громадного количества элементарных излучателей, работающих когерентно, т. е. в фазе друг с другом. Во всех устройствах «пучковой» электроники плотность излучателей гораздо меньше, но полная энергия каждого из них гораздо больше энергии одного кванта. Поэтому для достижения существенной мощности каждый излучатель должен работать, так сказать, многократно, последовательно испуская множество квантов, когерентных между собой. На языке классической физики это означает, что каждый излучатель возможно большее время должен находиться в определенных фазовых соотношениях с полем собственного излучения, и чем дольше сохраняются эти соотношения, тем больше излученная энергия. Назовем это условно принципом синхронизма. Кроме того, надо добиться, чтобы разные излучатели были (или становились) когерентными между собой, что опять-таки резко усиливает излучение всей системы и, собственно говоря, составляет основу лазерного (индуцированного) излучения.

Реализация условий синхронизма в применении к коротковолновому излучению в вакуумной макроскопической системе имеет важную особенность. Если дли-

на волны гораздо меньше всех характерных размеров, то волновое поле практически свободно — оно распространяется со скоростью света, а его электрическая составляющая, перпендикулярная направлению распространения, осциллирует с большой частотой  $\omega$ . Чтобы электрон мог отдать этому полю энергию, т. е. эффективно излучать, он обязательно должен двигаться по электрическому полю, совершая поперечные периодические колебания (с этой точки зрения электроны в ЛСЭ не так уж и свободны). Для долговремен-

## ЭЛЕКТРОНЫ ДОЛЖНЫ БЫТЬ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ

Выше не случайно сказано о частоте действующего поля. Для неподвижного в среднем электрона эта величина, соответственно, совпадает с частотой волны  $\omega$ . Если электрон дополнительно к баунс-колебаниям движется навстречу волне со скоростью  $v$ , то он встречает ее максимумы и минимумы в  $(c+v)/c$  раз чаще, чем неподвижный, и трудности с баунс-частотой только усугубляются. Но вот если



Взаимодействие электрона с попутной волной. Несмотря на систематическое отставание электрона от волны, скорость его поперечного движения  $[v_{\perp}]$  всегда противоположна направлению электрического поля волны  $E$ , что соответствует передаче энергии от электрона к волне. За один период баунс-колебаний электрон отстает ровно на одну длину волны, так что разность фаз остается постоянной.

ного взаимодействия период поперечного движения электрона должен быть близок к периоду действующего на него волнового поля.

Здесь и лежит основная трудность продвижения традиционных СВЧ-приборов в область очень высоких частот. Частота поперечного движения  $\omega_{\perp}$ , называемая на радиофизическом жаргоне баунс-частотой, может определяться разными физическими факторами, например топографией дополнительных статических или переменных электрических и магнитных полей, наложением продольного магнитного поля, наконец, собственными полями пучка. Но во всех этих случаях баунс-частота ограничена сверху и соответствует в лучшем случае субмиллиметровому диапазону длин волн. В тех случаях, когда нельзя существенно увеличить баунс-частоту, остается один путь — при заданной частоте излучения уменьшить частоту поля, действующего на электрон.

движение попутное, то действующая частота в  $c/(c-v)$  раз меньше  $\omega$ , поскольку скорости волны и электрона вычитаются. Теперь условие синхронизма можно записать как

$$\omega_{\perp} = \omega \frac{c-v}{c}$$

или, домножив и разделив правую часть на

$$1 + \frac{v}{c},$$

$$\omega_{\perp} = \omega \frac{1-v^2/c^2}{1+v/c} = \frac{\omega}{\gamma^2(1+v/c)},$$

где  $\gamma = (1-v^2/c^2)^{-1/2}$  — отношение полной энергии электрона к его энергии покоя, примерно равной 0,5 МэВ. Таким образом, при скорости, близкой к скорости света ( $v \approx c$ ;  $\gamma \gg 1$ ), возможность синхронизма с высокочастотным попутным полем сохраняется даже при относительно низкой баунс-частоте — примерно в  $2\gamma^2$  раз меньшей частоты поля. Те, кому не нравятся апелляция к сложению скорости материального объекта с фазовой скоростью волны в лабораторной системе отсчета, должны быть знакомы с эффектом Доплера и, наверное, воспримут более профессиональную аргументацию. В системе отсчета, где электрон в среднем покоится, баунс-частота уменьшается в  $\gamma$  раз, а частота поля изменяется в  $(1 \pm v/c)/\gamma$  раз (соответственно для встречного и попут-

ного движения). Приравняв их, мы, естественно, придем к тому же результату. Таким образом, баунс-частота, соответствующая длине волны 1 см, обеспечивает синхронизм со световой волной длиной 0,5 мкм, если энергия продольного движения составляет примерно 50 МэВ. Подчеркнем, что энергия электронов должна быть обязательно гораздо больше энергии покоя, так что ЛСЭ с полным правом относится к модной сейчас релятивистской электронике.

#### ОТСТУПЛЕНИЕ: О ВОЗМОЖНОСТЯХ И ПЛАТЕ ЗА НИХ

Прежде чем обсуждать физику процесса взаимодействия, надо ответить на естественный вопрос — а для чего нужен ЛСЭ на фоне блестящих успехов квантовой радиофизики, отнюдь не требующей столь высоких энергий, характерных скорее для ускорительной физики? Очевидных достоинств у него два. Во-первых, это перестраиваемость, т. е. возможность непрерывного изменения частоты в широких пределах, осуществляемого просто изменением энергии пучка. При фиксированной баунс-частоте синхронизм будет автоматически осуществляться на другой частоте волны. Напомним, что в квантовых генераторах перестройка частоты, тем более плавная, сопряжена с большими трудностями, а иногда просто невозможна. С точки зрения различных приложений, свойство перестраиваемости неоценимо, например в лазерной химии, где существенно резонансное воздействие излучения на различные молекулы и радикалы. Глубокое изменение частоты, осуществляемое быстро и оперативно, открывает широкие возможности применения ЛСЭ в системах передачи информации. Число таких примеров можно легко увеличить.

Во-вторых, отсутствие перегревающегося рабочего тела в ЛСЭ снимает многие ограничения на среднюю мощность излучения, столь важные, например, в лазерах на рубине или стекле. Сами же мощности ЛСЭ потенциально очень велики, несмотря на то что не вся мощность пучка может быть переведена в излучение. Тем не менее ЛСЭ уже «примеряют» к решению энергетических задач, например к инициированию управляемого термоядерного синтеза и даже к таким фантастическим проектам, как искусственное освещение плантаций в сельском хозяйстве, передача энергии на большое расстояние в космосе и т. д.

Недостатки общей схемы ЛСЭ также очевидны. Для получения достаточной

энергии электронов традиционные, относительно простые источники высокого напряжения должны уступить место дорогим и сложным ускорительным устройствам, да еще с беспрецедентными, как будет видно ниже, требованиями к пучку. Кроме того, высокая энергия электронов нужна для поддержания синхронизма, так что на излучение может быть отдана только небольшая ее часть. Другими словами, в самой схеме ЛСЭ уже заложен небольшой коэффициент полезного действия, и для его повышения приходится существенно усложнять принцип работы.

#### КАКОГО ЦВЕТА ЭЛЕКТРОН?

Вопрос поставлен не очень серьезно и не вполне корректно. Но сказать, каков спектр излучения электрона, совершающего гармонические баунс-колебания с частотой  $\omega_0$ , мы уже можем. Будь он нерелятивистским, ответ был бы тривиален: во все стороны излучались бы волны с частотой  $\omega_0$ . Но при  $v \approx c$  картина гораздо сложнее. Для излучения вперед синхронной (и, следовательно, излучаемой) будет очень высокочастотная волна с  $\omega \approx 2\gamma^2 \omega_0$ ; для излучения назад — низкочастотная с  $\omega \approx \omega_0/2$ . Интересно, что спектр очень чувствителен к углу излучения: ведь игра идет на малой разнице больших скоростей электрона и волны, и достаточно угла порядка  $1/\gamma$ , чтобы сплитительный фактор  $\gamma^2$  превратился бы в величину порядка единицы. Итак, ответ на вопрос, поставленный в заголовке, с той же степенью серьезности был бы такой: электрон, если на него смотреть анфас, фиолетовый, уже под малым углом — красный, а сзади — инфракрасный. Между прочим, на опыте так оно и есть.

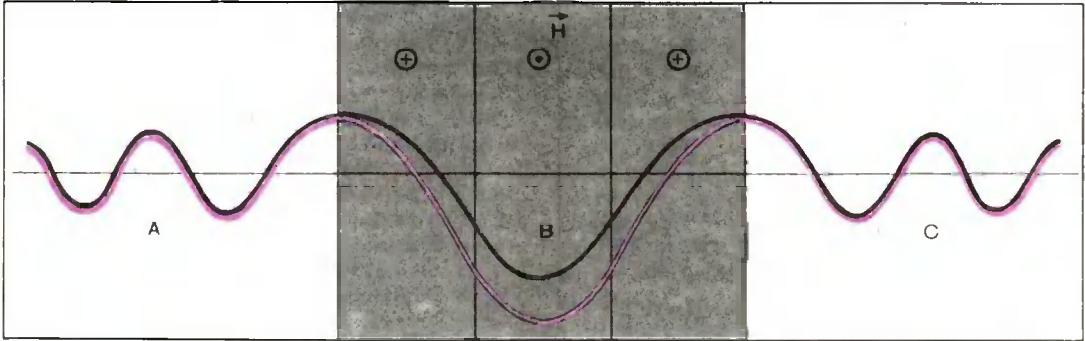
#### ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОНОВ

Пока речь шла об излучении одного электрона, вообще говоря, некогерентного с остальными электронами пучка. Последнее очевидно, так как электроны совершают баунс-колебания в разных фазах. Поэтому поля излучения различных электронов также находятся в разных фазах и в основном интерференционно гасят друг друга. Суммарное поле отлично от нуля только из-за статистических флуктуаций положения электрона или, точнее, фазы баунс-колебаний. Поскольку суммарное поле для всех едино, то почти половина электронов излучает, находясь в нужной для этого фазе, а почти половина — погло-

щает, находясь в противофазе. Небольшая случайная разница между ними обеспечивает спонтанное излучение пучка и, в смысле мощности, много дать не может. Но существующее волновое поле, будь это поле спонтанного излучения или же внешнее, задающее поле, при достаточно долговременном синхронизме приводит к так называемому индуцированному излучению, или к лазерному эффекту.

Индукцированные эффекты в используемом нами классическом описании тесно связаны с реакцией излучения, т. е. с разни-

излучать еще больше. Поглощающие, наоборот, увеличат свою расстройку, выйдут из синхронизма и вообще перестанут взаимодействовать с волной. Получается, что в синхронизм входят не только излучающие частицы, т. е. автоматически осуществляется отбор по нужным фазам. Волна усиливается, что, в свою очередь, ускоряет отбор, так что процесс усиления приобретает экспоненциальный характер. Судьба волны, для которой действующая частота в начальный момент времени чуть выше баунс-частоты, печальнее: в синхронизм вхо-



Диспергирующая секция оптического клистрона, состоящая из трех секторов со знакопеременным магнитным полем  $H$ , направленным перпендикулярно плоскости рисунка. Электроны, совершающие баунс-колебания на участке А и получающие там разницу в энергии, разделяются в пространстве на участке В и проходят его за разное время, несмотря на практически одинаковую скорость. К участку излучения С они подходят уже сфазированными. [Поперечный размер на рисунке сильно увеличен.]

цей в дальнейшей судьбе излучающих и поглощающих электронов. Излучивший электрон теряет энергию и замедляется; поглотивший, наоборот, ускоряется. Тормозясь или ускоряясь, электроны меняют расстройку — разность между баунс-частотой и частотой действующего поля, что, в свою очередь, влияет на их фазу.

Конкретная зависимость расстройки от энергии определяется способом возбуждения баунс-колебаний и для дальнейшего не очень важна. Для определенности будем, например, считать, что с увеличением энергии расстройка растет, и рассмотрим эволюцию во времени небольшой «затравочной» волны, у которой действующая частота чуть ниже начальной баунс-частоты. Излучающие частицы потеряют энергию, уменьшат расстройку и начнут

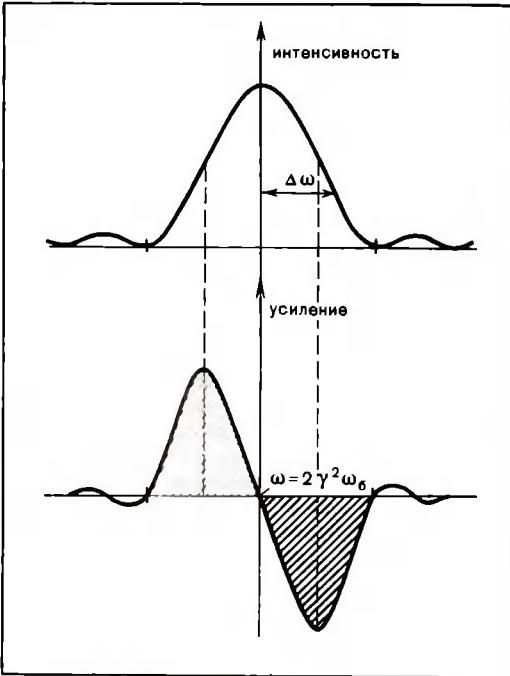
дять поглощающие частицы, быстро уничтожающие затравочное поле.

Логический вывод из этой картины прост и не совсем привычен: затравочные волны с частотой чуть ниже частоты спонтанного излучения экспоненциально усиливаются пучком, а с частотой чуть выше — поглощаются. Подчеркнем, что в основе процесса лежит зависимость интенсивности излучения от малых нарушений синхронизма. Чем резче эта зависимость, тем больше коэффициент усиления (или, соответственно, поглощения).

Остается выяснить, что значит «чуть ниже» и «чуть выше». При большой начальной расстройке весь процесс идет вяло, так как синхронизм сильно нарушен и излучение мало. При небольшой начальной расстройке фазировка идет быстро, но быстро и заканчивается (как только расстройка начнет менять знак). Эту вторую стадию процесса, называемую захватом или нелинейной стадией, мы рассмотрим ниже в связи с проблемой коэффициента полезного действия всего устройства. Оптимум расстройки оценить нетрудно: набежавшая на длину взаимодействия разность фаз баунс-колебаний и колебаний действующего поля должна по порядку величины составлять  $\pi$ . Но абсолютно такие же соображения можно было бы привести при оценке той полосы частот, в которой спон-

танно излучает в заданном направлении одиночный электрон. Другими словами, оптимальная расстройка по порядку величины совпадает с шириной  $\Delta\omega$  спектра спонтанного излучения в той же системе.

Описанному процессу фазировки, т. е. превращения системы некогерентных излучателей в когерентные, можно, а иногда и нужно помочь. Дело в том, что сильно релятивистские частицы очень слабо меняют свою скорость при изменении энергии, так что процесс фазировки может затянуться на неприемлемо большое расстоя-



Взаимное расположение линии спонтанного излучения (вверху) и линии индуцированного излучения (цветная штриховка) и поглощения (черная штриховка). Максимум индуцированного излучения приходится на частоту, соответствующую максимальной крутизне линии спонтанного излучения, причем максимум этот тем выше, чем уже линия спонтанного излучения  $\Delta\omega$ .

ние. Тогда на пути пучка можно создать участок (диспергирующую секцию), время пролета через который зависит именно от энергии, а не от скорости. Авторы предложения (Институт ядерной физики СО АН СССР) назвали свое устройство оптическим клистроном, опираясь на аналогию с известным радиотехническим прибором.

Итак, мы пришли к выводу, что волна, распространяющаяся вдоль пучка, экспоненциально усиливается, если ее частота лежит в пределах от  $2\gamma^2\omega_0 - \Delta\omega$  до  $2\gamma^2\omega_0$ , и поглощается в интервале частот от  $2\gamma^2\omega_0$  до  $2\gamma^2\omega_0 + \Delta\omega$ . Максимумы усиления и поглощения лежат где-то посередине этих интервалов, а в остальных диапазонах пучок оптически прозрачен (если, конечно, его плотность не слишком высока). Чем уже спектр спонтанного излучения, тем больше коэффициент усиления или поглощения. Поэтому для получения эффекта индуцированного излучения малопримодны такие радиационные процессы, как тормозное или синхротронное излучение, обладающие почти сплошным спектром. А вот циклотронное излучение, когда баунс-колебания выглядят как вращение в однородном продольном поле, обладает линейчатым спектром и используется в так называемых гиротронах, которые при переходе к релятивистскому пучку могут быть превращены в ЛСЭ. Чаще, однако, в качестве первичного радиационного процесса для ЛСЭ используется так называемое ондуляторное излучение.

## ОНДУЛЯТОР

Так называют уже давно известное макроскопическое устройство, дающее спонтанное коротковолновое излучение в узкой полосе частот (с большой спектральной яркостью). Оно представляет собой последовательность магнитов, создающих знакопеременное магнитное поле, перпендикулярное направлению движения электрона и меняющееся вдоль его траектории с некоторым пространственным периодом  $b$ . Иногда об этом поле говорят как о поле накачки, обеспечивающем достаточную амплитуду и частоту баунс-колебаний, хотя магнитное поле дополнительной энергии электрону сообщить не может и лишь переводит в поперечное направление часть его продольного импульса. Правда, в той системе отсчета, где электрон в среднем покоится, поле ондулятора имеет не только магнитную, но и поперечную электрическую составляющую и вообще выглядит как настоящая электромагнитная волна накачки, падающая на электрон. Подобные соображения, основанные на физической эквивалентности инерциальных систем отсчета, имеют не просто академическую ценность. В частности, ясно, что и в той системе, которая называется неподвижной только потому, что в ней покоится читатель, можно

использовать в качестве ондулятора относительно низкочастотную встречную волну. Период ее легко сделать гораздо меньше периода статического поля, что дает возможность продвинуться еще дальше в коротковолновую область. Заманчивость этого варианта тускнеет только от того, что скромные три килогаусса статического поля эквивалентны напряженности поля волны в миллион вольт на сантиметр.

Особенности спектра ондуляторного излучения легко понять из изложенных выше соображений. Ондуляторное поле навязывает электрону баунс-частоту  $\omega_0 = 2\pi\nu/b$ . Мы уже говорили, что под малым углом  $\theta < 1/\gamma$  электрон излучает на частоте  $\omega \approx 2\gamma^2\omega_0$ . Следовательно, идеальный ондулятор с бесконечно малой амплитудой баунс-колебаний под малым углом должен давать идеальную спектральную линию на частоте  $\omega = 4\pi\gamma^2/b$ , но ... с нулевой интенсивностью, которая, как всегда, пропорциональна квадрату амплитуды. Увеличивая последнюю, мы увеличиваем интенсивность, но одновременно теряем среднюю продольную скорость, что резко уменьшает спасительный фактор  $\gamma^2$  и, следовательно, частоту излучения. Можно объяснить это и по-другому: как только в процессе баунс-колебаний угол между траекторией и направлением излучения становится больше  $1/\gamma$ , частота спонтанного излучения вперед резко падает. Отсюда получается и оптимальное значение ондуляторного поля и связанной с ним амплитуды баунс-колебаний: последняя должна быть по порядку величины в  $\gamma$  раз меньше периода ондулятора, или в  $\gamma$  раз больше длины волны. Обычно это соответствует напряженности поля в 2—3 кГс.

Бесконечно узкая идеальная линия имеет на деле конечную ширину. Как уже говорилось, излучаться будут все частоты, для которых разность набега фаз баунс-колебаний и действующего поля за время пролета системы  $t$  не превышает  $\pi$ . Поскольку  $t \approx Nb/c$ , где  $N$  — число периодов ондулятора, то  $\Delta\omega/\omega \approx 1/2N$ . Чем больше периодов, тем острее спектральная линия и тем больше коэффициент усиления при данном токе. Одновременно, увы, уменьшается оптимальная расстройка, а с ней и та энергия, которую электроны могут отдать до перехода в нелинейную стадию, т. е. коэффициент полезного действия ЛСЭ.

## С РЕЗОНАТОРОМ ИЛИ БЕЗ НЕГО?

В принципиальной схеме ЛСЭ коротковолнового диапазона остался необсуж-

денным еще один элемент, превращающий его в генератор, — обратная связь. Пока что мы пришли к выводу, что пучком усиливаются все затравочные волны с частотами в нижней половине спектральной линии спонтанного излучения, но наиболее интенсивно усиливается волна, лежащая в середине этого диапазона. Если предоставить систему самой себе, т. е. позволить усиливаться всем шумовым полям, которые на это способны, то результатом индуцированных эффектов будет сужение линии спонтанного излучения, небольшой сдвиг ее по частоте вниз и резкое возрастание спектральной яркости — так называемый режим сверхизлучения, показатель того, что система стала лазером. Амплитуда поля излучения при этом меняется в пространстве от затравочного значения на входе в ондулятор до значения, соответствующего захвату, на выходе. Но вернув некоторую часть излучаемой мощности на вход, т. е. создав глубокую обратную связь, можно как бы увеличить (и очень существенно!) затравочное поле и тем самым при том же линейном коэффициенте усиления сильно сэкономить на длине и числе периодов ондулятора, представляющего собой довольно сложное прецизионное устройство. Коль скоро мы говорим об оптическом диапазоне, то обратная связь осуществляется зеркалами, т. е. оптическим резонатором. Часть мощности, выводимая из резонатора, как правило малая по сравнению с циркулирующей в резонаторе мощностью, определяет выходную мощность устройства. Ради справедливости надо упомянуть, что оптический резонатор, работающий при большом уровне мощности, да еще под прямым воздействием электронного пучка, тоже весьма непросто. Вопрос о его необходимости надо решать в зависимости от возможностей ускорителя: если доступный ток пучка мал, то без резонатора необходимая длина ондулятора в режиме сверхизлучения может оказаться просто неразумно большой.

Особый интерес представляет узкополосная система обратной связи, работающая только на одном собственном колебании резонатора. Такая система «селекционный мод» не только широко применяется, но и просто необходима в генераторах длинноволнового диапазона. Однако реализация ее в оптическом диапазоне в применении к ЛСЭ хотя и заманчива, но встречается с очень большими трудностями, и обсуждать мы ее здесь не будем.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

В следующих разделах рассмотрены ограничения, свойственные схеме ЛСЭ, а также физические и технические трудности его создания. Прежде всего о КПД. Коль скоро система электронов индуцированно излучает только при превышении баунс-частоты над частотой действующего поля, то каждый электрон может отдавать энергию только до тех пор, пока не войдет в точный синхронизм и, как говорят, не будет захвачен волной (ограничения технического характера, например радиационная стойкость оптического резонатора, здесь не рассматриваются). Оптимальный вариант с точки зрения КПД состоит, следовательно, в уменьшении энергии электронов как раз на ширину линии поглощения, т. е. в относительном изменении энергии на величину порядка  $1/2N$ . Эта величина характеризует КПД системы. Таким образом, число периодов ондулятора  $N$  выгодно увеличивать с точки зрения повышения коэффициента усиления (при заданном токе пучка), но невыгодно с точки зрения КПД. Необходимость компромиссного решения очевидна, так как использовать высокую энергию частиц только для создания эффекта Доплера, не имея возможности преобразовать ее в высокочастотную энергию, не только обидно, но в некоторых приложениях и недопустимо.

Казалось бы, решение лежит на поверхности — надо лишь использовать рециркуляцию пучка, вновь и вновь заставляя его проходить через ондулятор и тем самым восполняя потери на излучение за счет внешнего электрического поля. К сожалению, с точки зрения термодинамики идея выглядит несколько подозрительной, и дело действительно обстоит не так просто. Ведь суммарный эффект индуцированного излучения разный — чуть больше половины электронов излучает, а чуть меньше — поглощает. Пытаясь компенсировать потери энергии излучивших электронов, мы одновременно добавляем лишнюю энергию поглотившим, что вообще выводит их из игры. Вот если бы мы умели их различать ... но ведь в пространстве они разделяются лишь на расстоянии порядка длины волны ... Не рискуя назвать эту ситуацию безвыходной, следует признать ее, как минимум, очень сложной. Схемы на циркулирующем пучке осуществляются (об этом пойдет речь ниже), но совсем не для достижения высокого КПД.

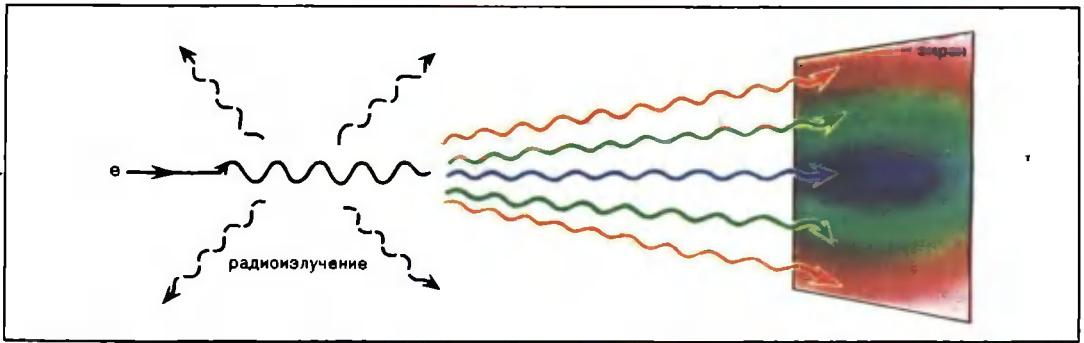
Собственно говоря, в проблеме КПД

есть два аспекта. Во-первых, прямой — каким образом получить как можно больше киловатт на мегаватт мощности, потребляемой от сети, куда, естественно, включаются потери в ускорителе, работа фокусирующих систем, насосов и т. д. Обсуждать эти вопросы можно только в комплексе, и не последнее место занимает здесь утилизация «отработанного» пучка, несущего основную часть энергии. Второй аспект более тонкий — как для достижения той же мощности обойтись возможно меньшим током и тем самым ослабить требования к ускорителю. В этой связи надо упомянуть еще об одной физической идее, которая выглядит внешне как малозначительная модификация всей схемы ЛСЭ, но, по существу, принципиально меняет всю картину взаимодействия.

## ОБРАЩЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИЛИ ЛСЭ В НЕЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ

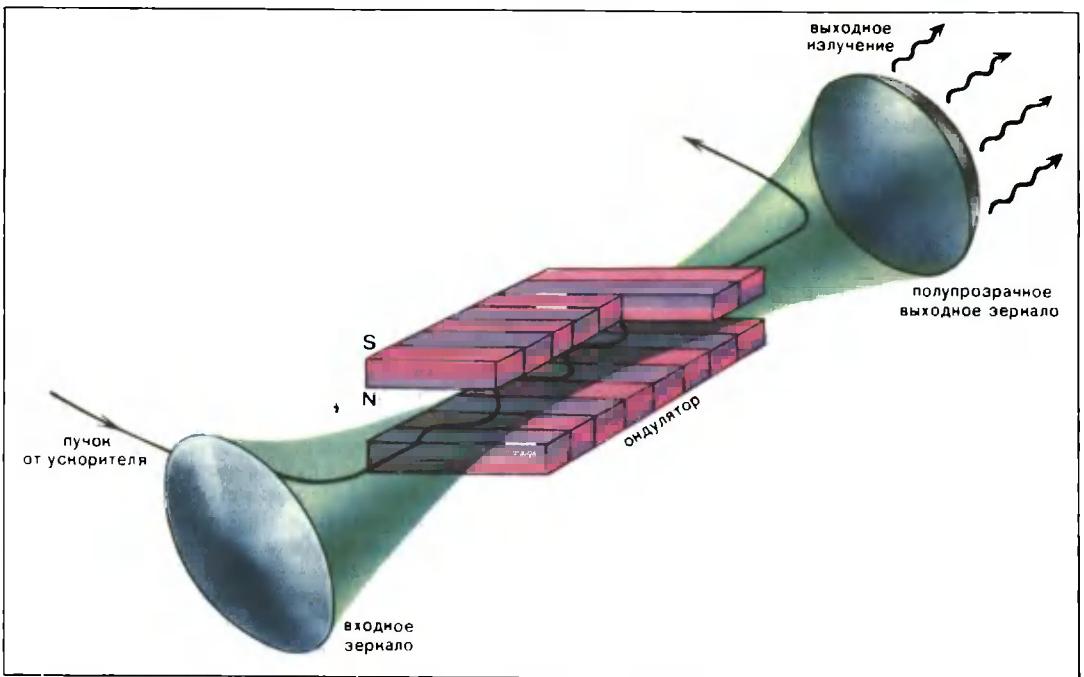
Пусть в системе уже существует электромагнитное поле частоты  $\omega$  и пучок находится с ним точно в резонансе, т. е. приведенная энергия частиц  $\gamma$  равна  $\sqrt{2\omega/\omega_0}$ . Согласно изложенным выше аргументам, на этой частоте индуцированного излучения нет, и ровно половина частиц получает энергию от поля, а половина отдает ее. И те, и другие выходят из точного резонанса и, следовательно, испытывают смещение по фазе, но в разные стороны. По истечении некоторого времени излучавшие частицы переходят в ускоряющую фазу, а поглощавшие — в тормозящую и начинают восстанавливать свою энергию, меняясь в конце концов, местами, а волна не меняет в среднем своей амплитуды в силу полной симметрии процесса. Это и есть тот самый нелинейный режим захвата, на котором заканчивалась описанная выше стадия экспоненциального роста поля. Читатели, знакомые с принципами работы резонансных ускорителей, несомненно, узнают в этой картине классический принцип автофазировки, несколько осложненный тем, что в этом случае резонансно взаимодействует поперечное электрическое поле и поперечные баунс-колебания, а не продольное поле, как, скажем, в линейных ускорителях.

Если теперь достаточно медленно менять какой-либо из параметров, определяющих резонанс, то средняя энергия частиц будет подстраиваться под это изменение. В линейных ускорителях таким параметром является фазовая скорость



Спектр огибающей излучения релятивистского электрона. Под малыми углами излучается види-

мый свет, а под большими — коротковолновое радиоизлучение.



Условная схема ЛСЭ с плоским ондулятором на постоянных магнитах. Поляризация волнового поля

горизонтальная [область, занятая волновым полем, показана цветом].

волны, плавное увеличение которой влечет за собой ускорение частиц.

В интересующем нас диапазоне этот путь закрыт, так как волна свободна и ее скорость практически равна скорости света, однако есть еще один параметр — баунс-частота, увеличение которой должно вести к замедлению частиц в среднем. Освободившаяся энергия уходит в поле, т. е. на когерентное излучение. (Мы здесь сознательно избегаем термина «индуцированное», т. е. излучение, которое становится

когерентным, поскольку частицы в состоянии захвата уже сгруппированы по фазе и излучают всегда когерентно.) При жестком соотношении  $\omega \approx 2\gamma^2\omega_0$  увеличение баунс-частоты в четыре раза меняет энергию вдвое, что автоматически означает КПД в 50 %.

Внешне изменения выглядят вполне невинно — ондулятор имеет переменный (уменьшающийся) период, а энергия частиц на входе пучка должна быть точно подстроена под частоту уже имеющегося

поля. Тем не менее по принципу работы ЛСЭ с переменными параметрами — не лампа бегущей (или обратной) волны, а, скорее, «резонансный замедлитель» — обращение резонансного линейного ускорителя.

Однако повышение КПД в этой схеме не дается даром. Во-первых, нужно увеличить период ондулятора на входе в систему (чтобы его можно было уменьшать в дальнейшем). Это автоматически требует увеличения начальной энергии частиц — в нашем примере вдвое. Во-вторых, чтобы существенная часть пучка была захвачена волной, к его моноэнергетичности и угловому разбросу предъявляются особые требования. Наконец, в резонаторе должно с самого начала существовать поле заранее выбранной частоты и достаточно большой амплитуды — ведь оно должно обеспечить съем гораздо большей энергии с пучка при той же геометрии траектории. Поэтому схема с переменными параметрами скорее выглядит не как генератор, а как мощный усилитель с небольшим коэффициентом усиления и приличным КПД.

### УСКОРИТЕЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Новые идеи легко становятся модой, и хлынувшая лавина журнальных статей по ЛСЭ это только подтверждает. Подавляющее большинство из них чисто теоретические, а из экспериментальных большая часть относится к миллиметровому и субмиллиметровому диапазонам, не требующим высокой энергии электронов. Действующие ЛСЭ инфракрасного и оптического диапазонов пересчитываются на пальцах одной руки, да и мощность их пока на много порядков меньше не только громадных значений мощности насыщения, но и того, что получено на квантовых генераторах. Может быть, скепсис автора объясняется тем, что он, как ускорительщик, отчетливо представляет себе трудности создания пучка необходимого качества. Мало того, что при энергии около 100 МэВ стартовый ток пучка, при котором начинается генерация, должен составлять единицы, а то и сотни ампер. К этому можно быть морально готовым, хотя бы из оценок мощности генерируемого поля, при которой ЛСЭ сравнивается с существующими квантовыми генераторами. Хуже, что этот громадный, с точки зрения обычных ускорителей, ток должен быть сопряжен с очень высоким качеством пучка — в первую очередь с малым энергетическим и угловым разбро-

сами. Действительно, выше молчаливо предполагалось, что пучок моноэнергетический, чего на деле никогда не бывает. А ведь частицы с разной энергией, имея одну и ту же баунс-частоту, излучают разные частоты. Электроны, имеющие относительно отклонение энергии порядка или больше  $1/N$ , излучают вне рабочей полосы  $\Delta\omega$  и, в лучшем случае, вообще не участвуют в процессе. Немного лучше обстоит дело с угловым разбросом, но и он заведомо не должен превышать величину порядка  $1/\gamma$ . Соответствующие числа вызывают у специалистов по ускорителям по меньшей мере глубокую задумчивость, а в сочетании с требованием большого тока — нехорошее оживление.

Тем не менее добиться желаемого, хотя и трудно, но можно. Во всяком случае принципиальных запретов для этого нет. Наиболее подходящим кандидатом сейчас представляется так называемый линейный индукционный ускоритель (ЛИУ), способный дать ток до десятка килоампер. При энергии частиц в 100 МэВ мощность пучка тогда равна 1 ТВт, и КПД лазера в 10 % уже обеспечил бы мощность в 100 ГВт, удовлетворившую многих взыскательных потребителей. Правда, все это в коротком импульсе, но продление его или увеличение частоты повторения уводит нас уже в техническую и экономическую область, о которой рано говорить, пока пучки требуемого качества не получены на практике.

Как и всюду, качество находится в противоречии с количеством. На циклических ускорителях и накопителях нетрудно добиться очень малого энергетического и углового разброса в пучке, но при малом числе циркулирующих частиц. Отсюда очень высокие требования к резонатору и ондулятору, низкие КПД и малые средние выходные мощности. Рекорд по последнему параметру (в видимом свете) поставлен пока на уникальном сверхпроходящем линейном ускорителе в Станфорде (США) и составляет 4 Вт при КПД чуть больше 1 %. Для исследовательских целей результат прекрасен, но до ошесения плантаций, надо прямо сказать, далековато.

Однако рассказ об интереснейшем и тонком физическом эффекте, имеющем многочисленные потенциальные возможности, не хотелось бы кончать в минорной тональности. От энергии в 1 МэВ до 1 ГэВ ускорители эволюционировали за двадцать лет. От токов в доли ампер до мегаампер и того быстрее. Вот если бы это удалось объединить...

## Перспективы командорского калана

А. В. Зорин



Александр Владимирович Зорин, младший научный сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии Министерства рыбного хозяйства СССР. Занимается проблемами питания калана и некоторых видов тюленей.

В селе Никольском, единственном населенном пункте Алеутского района Камчатской области (таков современный статус Командорских о-вов), осенью 1978 г. появилось первое научное учреждение — «Командорский научно-исследовательский пункт ВНИРО круглогодичного действия» (сокращенно НП). Почти весь объем программы НП был посвящен одному виду — калану, или морской выдре. Несмотря на это, работы впереди было столько, что нам, двум научным сотрудникам и лаборанту, не хватало рук. Через год нас стало уже пятеро, появилась кое-какая техника и необходимый опыт новой работы, которая выстроилась в трех основных направлениях: морфология; этология и организация популяции; экология, в частности кормовые ресурсы и питание.

В нашей статье речь пойдет в основном о кормовых ресурсах и питании калана, поскольку именно эти вопросы в первую очередь определяют перспективы роста и воспроизводства их популяции. Но прежде несколько слов о ситуации, в которой находилась командорская популяция каланов в последние несколько десятилетий.

Примерно к середине 60-х годов животные восстановили свою численность в прибрежных водах о-ва Медного, тогда

как более просторные, но чаще посещаемые людьми побережья о-ва Беринга пустовали после неумеренного промысла на рубеже веков, почти полностью истребившего местную популяцию. Возвращаться к берегам о-ва Беринга каланы начали в 1971—1972 гг., когда, по единодушному предположению зоологов, стали проявляться последствия перенаселения на о-ве Медном — увеличилась смертность и снизилась рождаемость животных, произошли изменения в питании, связанные с нехваткой традиционного корма.

К 1982 г. беринговская группа животных по численности уже несколько превысила медновскую, хотя общая численность командорской популяции, преодолев за этот период свой пик в 2200 особей, сейчас находится на более низком уровне.

В связи с этим нашей главной задачей было узнать, до каких пределов командорская популяция каланов может расти без катастрофического перерасхода кормовых ресурсов. Будет ли эта популяция достаточно велика для того, чтобы можно было говорить об использовании ценнейшего меха калана.

Наблюдая за питанием животных одновременно на обоих островах и сравнивая результаты этих наблюдений, мы получили возможность выделить некоторые аномальные, на наш взгляд, особенности

медновской группы. При этом развитие беринговской части популяции, происходящее в условиях изобилия кормом и заново осваиваемой среды, приняты за эталонный процесс, а наблюдаемые на о-ве Медном значительные отклонения от принятой нормы рассматривали как следствия факторов, лимитирующих рост популяции. Мы попытались понять и саму природу этих факторов.

В естественных условиях редко можно увидеть, чем питаются дикие животные, а тем более, какой пище они отдают предпочтение и как ее добывают. В особенности это относится к каланам. Поэтому, собирая данные по их питанию, мы использовали традиционный метод капрологического анализа, т. е. изучения твердых остатков корма в экскрементах, остающихся на береговых залежках зверей.

Поскольку каланы питаются в основном донными беспозвоночными, панцири которых легко определяются в экскрементах, такой анализ дал достаточно четкую картину качественного и количественного состава рациона.

Оказалось, что медновские каланы употребляют в пищу моллюсков гораздо больше, чем беринговские, основу питания которых составляют морские ежи. На о-ве Беринга хорошо заметны и сезонные изменения пищевого рациона: летом каланы питаются в основном иглокожими, а зимой они предпочитают моллюсков — мидий (*Mytilus edulis*) и модиолусов (*Modiolus modiolus*). У каланов с о-ва Медного такие изменения выражены слабо или сглажены, а доля морских ежей в их рационе вдвое меньше, чем у животных с о-ва Беринга.

Кроме того, ежедневное меню медновских каланов очень разнообразно: несколько видов моллюсков, морские ежи, рыба и ракообразные, в то время как пища беринговской группы состоит обычно из морских ежей и двух видов моллюсков.

Такое разнообразное меню каланов на о-ве Медном еще раз подтвердило предположение о недостатке основного корма животных в этом районе. Несколько позже к аналогичному выводу пришел американский зоолог Р. Остфельд, изучавший питание каланов у берегов Калифорнии<sup>1</sup>. Он определил их пищевую стратегию как постепенное «переключение» (тер-

мин автора) с одного вида корма на другой.

Применительно к нашему случаю это можно представить следующим образом: сначала каланы используют самый обильный из предпочитаемых кормов (морских ежей), затем по мере истощения его запасов переключаются на второй по величине биомассы вид корма (на моллюсков), уменьшают его запасы, снова переключаются на другой вид (например, на рыбу и более подвижные формы беспозвоночных — осьминогов и ракообразных) и так далее, пока это возможно.

Каждое переключение влечет за собой изменение в энергетической эффективности питания и другие экологические последствия. В частности, все компоненты каланьего рациона имеют разную калорийность, а значит, и разную физиологическую ценность. Например, чтобы получить одно и то же число калорий, калану необходимо добыть больше моллюсков, чем морских ежей. При этом энергетические затраты на добычу моллюсков будут значительно большими, так как крупную раковину намного труднее оторвать от грунта и разрушить, чем просто поднять на поверхность несколько морских ежей и раздавить их хрупкий панцирь. К ловле рыбы каланы вообще плохо приспособлены, поэтому такой высококалорийный продукт требует еще больших затрат, к тому же охота, видимо, нечасто заканчивается удачей.

Итак, в итоге первого этапа исследования были определены значение того или иного корма и состав рациона каланов в различных условиях.

Задачей второго этапа было изучить состояние ресурсов беспозвоночных, основного пищевого источника каланов в благоприятных условиях, и рассчитать оптимальную для данной среды численность их популяции.

Для этого в 1980 г. ВНИРО начал серию подводных экспедиций, ядро которых составили опытные специалисты лаборатории подводных исследований во главе с К. С. Сидоровым.

Рыба — редкая добыча калана.

<sup>1</sup> Ostfeld R. — Oecologia (Berl.), 1982, v. 53, p. 170.

Так выглядит небольшой участок дна, на котором фотоаппарат фиксирует обилие и видовой состав живых организмов.



За три экспедиционных сезона было собрано множество бентосных и других проб, совершено несколько сот водолазных погружений, с помощью подводного фотоаппарата получено более тысячи снимков морского дна. В результате мы составили подробную схему распределения сообществ донных беспозвоночных и бурых водорослей, которые, как выяснилось, имеют большое значение в цепи трофических связей калана.

Чтобы объяснить некоторые закономерности в формировании и топографии этих сообществ, придется сказать несколько слов о командорской погоде. Проявления ее кажутся хаотичными, чередование шквальных порывов, туманов, ясного солнца и осадков — совершенно непредсказуемы. Однако оказалось, что направление сильных и особо опасных штормовых ветров меняется закономерно и сезонно: зимой — это северо-западные ветры, летом — юго-восточные, которые дуют каждые 3—4 дня. Следовательно, воздействию штормовых волн и глубинной зыби подвержены донные сообщества всех островных побережий. Это воздействие может изменяться и усиливаться благодаря особенностям рельефа островов. Они гористы и изобилуют глубоко вырезанными бухтами, высокими мысами и узкими распадками. Воздушный поток, попав в лабиринты островных «труб», часто приобретает большую силу и специфичное для каждой бухты или района направление.

Таким образом, большая часть донных животных и растений концентрируется на подводных продолжениях скалистых мысов, а точнее, под их защитой. Плотность группировок морских ежей зависит кроме прочего и от ориентации береговой линии относительно направления господствующих ветров. Центральные же части бухт, как правило, имеют песчаное, подвижное дно, и после продолжительных зимних штормов глубина в них может меняться на 2—4 метра. В это время из грунта вымывается значительная часть живущих в его толще двусторчатых моллюсков, которые зимой служат основным кормом каланов. Таким образом, объясняется еще одна из причин сезонных различий в питании животных.

Кроме того, сравнительный анализ сезонных данных о распределении численности каланов, материковых бентосных проб и гидрометеоданных заставил нас предположить существование двух основных зон питания животных — летнюю (восточные побережья) и зимнюю (западные).

До сих пор считается, что кормовые миграции каланов имеют характер постоянных поисков и поэтому случайны. Однако предполагаемое наличие кормовых зон можно объяснить не только вынужденной реакцией на сезонные изменения климатических условий, но и использованием определенного режима использования ими кормовой базы. Действительно, в условиях оптимальной плотности каланов такая зональность, вероятно, обеспечивает регулярное перераспределение нагрузки на пищевые ресурсы и выравнивает ее.

Все известные результаты исследований питания командорского калана показывают, что присутствие морских ежей в пище в достаточном количестве необходимо животным независимо от разнообразия других объектов. Поэтому сведения о состоянии популяций морских ежей так же, как и о величине их биомассы, имели для нас решающее значение при оценке кормовых ресурсов калана в целом.

Известно, что возрастная структура популяции служит хорошим индикатором ее состояния. Например, отсутствие или недостаточный объем особой старших возрастов характерно для угнетенных или молодых популяций. И, наоборот, так называемые стареющие популяции, не используемые каким-либо хищником, отличаются малым количеством молоди. Примерно эти два частных типа возрастной структуры были отмечены нами соответственно для о-ва Медного и о-ва Беринга. Однако внутри каждой из островной популяции, и особенно беринговской, возрастной состав отдельных крупных скоплений морских ежей был неоднороден. Эти меж- и внутривидовые различия возрастных характеристик позволяют проследить зависимость состояния кормовой базы от плотности популяции каланов и последствия превышения ее оптимальных пределов.

Основная закономерность заключается в следующем: каланы в первую очередь поедают взрослых ежей наиболее крупных по размеру и весу. Поэтому большое скопление молоди на о-ве Медном говорит о слишком высокой плотности той или иной группы каланов. Следовательно, чем более сбалансирована возрастная структура скопления морского ежа, тем ближе к оптимальной плотности и численности этих групп.

Нарушенные популяции морского ежа восстанавливаются очень медленно, поскольку молодь не в состоянии конкурировать с колониями бурых водорослей.

Вот, кстати, почему мы говорили о значимости этих растений в пищевой цепи командорского калана. У побережий о-ва Медного, например, уже не раз за последние годы поля ламинарий и алярий постепенно занимали все верхние горизонты каменистого дна. Поэтому наиболее плотные скопления морских ежей сейчас можно найти здесь лишь на границе водорослевых полей на глубине от 14 до 18 м.

В связи с этим нельзя не вспомнить об истребленной нашими предками морской, или Стеллеровой, корове. Представители этого уникального командорского вида потребляли немалое количество именно бурых водорослей и служили как бы буферным звеном в системе отношений между каланами, морскими ежами и водорослями. Возможно, обостренная конкуренция между иглокожими и растениями, в которой последние зачастую побеждают, возникла в результате изъятия этого звена из островной экосистемы, и кто знает, какие еще последствия этого необдуманного и неоправданного изъятия откроются нам в будущем.

Итак, мы установили, что восстановление ресурсов морских ежей о-ва Медного зависит прежде всего от ослабления пресса калана. На о-ве Беринга, напротив, возможно и даже желательнее, увеличение плотности стада калана. В последние годы именно так перераспределяется численность командорской популяции каланов между островами. Образно говоря, выравнивание нагрузки на пищевые ресурсы всей популяции происходит по принципу «сообщающихся сосудов», поэтому есть все основания считать, что экологический баланс может быть достигнут в недалеком будущем.

Первые два этапа исследований подвели нас к решению основного вопроса — определению оптимальной емкости среды для калана.

Имея большой объем сведений об удельной биомассе морских ежей практически во всех районах островного мелководья и учитывая особую значимость этого корма, для расчета оптимальной емкости мы выбрали метод, основанный на соотношении потребности каланов в морских ежах и величины полной биомассы этого вида в доступных калану акваториях<sup>2</sup>.

При этом были использованы данные К. Кеньона и других авторов об энергетической потребности калана и калорийности его кормовых объектов.

Расчеты показали, что биотопы командорских побережий способны прокормить популяцию калана численностью до 7 тыс. особей без угрозы подрыва кормовой базы. Общая численность популяции в этом случае должна будет распределяться примерно в следующей пропорции: 20 % — на о-ве Медном и 80 % — на о-ве Беринга. Таким образом, в перспективе популяции — почти четырехкратное увеличение современной численности.

Выводы, основанные на многолетних наблюдениях, приводят нас к целесообразности вмешательства в процесс развития популяции, о которой идет речь. Действительно, изымая из популяции определенное количество животных, например в качестве ежегодной санитарной выбраковки, можно достигнуть двойного эффекта. Во-первых, это поддержит популяцию в стадии активного роста и тем самым положительно повлияет на темп воспроизводства, во-вторых, даст прямой экономический эффект от поступлений ценнейшего меха. В целом проблема может быть выражена известной формулой «сохранение через изъятие» и требует осторожного, но незамедлительного решения, поскольку численность калана на о-ве Беринга неуклонно растет и мы не должны допустить уже известных последствий возможного в будущем перенаселения.

Поскольку сейчас мы уже коснулись темы ведения каланьего хозяйства, нельзя не отметить еще один путь его создания.

В Советском Союзе и за рубежом уже существует некоторый опыт вольерного содержания каланов. Результаты экспериментов всегда обнадеживали: животные легко привыкали к человеку, в первые же дни неволи брали пищу из рук, причем пища эта не всегда соответствовала их прежним привычкам. Однако дальше приручения дело не шло, и конечные цели экспериментов не были достигнуты. Не удалось получить потомства, и у многих животных, несмотря на внешние признаки хорошей адаптации, развивались нарушения физиологических систем. Кроме того, метод вольерного содержания не позволял

<sup>2</sup> Зорин А. В., Севостьянов В. Ф., Бурдин А. М. Кормовые ресурсы и перспективы роста численности командорского

калана. — В сб.: Изучение, охрана и рациональное использование морских млекопитающих. Астрахань, 1982.

Поля бурых водорослей — убежище и «столовая» каланов вблизи берега.

У мыса Толстого, где образовалась первая на о-ве Беринга залежка каланов, расположился НП.

Лиман в бухте Гладковской о-ва Медного, где планируется организация полувольного содержания каланов.



проследить естественные закономерности поведения и связи животных со средой. Поэтому специалисты неоднократно высказывали мысль о создании хозяйства с полувольным содержанием каланов в условиях, максимально приближенных к естественным.

Такие условия были найдены еще в 1937 г. на о-ве Медном, в бухте Гладковской. Расположенный в прибрежной долине бухты лиман как нельзя лучше отвечает самым необходимым требованиям для жизни большой группы животных. Он имеет соленую воду, просторен и сообщается с морем лишь узкой протокой, проход через которую можно легко регулировать. Обследуя лиман в 1981—1982 гг., мы обнаружили хорошо развивающиеся колонии мидий — одного из основных кормов калана. Попытки культивирования этих моллюсков в лимане подтвердили нашу надежду на создание хорошей кормовой экспериментальной базы. Кроме того, летом в лимане есть рыба и в сезон размножения — обилие крабов, которых калан поедает очень охотно.

Таким образом, содержание животных в естественных условиях, но в полувольном режиме — дело реальное, и проект создания такой экспериментальной базы уже утвержден. С его существованием связаны надежды не только практического характера. Возможность постоянного наблюдения за животными и проведения экспериментов позволит превратить бухту Гладковскую в уникальную научную лабораторию, где мы сможем узнать еще многое о калане.





## Биоакустика в разведении птиц

С. Ю. Фокин



Сергей Юрьевич Фокин, младший научный сотрудник отдела дичеразведения Центральной научно-исследовательской лаборатории охотничьего хозяйства и заповедников Главного управления охотничьего хозяйства и заповедников при Совете Министров РСФСР. Область научных интересов — биоакустика и поведение выводковых птиц.

Разведение птиц в неволе — один из способов сохранить редкие и исчезающие виды, этот же метод используется в охотничьих хозяйствах для пополнения количества пернатой дичи. Известно, что успех в искусственном разведении обеспечивается созданием необходимых условий для развития эмбрионов в инкубаторах, содержанием и воспитанием молодых птиц. Первая стадия — инкубирование яиц, пожалуй, наиболее легкая, зато вырастить птенцов и добиться того, чтобы их поведение в естественных биотопах не отличалось от свойственного им по природе, — дело далеко не простое. Ведь в обычной жизни, начиная от проклевывания яиц и до того времени, как молодые птицы станут самостоятельными, они находятся под опекой родителей (или одного из них, чаще самки), которые каждый акт родительской заботы сопровождают разнообразными акустическими сигналами.

В исследованиях по орнитологической биоакустике почти за 30 лет ее развития уже накоплен большой опыт, из которого наибольшее значение имеет расшифровка смысла звуковых сигналов во многих поведенческих актах разных видов птиц. Выяснилось, что приобретенные знания можно использовать в практических целях, например в авиации и сельском хозяйстве для отпугивания птиц.

Пять лет назад орнитологи (в том числе и автор этой статьи) Центральной научно-исследовательской лаборатории охотничьего хозяйства и заповедников вместе с сотрудниками кафедры зоологии позвоночных биологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и лаборатории ориентации птиц Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР начали эксперименты по управлению поведением охотничье-промысловых птиц с помощью акустических сигналов.

Прежде всего необходимо было четко выделить сигналы и соответствующие им реакции поведения, а затем использовать их при выращивании в неволе молодняка тех 12 видов птиц, которые наиболее ценны как объекты спортивной охоты или традиционного промысла. Поскольку конечная цель такого рода экспериментов — дать практические рекомендации для работников охотничьих хозяйств, где можно было бы разводить птиц сотнями и даже тысячами, естественно, и исследования по этологии необходимо было проводить не на отдельных особях или небольших группах, а сразу использовать большое количество подопытной дичи.

Об управлении поведением птиц, выращиваемых в неволе, и пойдет речь.

Первый обмен информацией, или первые птички разговоры, начинается между наседкой и еще не вылупившимися птенцами в самом конце их эмбрионального развития — когда проклевывается скорлупа. Хотя такие «беседы» и непродолжительны, птенцы успевают запомнить голос матери. Судя по исследованиям Дж. Готтлиба, только что вылупившиеся птенцы многих видов выводковых птиц хорошо отличают голос родителей от голосов других птиц, даже если они подают сигналы одинакового значения. Оказывается, будущую мать можно навязать птенцам: именно тех птиц, голоса которых слышат птенцы во время проклевывания и в первые часы жизни, они считают своими родителями, даже в том случае, когда птенцы и приемные родители принадлежат разным видам. Запоминание родительского голоса, запечатление, происходит в течение короткого времени — от проклевывания до 2—3-дневного возраста птенцов.

Как же эти этологические наблюдения использовать при искусственном разведении птиц? В питомниках по разведению дичи ежедневно собирают отложенные птицами яйца и закладывают их в инкубатор. С практической стороны это хорошо, так как обеспечивается вылупление сразу большого количества птенцов, к тому же при постоянном сборе яиц самка откладывает их больше, поскольку увеличивается репродуктивный период. Но с этологических позиций совершается серьезная ошибка — ведь будущие птенцы лишаются общения с матерью, а отсутствие матери, выполняющей роль учителя, может роковым образом сказаться на поведении птенцов.

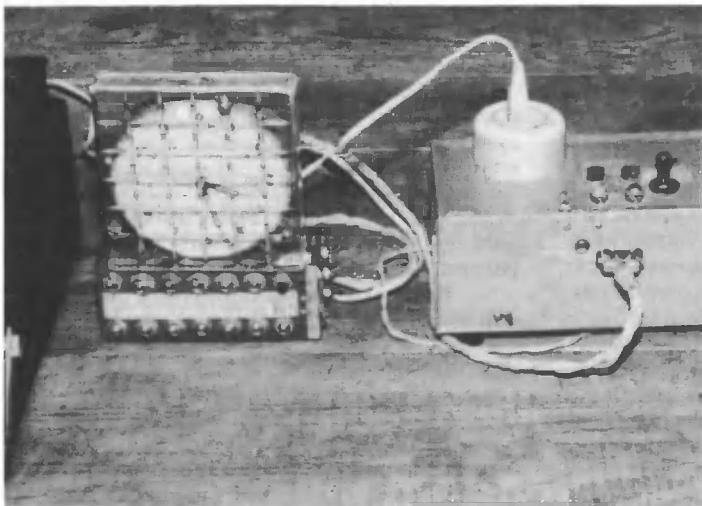
Уже в самые первые дни птенцам, выведенным в инкубаторе, может грозить гибель. Лишенные наседки маленькие пуховички фазанов, глухарей и других куриных птиц в дождливую погоду не сбегаются в укрытие, а затаиваются в открытых вольерах; оперение (вернее, пух) птенцов намокает, и они могут погибнуть от переохлаждения. Такое случается в природе, когда самка погибает и выводок остается без матери. Обычно же в неблагоприятных условиях наседка издает сигнал сбора, и птенцы, сбегаясь по этому сигналу, под материнскими крыльями находят защиту от дождя, обогреваются и издают сигналы комфорта — тихонько попискивают. Так ведут себя птенцы и родители в природе, таких же результатов добились и первые исследователи биоакустики птиц — Е. Гесс,

Дж. Готтлиб и Д. Миллер в своих экспериментах, не нашедших, однако, практического применения.

В 70-х годах работы по биоакустике были начаты орнитологами МГУ, и их результаты нашли применение в промышленном птицеводстве: с помощью звуковых сигналов удалось синхронизировать вылупление птенцов и автоматически выбирать цыплят из выводковых лотков инкубатора.

Казалось, что накопленный багаж знаний по биоакустике птиц и умению управлять их поведением в экспериментах — хорошая основа для планируемой нами работы по искусственному разведению дичи. Однако мы почти сразу же столкнулись с непредвиденными трудностями, хотя в первой серии опытов прекрасно подтвердились результаты, полученные первыми исследователями по орнитологической биоакустике. При подаче нескольких звуковых сигналов одиночным птенцам они приближались к источнику звука на призывные сигналы самки и комфортные сигналы птенцов. В других случаях птенец либо пытался сориентироваться, либо издавал сигналы дискомфорта, оставаясь на месте, а когда раздавались сигналы тревоги, он убежал и затаивался.

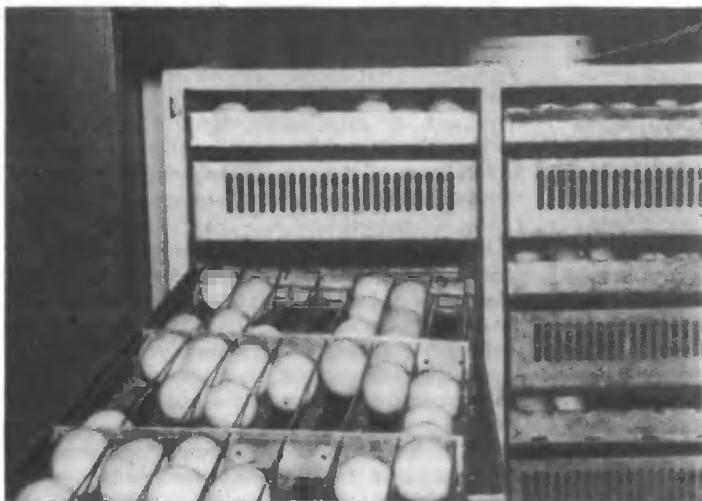
Но стоило нам увеличить число подопытных птенцов всего лишь до нескольких десятков, они упорно не замечали подаваемых сигналов. По-видимому, мы не соблюли важного условия, ведь самка созывает птенцов не из прихоти, а по необходимости. В природе комфортные условия птенцам создает самка, и те, потеряв мать из вида и не слыша ее голоса, испытывают дискомфорт. Естественно, как только мать издает призывные сигналы, они стремглав бросаются к ней. В искусственных же условиях комфортную обстановку птенцам создает человек. Находясь в тепле, сытые птенцы, совсем не знакомые с наседкой, не испытывают потребности следовать туда, откуда слышатся призывные сигналы. Зато одиночные птенцы уже из-за изоляции испытывают постоянный дискомфорт и потому так быстро и «правильно» реагируют на призывный голос самки и комфортные сигналы птенцов, раздающиеся из динамика. Вторая причина «неправильного» поведения птенцов в групповом эксперименте, очевидно, связана с тем, что птенцы знают не только голос матери, но и ее облик; только акустические сигналы являются для птенцов гораздо меньшим стимулом, чем одновременный зрительный образ и голос.



Оборудование на экспериментальной ферме по разведению дичи.

Инкубатор для кряковых уток. Наверху виден динамик, из которого незадолго до проклевывания подается голос наседки.

Только что вылупившийся утенок.



Утята буквально облепили динамик, когда из него раздался голос мнимой матери.

Заслышав сигнал тревоги, утята толпятся убежать.

В искусственных условиях птенцы не знают самки, они запечатлевают собратьев по выводку и человека, и, чтобы добиться от них правильного поведения, нужно, по-видимому, изменить методику эксперимента. Сами собой напрашиваются два пути: создать перед сбором птенцов дисконфортную для них обстановку или использовать движущееся звучащее чучело (конечно, можно обойтись, судя по нашим предварительным экспериментам, просто движущимся динамиком — именно за такой механической матерью устремлялись маленькие птенцы гусей, уток и фазанов).

Из этих двух способов более надежным нам казался первый — создать дисконфортные условия (убрав корм, воду или выключив освещение, обогреватели)

или проводить эксперименты по биоакустике в естественном дискомфорте (с наступлением темноты, во время ненастья). Как только птенцы почувствуют себя неудобно, они начнут беспокоиться и издавать сигналы дискомфорта, а потому их можно будет легко собрать к источнику звука, стоящему в закрытом помещении и издающему призывные и комфортные сигналы.

Наши предположения полностью подтвердились в экспериментах. Одинаково хорошо действовали искусственно созданные условия дискомфорта и сигналы мнимой матери на птенцов разных видов выводковых птиц. Более того, не обязательно было даже проигрывать запись с голосом наседки, его можно было заменить моносигналом, важно только, чтобы частот-



ные и временные параметры совпадали. Мы определили наиболее эффективные для отклика на них птенцов диапазоны частот моносигналов 9 видов птиц (серого и белого гуся, канадской и краснозобой казарки, сухоноса, кряквы, фазана, японского перепела и лысухи) и включали такие сигналы начиная с однодневного возраста птенцов, чтобы приучить их к сбору. Если опоздать с первым звуковым уроком, малыши усвоят только голоса друг друга и на все другие звуки не будут отвечать нужной реакцией.

Призывные и комфортные сигналы, как выяснилось, обладают, помимо привлекающего действия, еще одним важным свойством: они делают птенцов довольными и спокойными, повышается их пище-

вая активность, снижается число драк. А это, в свою очередь, отражается на росте и развитии птенцов — увеличиваются суточные привесы, лучше развивается оперение, многочисленные птенцы растут дружно, не отставая друг от друга.

Так с помощью простых средств мы научились по сигналу собирать птенцов, управлять их поведением было несложно. До месячного возраста (поры, когда птенцов выпускают в природу) особых затруднений с ними не было. Стало быть, мы могли передать свои рекомендации в охотничьи хозяйства.

Интересно, что мы нашли способ автоматическим образом управлять поведением птенцов и создавать необходимые экспериментальные условия. С помощью специальной

звукоанализирующей аппаратуры мы, к своему удивлению, обнаружили, что разные на слух призывные и комфортные сигналы птиц имеют много сходства по их физическим параметрам: ритмической организации отдельных звуков в серии, низкой интенсивности звучания, сходных форм частотной модуляции. Для уточнения полученных результатов мы провели также анализ других сигналов — бедствия и дискомфорта — и убедились, что никакой ошибки не было. Эти сигналы и на слух, и по структуре отличались от призывных и комфортных, различались они и между собой.

Значит, с помощью звукоанализатора по издаваемым птенцами звукам можно определить, в плохом или хорошем состоянии они находятся, и принять меры для создания той обстановки, которая нужна для эксперимента. Технически достаточно легко весь процесс управления жизнью птенцов в неволе (даже не в лаборатории, а и в охотничьих хозяйствах) в течение первого месяца их жизни сделать автоматическим. Для этого нужно, чтобы в ответ на расшифрованные звукоанализатором сигналы птенцов включалась та или иная аппаратура, создающая необходимые условия (например, комфортные) и одновременно с этим из динамика подавались призывные или комфортные сигналы. Пока автоматизация была делом будущего, а перед нами по-прежнему стояла задача вырастить птенцов дикими, не дать им возможности привыкнуть к человеку, сохранить у них природную осторожность. Надо было научиться направленно формировать поведение птенцов.

Выращенные людьми, они обычно «не знают» что такое опасность, становятся легкой добычей пернатых хищников, бродячих собак, лисиц, а охотник с ружьем (ведь мы выращивали птичий молодец для спортивной охоты) для них тот же человек, которого они постоянно встречали на птичьей ферме. Естественно, что столь неосторожные птицы, выпущенные в естественные биотопы, во множестве погибали, а доживших до охотничьего сезона легко отстреливали любители спортивной охоты в первые два-три дня.

Иногда поведение выращенной в неволе дичи доходит до анекдотического. Четыре года назад в озеро Мощное Владимирской области выпустили месячных утят, выведенных в специальных клетках с бассейнами (надо сказать, что при клеточном содержании птицы вырастают даже более ручными, чем при вольтерном). Утята

искупались после нелегкой дороги, вышли на берег и расположились рядышком с выпустившими их людьми. Но когда машина с людьми отправилась в обратный путь малыши дружно запищали, выстроились гуськом и побежали за ней. Пришлось вернуться, проводить утят подальше вдоль берега озера и незаметно уехать. Однако еще в день выпуска большинство утят, ориентируясь на голоса людей, доносившиеся из деревни, переплыли озеро и пришли на ее окраину, к немалому удивлению жителей. Хотя описанный случай и не относится к систематическим, он ярко иллюстрирует, сколь глубокою привязанность к человеку приобретают птицы, выведенные в неволе.

Но как же все-таки вырастить птиц дикими? Исходя из современных знаний по этологии, вскоре после вылупления у птенцов запечатлевается образ матери, они прочно запоминают ее очертания, цвет, голос, достаточно им увидеть ее единственный раз. С этой поры птенцы всюду следуют за ней и послушно исполняют ее команды. Появившись на свет в искусственных условиях, птенцы с первых же часов жизни видят людей, ухаживающих за ними, слышат их голоса, естественно, запечатлевают человека и потом воспринимают его как собственную мать. Возникает парадоксальная ситуация: чем больше заботы проявляет человек о птенцах, тем большей медвежьей услугой она оказывается в их дальнейшей жизни.

Значит, чтобы вырастить диких птиц, нужно ограничить контакт людей с птенцами, сделать его минимальным. Именно это условие мы соблюдали в целой серии опытов, но простым снижением числа контактов нам не удалось сформировать дикий стереотип поведения краковых уток. И все же выход был найден, и оказался он довольно простым. В период запечатления птенцы совсем не должны видеть людей, а за все время их пребывания в вольтерах им необходимо 4—5 раз создать паническую ситуацию, воспроизведя запись криков бедствия, звуки выстрелов и сирен при одновременном появлении человека.

Такой подход мы и использовали при выращивании небольшой партии уток — 130 особей. На сей раз они не оказались ручными утятами; как только их выпустили из транспортировочных ящиков, они стремглав бросились в прибрежные заросли и спешно уплыли. Периодически мы наблюдали за своими подопечными и выяснили, что те вполне сохранили природную осторожность: они боялись хищни-



Переключка петухов в вольерах фермы: тетерева (слева) и глухарь начали токовать в ответ на брачную песню сородича, раздавшуюся из звуковой колонки.

ков, быстро скрывались от них и затаивались в укрытиях, а осенью оказались нелегким трофеем для охотников. Таким же способом и с теми же результатами были проведены эксперименты на крупных утиных фермах.

Чтобы наладить разведение дичи в охотничьих хозяйствах, недостаточно только уметь выращивать птенцов, нужно иметь племенное стадо с высокой репродуктивной способностью. Добиться этого тоже помогает биоакустика. В брачный период самец обычно исполняет песню, назначение которой не только привлечь самку. Своим пением он стимулирует ее брачное поведение, оповещает всех, что территория, на которой он распевает, занята, а при обучении молодых птиц (по крайней мере воробьиных) его песня служит образцом для подражания, по ней молодые выучиваются языку родителей. Известна также звуковая индукция, свойственная многим видам птиц. Этим термином А. С. Мальчевский назвал всем известную переключку петухов: самец белой куропатки отвечает на «хохот» своего соперника, на брачный крик фазана откликаются его сородичи, а зяблик начинает петь в ответ на воспроизведенную запись песни, характерной для данного вида.

Очевидно, песня может стимулиро-



вать размножение птиц в неволе, и это было бы особенной удачей в разведении тетеревов, рябчиков, глухарей, которые в неволе размножаются плохо. Свой несложный эксперимент мы начали хмурым апрельским днем. Наохлившись сидели в клетках тетерева: в такую погоду, да еще днем они не токуют даже в природе. Но стоило раздаться чужьяканью и бормотанью из звуковой колонки, тетерева мигом насторожились, прислушались, спрыгнули с жердочек и, распутив веером хвосты, принялись токовать.

Эксперименты по стимуляции размножения и получению племенного стада птиц продолжают, нам предстоит решить еще много вопросов: чьи сигналы (самцов или самок) и какие (токовые или предкопуляционные) наиболее эффективны, как влияет звуковая стимуляция на яйценоскость, меняется ли морфология яиц при стимулирующем эффекте. Многие нам уже стало ясно, а результаты акустического стимулирования оказались несколько неожиданными — их действие было сильнее брачной песни самцов на свободе: повысилась их брачная активность, увеличилось количество оплодотворенных яиц. Кроме того, при акустической стимуляции птицы раньше, чем в природе, начали откладывать яйца.

Мы надеемся, что дальнейшие исследования по орнитологической биоакустике и разработка методов управления поведением птиц, выращенных в питомниках для разведения дичи, пополнят научный багаж, а практическое применение знаний позволит сохранить и даже обогатить орнитофауну нашей страны.

## Утерянный остров Плиния

И. Т. Черняков



Иван Тихонович Черняков, кандидат исторических наук, заведующий сектором новостроечных экспедиций отдела археологии Северо-Западного Причерноморья Института археологии АН УССР. Занимается проблемами древнейшей истории и археологии Северо-Западного Причерноморья, руководил археологическими экспедициями Одесского археологического музея АН УССР, Института археологии АН УССР. Автор книг: Курганы степной части междуречья Дуная и Днестра (в соавторстве с Н. М. Шмаглием). — Материалы по археологии Северного Причерноморья, вып. 6. Одесса, 1970; Найден город. Одесса, 1977.

Письменная история бассейна Черного и Средиземного морей чрезвычайно длительна, она уходит в глубь II тысячелетия до н. э. В ней зафиксированы не только история племен и народов или история мореплавания, но и изменение береговой линии, появление и исчезновение островов.

Факты, когда морские воды затопляли прибрежную часть античных городов Северного Причерноморья вместе с древними гаванями и причалами для кораблей (Ольвия, Херсонес, Фанагория и др.), ныне общеизвестны. 2,5 тыс. лет назад береговая линия находилась ниже современной на несколько метров. Археологические же данные по Северо-Западному Причерноморью обычно используются мало, хотя именно здесь, на мелководье, изменение уровня моря было наиболее существенным, о чем свидетельствуют многочисленные лиманы, образовавшиеся в устьях затопленных рек. Между тем такие изменения фиксируются и в письменных источниках, примером чему является любопытное сообщение Плиния.

Гай Плиний Секунд Старший (23/24 — 79 гг.) — известный римский историк и географ, автор огромного труда, называемого «Естественной историей», в котором собраны богатейшие данные по географии всего известного античной науке Старого Света, в том числе и Северного Причерноморья.

При описании низовьев Днестра (в древности — р. Тира) Плиний утверждает, что здесь находился остров: «За Истром же (древнее название Дуная. — И. Ч.) находятся города Кремниски и Эполий, горы Макрокремны, известная река Тира, давшая имя городу на том месте, где, как говорят, прежде была Офиусса (ныне г. Белгород-Днестровский. — И. Ч.); обширный остров на этой реке населяют тирагеты; он отстоит от Псевдостомы, устья Истра, на 130 миль»<sup>1</sup>.

О каком же острове в низовьях Днестра пишет Плиний? Как известно, в настоящее время здесь нет никаких островов. Но известно, что Плиний отличался особой любознательностью, за что и поплатился жизнью, когда наблюдал извержение Везувия 25 августа 79 г., засыпавшего Помпеи и Геркуланум. При описании Северного Причерноморья он пользовался не только трудами других ученых, но и сведениями, полученными от наместников провинции Мезии, большая часть которой находилась в пределах современной Болгарии, меньшая — Румынии, от военачальников римских эскадр, посещавших Тиру, Ольвию, Херсонес. Известно, что он вел беседы

<sup>1</sup> Цит. по: Скрижинская М. В. Северное Причерноморье в описании Плиния Старшего. Киев, 1977, с. 95.

с пленным царем Боспора Митридатом — потомком известного Митридата Евпатора. Не доверять Плинию нет никаких оснований.

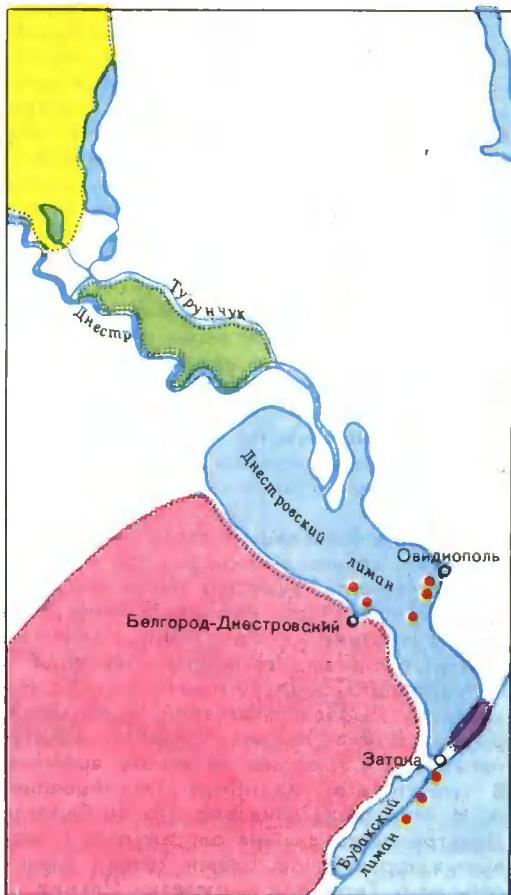
Днестр — одна из крупнейших рек, впадающих в Черное море. Его устье находится не у берега моря, а в верховьях Днестровского лимана — обширного водного бассейна, глубоко впадающего в сушу. Недалеко от устья Днестра с восточной левой стороны в него впадает р. Кучурган. В цепи прибрежных лиманов Северо-Западного Причерноморья Днестровский лиман является одним из крупнейших пресноводных бассейнов: длина его осевой линии — 42,5 км, максимальная ширина — 12 км, минимальная ширина — 4,2 км, площадь 360—408 км<sup>2</sup>, объем воды — 673—733 млн. м<sup>3</sup>. Отличает его от других лиманов необычная мелководность: максимальная глубина — 2,7 м, средняя глубина — 1,8 м.

Сообщение Плиния об острове в низовьях Днестра давно привлекало внимание специалистов, с тех пор как начали изучать труды древних ученых, и вот уже почти 200 лет идет спор о локализации упоминаемого им «острова тирагетов».

Одним из первых пробовал найти этот остров путешественник XVIII в. К. Пейсонель, который, ознакомившись с низовьями Днестра, отождествил остров Плиния с пространством между Турунчуком и Днестром. В XVIII—XIX вв. переводчики и комментаторы трудов Плиния И. Гардуни, Г. Бротнер, И. И. Потоцкий, Ф. Укерт, К. Нойман то отождествляли его с островом Тендрой в Черном море, то соглашались с Пейсонелем.

В середине XIX в. Э. Г. Муральт высказал другую точку зрения. «Древний «остров тирагетов», перед устьем Днестра, или Тираса, ныне составляет косу, пересекаемую двумя каналами, служащими для истока воды лимана»<sup>2</sup>. Действительно, вплоть до 1926 г. Днестровский лиман соединялся с морем не одним гирлом, как сейчас, а двумя: у современного села Затока, в юго-западной части лимана было (и осталось) Цареградское, или Стамбульское, гирло, а у Каролино-Бугаза, в его восточной части — Очаковское гирло, ныне занесенное песком.

Профессор Новороссийского университета Ф. К. Брун для поиска «острова тирагетов» решил использовать данные археологии. В 1846 г. на левом берегу Днестра



Нижний Днестр и Днестровский лиман с местами различных предполагаемых локализаций «острова тирагетов».

#### Местоположение «острова тирагетов»:

- по К. Пейсонелю
- по Э. Г. Муральту
- по Ф. К. Бруну
- по Л. А. Ельницкому

Места расположения древних поселений, открыты археологической экспедицией под водой в 1983 г.

у с. Коротного была найдена мраморная плита с надписью, которая содержала рескрипты римских императоров гражданам Тире. Поэтому он отождествил остров Плиния с обширным пространством между реками Кучурганом и Днестром. Мнение Бруна поддержал В. И. Григорович, однако

<sup>2</sup> Муральт Э. Г.— Зап. Санкт-Петерб. археол.-нумизмат. об-ва, 1850, т. 2, с. 132.

для подтверждения гипотезы он произвел ничем не обоснованную палеогеологическую реконструкцию этого района, согласно которой нижняя часть Кучургана в древности будто бы была рукавом Днестра. Немецкий же исследователь К. Мюлленгоф считал «остров тирагетов» выдумкой Плиния. Примерно к такому же выводу пришел и советский ученый Л. А. Ельницкий: островом, считает он, Плиний, по примеру других древних авторов, именует пространство между двумя реками и морем, т. е. между речью Дуная и Днестра<sup>3</sup>. На этом, пожалуй, спор об «острове тирагетов» и был бы закончен, если бы не недостаточность — в XIX в. — археологических изысканий в этом районе, что позволило ученым сомневаться даже в местоположении древнего г. Тиры, о существовании которого говорят многие древние источники, надписи, монеты.

В 60-е годы нашего столетия начались активные археологические работы в низовьях Днестра. Успешно проведены раскопки древней Тиры, начаты раскопки древнего г. Никония у с. Роксоланы, Надлиманского городища, гетского поселения у с. Пивденного, скифского поселения у с. Николаевка и ряда поселений в верховьях Днестровского лимана, открыты десятки поселений и городищ античного времени. В результате подобных исследований А. И. Мелюкова доказала, что по берегам Днестровского лимана расселилось в свое время фракийское племя гетов. Значит, геты на р. Тире, или «тирагеты» Плиния, — не выдумка. Об их присутствии там свидетельствуют и находки гетской керамики, в частности на поселении у с. Пивденного.

Следующий этап поисков «острова тирагетов» связан с именем молодого археолога М. В. Агбунова. Он решил проверить некоторые сообщения древних авторов, в том числе и Плиния, по средневековым картам. Должны же были там остаться какие-то следы исчезнувших ныне островов? Его поиски увенчались успехом. На карте венецианского картографа Фра Мауро, составленной в 1459 г., Днестровского лимана вообще не существует, а Днестр двумя рукавами впадает непосредственно в Черное море. Средневековые итальянские географы были хорошо знакомы с Северным Причерноморьем вообще и с районом Днестровского побережья в частности. Это естественно: известно, что на месте древ-

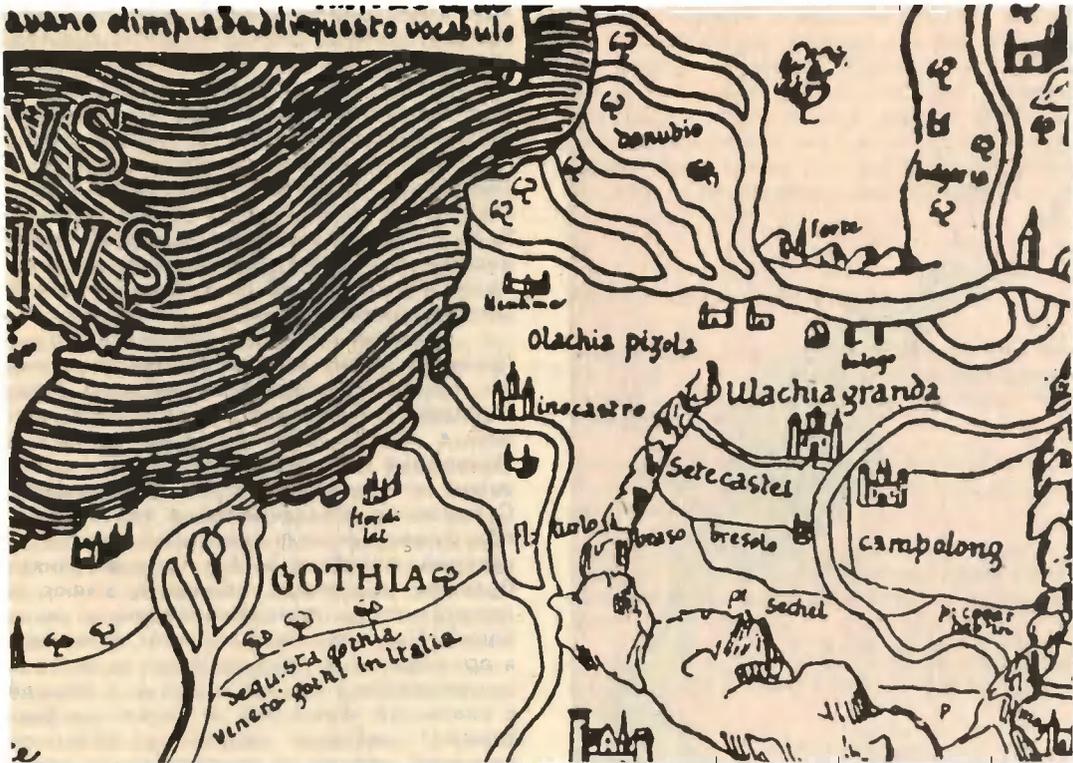
нерусского города Белгорода после монголо-татарского нашествия была создана генуэзская колония Монкастро. На карте Фра Мауро обозначен город Монкастро, а напротив него — на острове между двумя рукавами Днестра — какой-то замок или укрепление. На карте России Г. Фация, отпечатанной в Бонне в 1769 г. и составленной на основе ранних источников, уже показан Днестровский лиман, в центре которого, однако, также находится остров. Так же выглядит Днестровский лиман — с небольшим островом — и на карте в атласе русского адмирала петровских времен Корнелия Крюйса. Все эти карты логически как бы отражают этапы повышения уровня воды в Черном море, постепенного затопления устья и долины нижней части Днестра, образования Днестровского лимана.

Для решения вопроса о существовании в низовьях Днестра острова интересны данные дали и геологические исследования. В результате буровых работ в низовьях лимана установлено, что толща илов лиманного происхождения в среднем равна примерно 6 м. Дно лимана оказалось не идеально ровным, а со значительным повышением в его средней части.

Все свидетельствовало о том, что в самом деле остров Плиния следует искать на дне Днестровского лимана, которое является затопленным островом. Нужны были лишь непосредственные «свидетели» существования острова — археологические памятники, следы материальной жизни людей — островитян, о которых писал Плиний. Некоторые данные о существовании остатков поселений на дне лимана были получены случайно. Так, несколько лет назад при раскопке земснарядом траншеи по дну лимана между Белгородом-Днестровским и Овидиополем вместе с илом на поверхность были выброшены обломки амфор, лепной посуды, мелкие камни. Если амфоры могли попасть в лиман при крушении древнего торгового судна, то обломки лепной посуды (кухонных горшков) могли быть только на поселении, в домах его жителей. Летом 1982 г. при углублении дна для улучшения фарватера к Белгород-Днестровскому порту в 7 км южнее порта земснаряд обнаружил остатки еще одного поселения IV—III вв. до н. э.

Специальные подводные археологические исследования на Днестровском лимане пробовали организовать еще в 60-х годах В. Д. Блаватский и С. Д. Крыжицкий. Правда, целью этих экспедиций были не поиски «острова тирагетов», а обследование прибрежной части античных городов

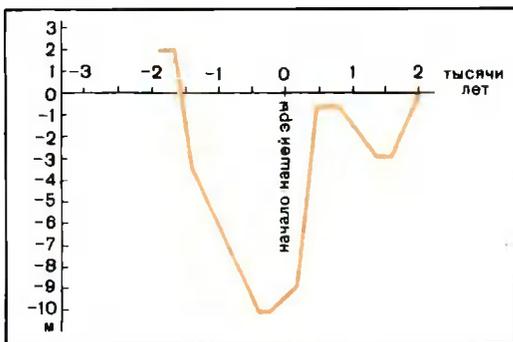
<sup>3</sup> Ельницкий Л. А. Знания древних о северных странах. М., 1961, с. 161.



Часть карты венецианского картографа Фра Мауро, составленной в 1459 г., показывающей расположение острова между двумя рукавами в нижнем течении Днестра. На карте обозначен г. Монкастро (Minocastro, современный Белгород-Днестровский) и укрепление (замок, город!) на острове.

Тыры и Никония на предмет существования там древних портовых сооружений. Вода в Днестровском лимане при его небольшой глубине даже при малом волнении очень мутна. Поэтому визуальные обследования дна аквалангистами не дают значительных результатов и в том случае, если археологические объекты не занесены илом. С учетом этого была сделана попытка провести разведку с помощью гидролокатора. Она показала места инородных затопленных объектов под слоем ила, представлявших, вероятно, скопления камней от разрушенных построек. В 1983 г. Институтом археологии АН УССР, Одесским археологическим обществом и Одесской областной организацией Украинского общества охраны памятников истории и культуры был организован специальный подводный археологический отряд для обследования древних поселений на предполагаемом острове на дне Днестровского лимана.

Кроме обычного снаряжения водолазами-подводниками и аквалангистами для подводных буровых работ был использован плот с двумя якорями, лодки, трубы. Надводная поверхность на месте разведки предполагаемых поселений разбивалась на



Изменения уровня Черного моря (по данным К. К. Шилика, 1975).



Реконструкция «острова тирагетов» Плиния и археологические памятники на нем, относящиеся к I тысячелетию до н. э.

-  Поселения
-  Городища
-  Курган
-  Вали

квадраты, обозначенные на воде буйками с красными флажками. Сначала производилось подводное обследование дна водолазами и аквалангистами, затем с плота забивались трубы, с помощью которых извлекали керны. Трубы сравнительно легко проходили слой ила, достигая коренного дна. Пробурено более сотни скважин на каждом из поселений. На месте бывших поселений на острове в кернах находились обломки

керамики, мелкие камни, угольки, зола, специфически окрашенный слой культурной почвы, имеющий особую структуру. Сомнений не оставалось: на дне Днестровского лимана под слоем ила лежат остатки поселений древних жителей острова. Конечно, бурение территории поселений можно сравнить с булавочными уколами. Таким способом трудно выявить что-нибудь существенное даже на открытой поверхности. Однако факт наличия культурного слоя поселений и их границы можно считать установленным.

Другим районом работ стала прибрежная часть моря в районе курортов у с. Сергеевка вдоль песчаной косы, отделяющей Шаблатский лиман, примыкающий с запада к Днестровскому лиману. Подводные работы здесь проводить легче: лучше видимость и нет иловых наносов. С помощью аквалангистов в этом районе обнаружены остатки трех затопленных поселений на глубине 3—4 м. Со дна поднято большое количество обломков амфор и лепной посуды, установлены границы поселений. Судя по керамике, эти поселения в приморской полосе «острова тирагетов» существовали в IV—III вв. до н. э. Наряду с окатанной керамикой на поселении Виктория-II найдены скопления обломков глиняной посуды с хорошо сохранившимися сколами. Это свидетельствует о том, что здесь — культурный слой древнего поселения, который еще до конца не размыт.

Накопленные археологические данные, изучение геологии дна Днестровского лимана позволяют в настоящее время точно локализовать древний остров в низовьях Днестра. Он находился между двумя его рукавами, которые, очевидно, разделялись в районе впадения в Днестр Кучургана вблизи современного с. Троицкого. В северной части правый западный рукав Днестра, по всей видимости, совпадал с современным руслом Днестра. Левый восточный рукав — это, по-видимому, нынешняя протока Турунчук, которая отделяется от основного русла ниже Чобручи Молдавской ССР и впадает в Днестр ниже с. Беляевка. Этимология этого гидронима, по мнению специалистов, связана с древнейшим названием Днестра — Тира, измененная форма которого «Турла», «Турулчук» употребляется на средневековых картах, в том числе и на упоминавшейся карте Фра Мауро. Западный рукав проходил мимо современного с. Паланка вдоль коренного берега до с. Шабла, ниже которого он поворачивал на запад. Остатками древнего русла

западного рукава является Будаковский (Шаболатский) лиман. Восточный рукав Днестра от Беляевки тянулся вдоль коренного берега Днестровского лимана и впадал в море, вероятно, на месте бывшего Очаковского гирла. Дельтовый остров, заключенный между двумя рукавами Днестра, действительно, как писал Плиний, был обширным: длина — 60—70 км, ширина — 4—16 км и существовал со II тысячелетия до н. э. до средневековья. Рукав Днестра в древности был более глубоким, чем сейчас. Это соответствует и описаниям древних авторов. Так, Псевдоарриан писал: «Эта река Тира, будучи глубока... доставляет торговцам много рыбы на продажу и безопасна для плавания грузовых судов. На ней лежит соименный ей город Тира, колония милетян»<sup>4</sup>. Античные источники не сообщают подробных данных о заселении острова в низовьях Днестра. Но практика заселения островов в дельте больших рек была довольно распространенной: известны сообщения о заселении о-ва Певка в устье Дуная, о-ва Алопекия в устье Танаиса (Дона). Плодородные земли, богатые пастбища, прекрасные условия для рыболовства и относительная безопасность, несомненно, привлекали население.

Судьба «острова тирагетов» в устье Днестра всецело связана с изменением

<sup>4</sup> Цит. по: Латышев В. В. — Вестник древней истории, 1948, № 4, с. 236.

уровня Черного моря. На рубеже нашей эры началась так называемая нимфейская трансгрессия моря. Однако в XIV—XV вв. его уровень понизился, это привело к увеличению острова в дельте Днестра, зафиксированного на карте Фра Мауро. Затем воды Черного моря затопили устье Днестра и расположенный там остров.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

**Агбунов М. В.** О ЛОКАЛИЗАЦИИ ОСТРОВА ТИРАГЕТОВ. — В кн.: Новые исследования археологических памятников на Украине. Киев: Наукова думка, 1977.

**Агбунов М. В.** МАТЕРИАЛЫ ПО АНТИЧНОЙ ГЕОГРАФИИ ПРИЧЕРНОМОРЬЯ. — Вестник древней истории, 1983, № 2.

**Брун Ф. К.** ЧЕРНОМОРЬЕ. Ч. I. — СБОРНИК ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИСТОРИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФИИ ЮЖНОЙ РОССИИ (1852—1877). Ч. I. Одесса, 1879.

**Скрижинская М. В.** СЕВЕРНОЕ ПРИЧЕРНОМОРЬЕ В ОПИСАНИИ ПЛИНИЯ СТАРШЕГО. Киев: Наукова думка, 1977.

**Федоров В. П.** ПОСЛЕЛЕДНИКОВАЯ ТРАНСГРЕССИЯ ЧЕРНОГО МОРЯ И ПРОБЛЕМА ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ОКЕАНА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 15 ТЫСЯЧ ЛЕТ. — В кн.: Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М.: Наука, 1982.

#### НОВЫЕ КНИГИ

##### Археология

**НАСЕЛЕНИЕ И КУЛЬТУРА КРЫМА В ПЕРВЫЕ ВЕКА Н. Э.** Сб. научн. трудов. Отв. ред. Т. Н. Высоцкая. Киев: Наукова думка, 1983, 157 с., ц. 1 р. 80 к.

Большинство статей этого сборника посвящено скифской культуре. Анализируются особенности и традиционные элементы позднескифского времени, рассматривается проблема влияния на эту культуру греков и сарматов. Так, в некрополе Неаполя Скифского и грунтовых могильниках юго-за-

падного Крыма встречаются типично сарматские вещи (зеркала-подвески, лепные курильницы, бусы из стекла, пасты и галата) наряду с собственно скифскими (крючками и пряжками для портупей, конской сбруей и лепной посудой).

Вместе с тем в первые века н. э. среди крымского населения получили широкое распространение новые — греческие — аксессуары одежды. На двух рельефах, найденных в Неаполе Скифском, изображены фигуры в традиционных для скифских царей войлочных остроконечных шапках, но поверх

рубах, по греческому обычаю, накинута плащи, один из которых скреплен на плече греческой фибулой.

Ряд статей сборника посвящен анализу гибели в IV в. скифского государства, под эгидой которого находились поселения, территориально тяготевшие к Херсонесу.

Книга адресована историкам, археологам и этнографам, а также всем читателям, интересующимся историей мировой культуры.

## Одна из хибинских проблем

Э. Б. Красносельский



Эрнест Борисович Красносельский, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Горного института Кольского филиала АН СССР. Изучает физические свойства снегородных смесей и физико-технические особенности отвалов, создаваемых при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в сложных орорафических и гляциоклиматических условиях. Автор монографии: *Отвалы на горных склонах*. Л., 1975.

Центр тяжести в добыче многих видов минерального сырья в нашей стране все больше смещается в районы Севера и Сибири, отличающиеся суровыми природно-климатическими условиями и сложным рельефом. Одним из таких районов является Кольский п-ов, где в Хибинских горах, наряду с другими полезными ископаемыми, добывают камень плодородия — апатит.

Разработку апатито-нефелиновых месторождений здесь уже более 50 лет ведет производственное объединение «Апатит» им. С. М. Кирова. За это время во много раз выросло количество добываемого апатита (с 100 тыс. т. в 1929 г. до 46 млн т в 1980 г.), коренным образом изменилась техника и технология его добычи. Как и в первые годы, апатитовая руда извлекается преимущественно открытым способом, путем разработки все более крупных карьеров, но только на более высоком научно-обоснованном техническом и технологическом уровне с применением мощной горнодобывающей техники.

Но много еще труда, интуиции, таланта и смелости надо вложить в дело промышленного использования богатств Хибинских тундр.

А. Е. Ферсман

В начале 60-х годов в объединении был создан Центральный рудник, производительность которого должна была достигнуть рекордной величины — 12 млн т в год. В первый же год работы на нем возникли неожиданные трудности. Оказалось, что отвалы породы вокруг гигантского карьера этого рудника как бы ожили и начали постепенно сползать с высоких и крутых горных склонов. Работа на движущихся отвалах запрещена. Стало некуда вывозить вскрышную породу. Это грозило сорвать планы развития рудника.

Что же здесь произошло? Понять это невозможно, не представляя себе особенностей открытого способа добычи полезных ископаемых в условиях горного рельефа и повышенного накопления снега.

### ОТВАЛЫ НА ГОРНЫХ СКЛОНАХ

Где бы ни находился карьер, прежде чем начать разработку рудного тела, сле-

дует удалить покрывающие его породы, т. е. необходимо вскрыть месторождение. Объем этих пород, называемых вскрышными, превышает объем извлекаемой руды по меньшей мере в 1,5 раза, но может превысить его и в 10 раз. Вскрышную породу обычно вывозят за пределы проектного контура карьера, чтобы не отрабатывать ее вторично. Поэтому при открытой разработке полезных ископаемых возникает необходимость складирования за пределами карьера больших объемов вскрышной породы. В равнинной местности средней полосы и юга нашей страны сделать это сравнительно просто. Имеется опыт формирования отвалов и в горных условиях, но и он относится к средним и южным широтам. Если же говорить об открытой разработке месторождений в горных условиях Севера, и в частности в Хибинах, то, как показала практика, это уникальная по сложности задача.

Природа распорядилась так, что рудное тело апатитовой залежи, вскрытой гигантским карьером Центрального рудника, выходит прямо на вершину плато Расвумчорр. Абсолютная высота его равна 1050 м, а относительное превышение над прилегающими долинами составляет 200—400 м на юге и 300—600 м на севере. Крутизна склонов в верхней части плато достигает до 70°.

Гляциоклиматические условия здесь весьма суровы: зима — 8 мес. в году, средняя сумма твердых осадков — 1000 мм, толщина снежного покрова — 3—3,5 м, а в отдельных местах и 6 м. Скорость ветра временами превышает 40 м/с, вызываемый ветром метелевый перенос снега составляет за зиму около 1200 м<sup>3</sup> через погонный метр фронта. Среднегодовая температура воздуха — минус 5,4 °С, средняя температура зимнего периода — минус 10 °С. Из-за сурового климата плато Расвумчорр иногда называют Малой Антарктидой.

Площадь сосредоточенного здесь рудного тела оказалась настолько велика, что проектный контур карьера охватил всю поверхность плато и даже вышел на его северные склоны. Для размещения десятков миллионов кубометров вскрышной породы не осталось иного места, кроме высоких и крутых склонов гор.

В 1964 г. карьер Центрального рудника выдал первые тонны апатитовой руды. А летом 1965 г. было обнаружено, что отвалы на горных склонах не просто деформировались за счет уплотнения, а пришли в движение. Временами они сползали со



На опорах ЛЭП на плато Расвумчорр нарастает изморозь толщиной более двух метров. Поэтому обычную ЛЭП здесь пришлось заменить кабельным каналом.

скоростью до 100 см в сутки! При этом насыпная часть рабочей площадки отвала, а проще, ее поверхность, приобрела ступенчатую форму. Работа автотранспорта сделалась невозможной, так как на выравнивание площадок порой уходила половина рабочего времени. Задерживался вывоз вскрышной породы из карьера, задерживалась и добыча руды. Пришлось срочно создавать отвалы в других местах. Работа рудника, казалось бы, наладилась. Но уже через год почти все склоны, окружающие плато Расвумчорр, были заняты отвалами. А еще через год, летом 1967 г., один из отвалов обрушился. Стало ясно, что работать на движущихся отвалах опасно. Нужно было срочно искать какой-то выход. Ни в отечественной, ни в зарубежной практике не имелось опыта формирования отвалов в подобных условиях. Перед Горным институтом Кольского филиала АН СССР была поставлена задача: разработать безопасную и эффективную технологию формирования отвалов в сложных условиях горного рельефа и повышенного накопления снега. В институте была создана специальная межлабо-



Таковыми ступенями деформируется рабочая площадка отвала на горном склоне. Каждая ступенька — однородный слой отвальной массы. Автосамосвалы по такому отвалу перемещаться не могут.

раторная группа, которая приступила к комплексным исследованиям, в той или иной мере касающимся безопасности работы на высоких заснеженных отвалах.

Выводы оказались неожиданными. Выяснилось, что причина всех неприятностей — снег. С одной стороны, он может приводить к возникновению снежных лавин внутри карьера, а точнее, на его нерабочем борту, имеющем небольшие предохранительные площадки — бермы. В условиях Хибин бермы быстро сглаживаются снегом, и его избыток в виде лавины может обрушиться в карьер. С другой стороны, перемешиваясь с породами, снег каким-то образом влияет на состояние самих отвалов.

### ЛЕДЯНАЯ МАГМА

Отвалы хибинских нагорных карьеров обладают своей спецификой. Во-первых, их

высота на горных склонах увеличивается очень быстро. Во-вторых, тело каждого отвала состоит из слоев, в которых содержание снега изменяется от 0 до 100 %, т. е. слои чистой породы могут чередоваться со слоями или линзами чистого снега, уплотненного до состояния фирнового льда.

Свойствами этой образовавшейся в теле отвала снегопородной смеси и определяются все специфические особенности высоких заснеженных отвалов на горных склонах. По определению гляциолога П. А. Шумского, снег — это осадочная ледяная порода, находящаяся в условиях Земли в магматическом состоянии. Твердое тело в таком состоянии имеет, как известно, температуру, близкую к точке его фазового перехода в жидкое состояние. Любой металл, температура которого на 5—10° ниже температуры его плавления, обладает ярко выраженными вязкопластическими свойствами. При этом, чем ближе к точке плавления, тем быстрее релаксируют (снимаются) возникающие в этом твердом теле напряжения, что, в свою очередь, ведет к увеличению скорости пластической деформации, т. е. деформации



Разгрузка 108-тонного автосамосвала непосредственно на откос отвала через его предохранительный вал.

скольжения. С приближением к температуре плавления быстро изменяются и физические свойства твердого тела, в данном случае снега.

Для условий средней полосы и юга нашей страны существует неоспоримое правило, запрещающее ссыпать снег в отвалы, поскольку тающий снег ослабляет связи между частицами породы. Но в условиях Хибин с их обильными снегопадами этот запрет практически теряет смысл. Зато снег здесь почти не тает, а если и тает, то при особых обстоятельствах. Снег в хибинских отвалах не только не снижает, но даже увеличивает их прочностные характеристики. Увеличение содержания снега в породе от 0 до 20 % повышает сопротивление сдвигу на 35—50 % в условиях постоянной отрицательной температуры. В этих же условиях сопротивление сдвигу в определенных пределах пропорционально вели-

чине нормальной нагрузки на исследуемый горизонт.

В результате собственных наблюдений в Антарктиде гляциолог В. М. Котляков выявил, каким образом плотность метелевых отложений снега зависит от скорости ветра. Аналогичная зависимость наблюдается и в Хибинах, где скорость ветра, достигая 40—60 м/с, обуславливает возможность максимального заполнения снегом пор отвальной породы и максимального уплотнения метелевых отложений.

Формирование отвалов при различных типах погоды определяет количество снега и запас холода, который «консервируется» в отвалах, а они, в свою очередь, определяют температуру снегородной смеси, слагающей отвалы. В хибинских отвалах в результате внутреннего теплообмена между зимними и летними слоями устанавливается средняя температура снега от  $-1$  до  $-3$  °С. Поэтому снег в отвалах постоянно находится в пластическом состоянии.

Зависимость прочностных характеристик мерзлых грунтов от их температуры отмечал еще в 1951 г. в одной из ран-

них своих работ известный советский горняк П. И. Мельников, который обратил внимание на то, что понижение температуры мерзлого грунта абзизи 0 °С всего на 1—3° в несколько раз повышает его прочность. Эта зависимость была обнаружена во влажном промерзшем грунте. В отвальной породе, где снег распределен крайне неравномерно, степень «цементации» породы снегом в разных условиях различна.

Наши наблюдения показали, что при изменении температуры снегородной смеси существенно меняются ее проч-

ности высоких заснеженных отвалов на горных склонах, и в частности их скольжение.

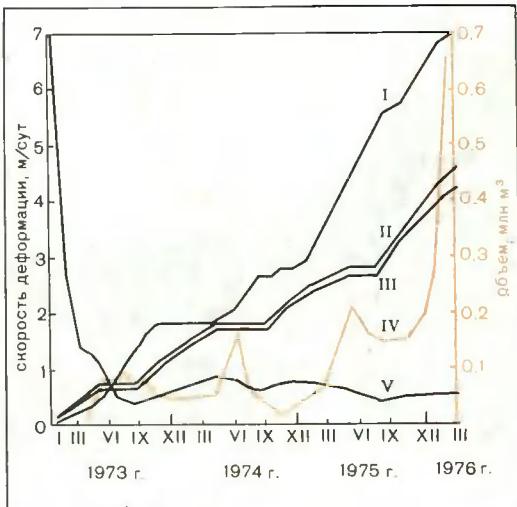
### ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ

Наблюдения за движущимися по горным склонам отвалами показали, что скорость их деформации развивается монотонно и непрерывно. При этом кривые, характеризующие скорости деформации разных отвалов, сходны между собой. Это означает, что в процессе эксплуатации подвижных отвалов полностью исключена внезапность их обрушения, поскольку знание закономерностей развития деформаций позволяет ввести новый критерий безопасной эксплуатации высоких заснеженных отвалов на горных склонах. Было отмечено, что скорость деформации по вертикали, равная 50 см в сутки, соответствует переходу от преобладания уплотнения в снегородной смеси (до 50 см/сут) к преобладанию ее скольжения (более 50 см/сут). Эта же скорость деформации является тем порогом, превышение которого делает работу на отвале невыгодной, так как большую часть времени приходится тратить на выравнивание площадки отвала.

Свойства снега, входящего в состав снегородной смеси отвала, даже при отрицательной температуре не следует воспринимать однозначно. Снег, конечно, цементирует породу, но при повышении температуры до 0 °С он может оказывать и обратное действие, особенно если в отвале имеются чистые снежные прослои, уплотненные весом породы до состояния фирнового льда, и разделяющие куски породы отвала в плоскости, параллельной откосу.

Чтобы избежать возникновения таких ослабленных зон, весь снег в отвале должен быть рассредоточен в порах отвальной породы. Данное условие соблюдается, если объем попавшего в отвал снега не превышает объема его пор более чем в 2 раза. В этом случае уплотнившийся снег не переполнит имеющихся в породе пустот и не нарушит структуры отвала. Соблюдя эту пропорцию на практике возможно: нужно лишь во время снегопадов не прерывать отсыпку породы в отвалы. Зная среднемесячные количества твердых осадков за прошедшие годы и среднюю пористость пород в отвалах, легко рассчитать, сколько вскрышной породы необходимо сыпать в отвалы ежемесячно.

Взяв за основу принцип «не переполнять снегом поры отвальной породы»,



Динамика характеристик отвала от его образования до обрушения. I — объем породы в отвале, II — суммарный объем естественного снега и отвала, вывозимого в отвал из карьера, III — объем естественного снега, IV — среднемесячная скорость деформации, V — заснеженность породы отвала.

ностные характеристики и реологические свойства. Например, сопротивление снегородной смеси сдвигу снижается на 30—40 %, если ее температура повысилась от —2 до —0,5 °С. При понижении температуры прочность смеси увеличивается.

Итак, вопреки широко распространенному мнению об ослабляющей роли снега, содержащегося в отвальной породе, можно заключить, что в диапазоне отрицательных температур снег не ослабляет, а цементирует породу, превращая ее в прочный снегородный конгломерат. При этом реологические свойства снега в значительной мере передаются снегородной смеси, что и обуславливает закономерности дина-

мы разработали регламент совместной отсыпки в действующие отвалы вскрышной породы и вывозимого из карьера снега. Так, на Центральном руднике за восемь зимних месяцев в контуре карьера может скапливаться до 7—8 млн м<sup>3</sup> снега, из которых не менее 400 тыс. м<sup>3</sup> требуется ежегодно вывозить в отвалы.

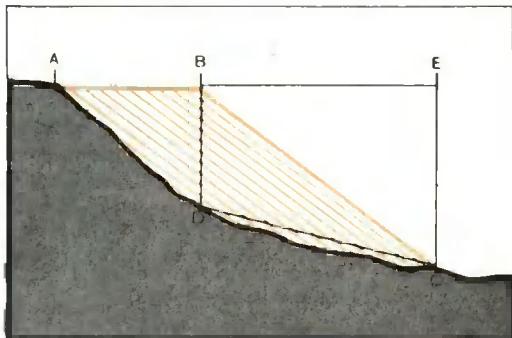
Устойчивость и прочность любого насыпного сооружения определяется его предельной высотой. Если ее превысить, сыпучее тело начнет разрушаться и оседать до устойчивых параметров. Но на высоком горном склоне проконтролировать и поддержать высоту отвала совершенно невозможно. Зато имеется возможность достаточно точно измерить ширину насыпной площадки отвала, которая пропорциональна его высоте. Эта предельная величина ширины площадки является единственным критерием параметра, доступного в горных условиях быстрому инструментальному контролю и равнозначного по физическому смыслу высоте отвала.

Предельная ширина насыпной части рабочей площадки отвала зависит как от прочностных характеристик сыпучего тела, так и от геометрии подстилающего склона. Для снегородных смесей существуют два минимальных значения прочностных характеристик в диапазоне отрицательных температур — зимнее и летнее, следовательно, ширину насыпной части рабочей площадки отвала нужно ограничивать зимним и летним пределами. Естественно, что зимний предел больше летнего, поэтому зимой в отвал можно отсыпать значительно больше породы, чем летом. Однако отсыпанный зимой отвал способен с наступлением лета выйти из состояния равновесия и начать перемещаться по склону. Этой особенностью, присущей исключительно снегородным смесям, и определяется подвижность высоких заснеженных отвалов на горных склонах.

Склонностью высоких заснеженных породных отвалов к деформации скольжения можно воспользоваться, организовав временные отвалы на горном склоне в пределах проектного контура карьера. В горных условиях такие отвалы будут самотранспортировать горную массу за пределы контура карьера. Организация подобных «транзитных» отвалов на склонах Центрального рудника привела к самотранспортировке 70 % горной массы за проектный контур карьера и принесла ежегодный экономический эффект более 700 тыс. руб. Суммарная величина годового экономического эффекта от внедрения всех новейших

горнотехнологических разработок на карьерах производственного объединения «Апатит» составила около 6 млн руб.

Основным результатом проведенных научных исследований и технологических разработок стала работа самого Центрального рудника, на котором после достижения начальной проектной производительности, она увеличилась более чем в два раза. За последние 10—15 лет удельный вес Центрального рудника в производстве фосфатного сырья также вырос почти в два раза.



Профиль отвала на горном склоне. АВ — ширина насыпной части рабочей площадки, АС — протяженность отвала, ВD — высота бровки отвала, ЕС — высота отвала на склоне.

В настоящее время новые технологические способы формирования отвалов на горных склонах (в условиях повышенного накопления снега) внедрены на всех карьерах производственного объединения «Апатит». Но значение результатов исследований и технологических разработок не ограничивается районом Хибин. Например, на севере Читинской области в зоне строительства Байкало-Амурской магистрали расположено Удоканское медно-рудное месторождение, проблеме освоения которого уделено внимание в «Основных направлениях развития народного хозяйства СССР на 1981—1985 гг. и на период до 1990 г.» По рельефу и климату Удоканский хребет в Северном Забайкалье сходен с Хибинским горным массивом, хотя они различаются по абсолютным отметкам. Поэтому опыт формирования отвалов на высоких и крутых склонах Хибин, его методы и способы расчета с известной корректировкой могут быть использованы при освоении Удоканского месторождения, что, бесспорно, сэкономит народному хозяйству десятки миллионов рублей.

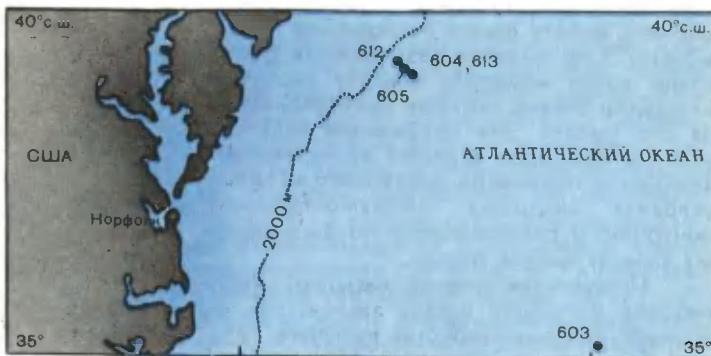
## 93-й и 95-й рейсы «Гломара Челленджера»

**А. Е. Сузюмов,**  
кандидат геолого-минералогических наук

Москва

Два этих рейса бурового судна были посвящены одной задаче: изучению строения континентального склона и подножия Северо-Американского материка в районе штата Нью-Джерси (США). Этот район давно привлекает исследователей, занимающихся вопросами эволюции пассивных окраин континентов, а также геологов-практиков в связи с возможностью обнаружения углеводородов. Впервые морские геологические исследования начались здесь еще в начале 1900-х годов, и к настоящему времени различными геологическими организациями и нефтяными компаниями США пробурена 41 скважина, что позволяет провести геологическую интерпретацию нескольких тысяч погонных километров сейсмических профилей, густой сетью покрывающих весь район. В двух новых рейсах «Гломара Челленджера» (ранее им пробурены здесь скважины 107 и 108) предстояло получить дополнительный материал, который позволил бы составить стратиграфический разрез континентального склона и подножия в кайнозойское и верхнемеловое время.

Континентальный склон и подножие — структуры осадочно-тектонического происхождения. В результате остывания литосферы в процессе раздвигания происходит ее погружение, которое в условиях близости к континенту компенсируется на-



Район работ «Гломара Челленджера» в 93-м и 95-м рейсах и места расположения пробуренных скважин.

коплением мощной осадочной толщи. Сейсмические исследования у берегов штата Нью-Джерси показали, что мощность осадочных отложений во внешней части континентального шельфа достигает 15—20 км, на склоне — 10—15 км. Гигантская осадочная призма постепенно выклинивается в сторону океана (см. разрез).

В 93-м рейсе, который начался 27 апреля и завершился 17 июня 1983 г. в Норфолке (США), было пробурено три скважины (603—605), первая — у основания континентального подножия, остальные — в его верхней части. Работами руководили Я. ван Хинте (J. van Hinte; Свободный университет, Амстердам, Нидерланды) и Ш. Вайз (Sh. Wise; Университет штата Флорида, США)<sup>1</sup>. В 95-м рейсе,

проходившем с 21 августа по 26 сентября 1983 г., было пробурено еще две скважины: 613-я — в верхней части подножия, а 612-я — в средней части континентального склона; в этом рейсе работами руководили У. Поар (W. Poag; Геологическая служба США) и Т. Уотс (T. Watts; Геологическая обсерватория им. Ламонта и Доэрти, Палисейдс, США)<sup>2</sup>.

Самая мелководная из скважин, 612-я, проникла в осадочную толщу на глубину 675 м и достигла отложений кампанского возраста (около 75 млн лет). По составу фауны в отложениях, а также литологическим характеристикам установлено, что в это время участок континентального склона, лежащий в настоящее время на глубине около 1,5 км, был внешней частью шельфа (напомним, что глубина залегания шельфа, как правило, не превосходит 200—300 м). Отложения кампана и маастрихта (по которым скважина прошла около 121 м) и чрезвычайно тонкий горизонт (около 4 м) отложений палеоцена пред-

<sup>1</sup> JOIDES Journal, 1983; v. IX, № 3, p. 20—36.

<sup>2</sup> Ibid., p. 9—38.

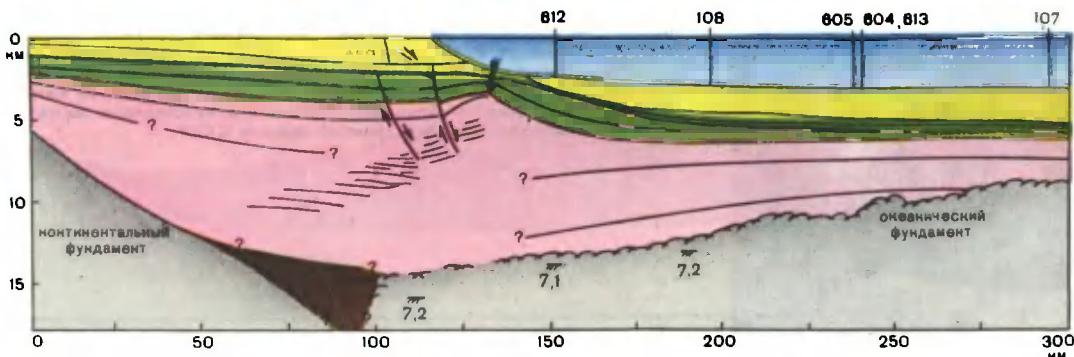
ставляют собой карбонатно-терригенные образования; фораминиферо-нанопланктонный мел, известняки, глинистые прослои. Хотя с течением времени условия накопления осадков в районе скважины 612 становились более глубоководными, этот район вплоть до эоцена оставался в пределах шельфовой зоны.

В раннем эоцене (около 40 млн лет назад) условия накопления осадков существенно изменились: из шельфовой зо-

Скорость погружения литосферы с этого времени нарастает, условия накопления осадков становятся все более глубоководными, количество терригенного и силикатного (органического происхождения) материала увеличивается, а карбонатного резко уменьшается. Так постепенно формировался континентальный склон.

Скважины 604, 605 и 613 вскрыли примерно одинаковую часть разреза континентального подножия, но на разную глу-

Скважиной 603 была вскрыта мощная толща отложенных переходного типа (между океаническими осадками и отложениями континентального подножия). Фундамента скважины не достигла, остановившись в осадках раннего мела (валлангин, 120 млн лет). По свидетельству участников рейса, для этой скважины, как ни для какой другой, характерно чередование условий пелагической седиментации и накопления турбидитных отложений, принесен-



Сейсмический разрез континентального склона и подножия в районе штата Нью-Джерси и положение скважин глубоководного бурения.

-  Кайнозойские отложения
-  Меловые
-  Юрские
-  Триасовый [1] грабен
-  Подошва коры, по данным глубинного сейсмического зондирования (цифры — скорость распространения сейсмических волн, км/с)
-  Разломы и направления движения по ним
-  Внешняя кромка позднеюрского-раннемелового шельфа
-  Карбонатная банка или риф

ны район скважины 612 переместился в область континентального склона, здесь стали отлагаться светло-серые силикатно-карбонатные илы и мел.

бину: 605-я достигла верхнемеловых отложений, 613-я — раннеэоценовых, а 604-я остановилась в образованиях эоцена.

Нижняя часть разреза в скважинах 605 и 613 представлена известняками, кремнистыми нанопланктонными илами, порселланитами. Исходя из состава фауны сделано предположение, что осадки накапливались в более мелководных, чем ныне, условиях — на континентальном склоне; это подчеркивается и наличием многочисленных оползней (преимущественно в эоцене). Средняя часть разреза сложена однородным кремнисто-нанопланктонным мелом; по составу фауны это уже более глубоководные отложения. Верхняя часть осадочного разреза (в скважине 613 — верхние 270 м) — сложная по строению толща; она состоит из перемежающихся прослоев глини, карбонатных илов, глауконитовых или пиритсодержащих глинистых песков и песчанистых глини. Такие отложения явно образовались благодаря сносу к подножию материка более мелководного материала по многочисленным подводным каньонам.

ных с формирующегося континентального склона.

Во всех без исключения скважинах установлены многочисленные перерывы в процессе осадконакопления, которые связаны с глобальными или же региональными эпизодами придонной эрозии. Один из наиболее крупных эпизодов, длительностью 35—37 млн лет, приходится на вторую половину эоцена — первую половину миоцена. В это время в данном районе, по-видимому, активно формировались подводные каньоны, которые во второй половине миоцена заполнялись осадочным материалом.

Технические возможности позволяли «Гломару Челленджеру» вести в этих рейсах бурение и на большую глубину, однако опасения встретить резервуары, заполненные углеводородами, заставили ограничиться исследованием верхней части осадочного чехла.

## Вулканизм Земли



**А. А. Маракушев**



Алексей Александрович Маракушев, член-корреспондент АН СССР, заведующий кафедрой петрографии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и руководитель лаборатории термодинамики минералов Института экспериментальной минералогии АН СССР. Автор большого числа работ по физико-химической петрологии. В «Природе» опубликовал статью: Происхождение алмазов (1982, № 2). Лауреат Государственной премии СССР.

Вулканизм — это процесс извержения из недр Земли на ее поверхность флюидно-силикатных расплавов — магм, изливающихся в виде лавовых потоков и дающих начало эффузивным (излившимся) горным породам. Структуры в земной коре, через которые извергаются магмы, называются вулканами. Такое определение охватывает не только вулканы центрального типа — высокие конусообразные горы с кальдерами наверху, широко известные по рекламным туристским открыткам. Распространяется оно и на трещинные зоны в земной коре, через которые на поверхность поступают огромные объемы расплавов. Эти излияния магм происходят главным образом по трещинам на дне океанов и не представляют такого эффектного зрелища, как наземные извержения вулканов. Но именно подводные излияния играют ведущую роль в развитии вулканизма Земли.

Главные особенности вулканических проявлений определяются в первую очередь характером структурных зон, в которых они развиваются. Поэтому представляется логичным по отдельности рассмотреть срединные океанические хребты, эвгеосинклинальные прогибы и другие геоструктурные зоны, существенно различающиеся по специфике вулканизма.

### ВУЛКАНИЗМ СРЕДИННЫХ ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ

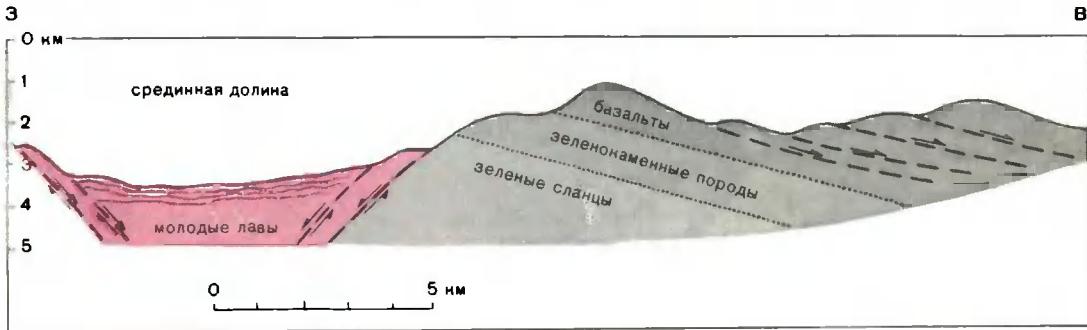
Наибольший размах подводный трещинный вулканизм приобрел в глобальных зонах растяжения земной коры — срединных океанических хребтах. В центральных частях этих хребтов, характеризующихся высокой сейсмической активностью и термическими аномалиями, широко развиты процессы метаморфизма. С ними, в частности, связано превращение базальтов океанической коры в спилиты (так называются альбитизированные и хлоритизированные базальты), зеленокаменные породы, зеленые альбит-хлоритовые сланцы и амфиболиты. С метаморфизмом связано и разуплотнение глубинных зон под этими структурами, ведущее к росту подводных хребтов. Образование же в этих хребтах прогибов, грабенов и трещин, вдоль которых извергаются молодые базальтовые лавы, объясняется растяжением — рифтогенезом, спредингом.

Сочетание высоких подводных гор (высотой до 4 км) и глубоких долин, заполненных молодыми лавами, является характерной чертой срединных океанических хребтов. Базальты в срединных хребтах представлены подушечными ла-

вами, залегающими в рифтовых долинах в виде плоских куполов и небольших кратеров. Помимо базальтов в эти структуры внедряются ультраосновные пироксен-оливиновые породы, содержащие 40—45 % кремнезема, которые при метаморфизме превращаются в серпентиниты. Совместно с метаморфизованными базальтами и глауководными осадками серпентиниты составляют так называемую офиолитовую формацию срединных океанических хребтов, впервые выделенную Г. Хессом в 1965 г.

В срединных океанических хребтах

выражено на схеме геологического строения Тихоокеанского региона. На ней акватория Тихого океана оконтурена глубоко-водными желобами и разделена на следующие плиты: Тихоокеанскую, Антарктическую, Наска и Кокосовую. Тихоокеанская плита отделена от остальных Восточно-Тихоокеанским срединным хребтом, составляющим зону интенсивного базальтового вулканизма. В стороны от него в Тихоокеанской и отчасти в смежных с ней плитах последовательно повышается возраст базальтов океанического ложа: от



Геологический разрез восточной части Срединно-Атлантического хребта [по Т. Х. Анделу и К. О. Боину, 1968]. Видна рифтовая долина, заполненная молодой базальтовой лавой, и обрамляющий ее хребет, сложенный метаморфическими породами и более древними базальтами.

наглядно проявляется связь вулканизма с зонами повышенной сейсмичности. Причем, трещинные излияния базальтов, свойственные этим структурам, хорошо коррелируют с очагами широко распространенных в них мелкофокусных землетрясений.

Срединные океанические хребты представляют собой зоны сочленения литосферных океанических плит — монолитных пластин толщиной около 50 км, залегающих на астеносферном слое частичного плавления мантийных пород. Предполагается, что плиты могут скользить по астеносферному слою, смещаясь друг относительно друга. Таким образом, сочленения плит являются крайне подвижными зонами, в которых режим сжатия чередуется с режимом растяжения. Но доминирует все-таки растяжение, вызванное высокой вулканической активностью.

Внедрение громадных порций базальтовых магм и интрузий гипербазитов ведет к омоложению и расширению океанического ложа со скоростью несколько сантиметров в год. Особенно наглядно это

плиоцен-плейстоценового к миоценовому, олигоценному, эоцен-палеоценовому, меловому и юрскому. Юрские вулканические формации слагают древнейшую структуру современного ложа Тихого океана (бывшее поднятие Дарвина), со всех сторон окруженную более молодыми вулканическими образованиями.

В ходе развития Тихоокеанского региона происходило непрерывное обновление океанического ложа с вытеснением древних вулканических формаций более молодыми. В качестве механизма этого обновления предполагается глубинная конвекция вещества, стимулируемая потоками флюидов, восходящими вдоль границ литосферных плит. В срединных хребтах обнаружены струи газов, содержащих водород и углеводороды, а также гелий, обогащенный легким изотопом  $^3\text{He}$ , что является признаком глубинного происхождения газовых струй.

На заре геологии проблема вулканизма решалась относительно просто: извержение расплавленных масс на поверхность Земли рассматривалось как прямое доказательство жидкого (расплавленного) состояния ее недр. Но с развитием сейсмологии и накоплением сведений о скоростях прохождения упругих волн сквозь Землю стало очевидным, что земные недра в основном твердые. Проблема

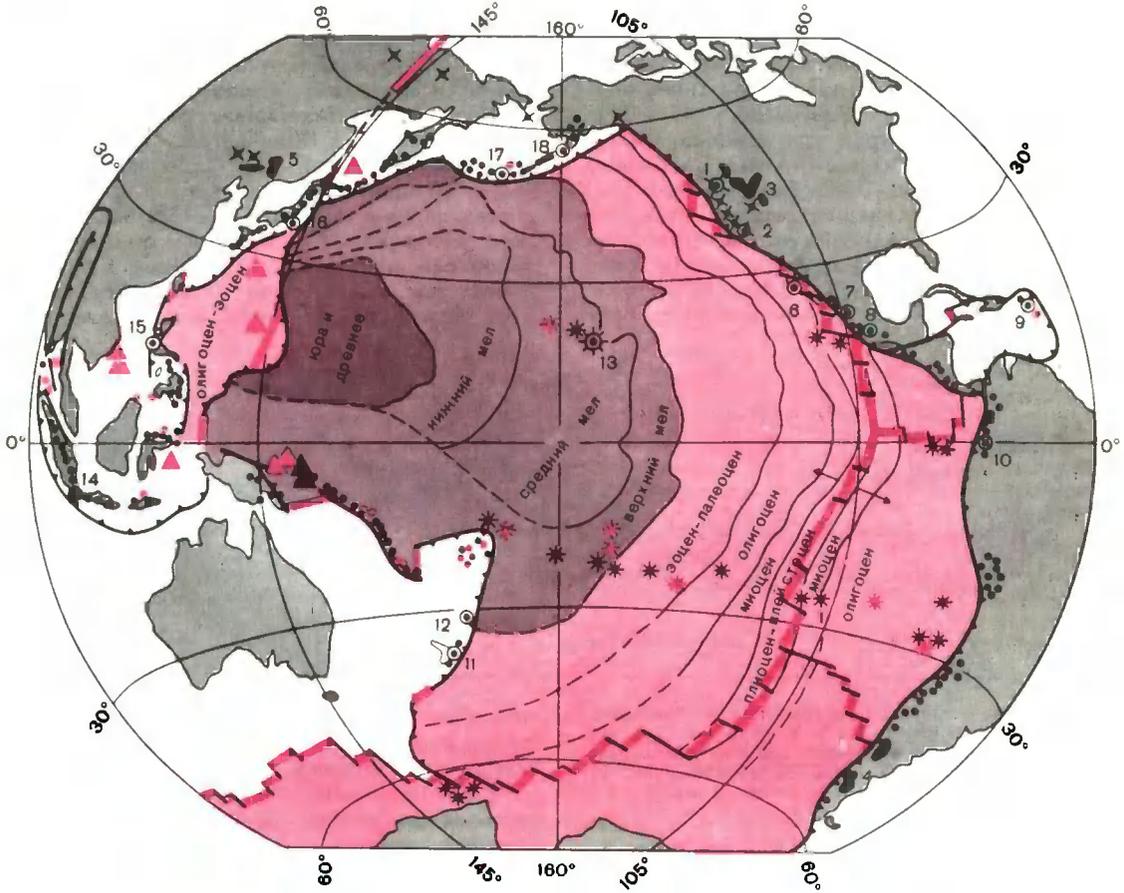


Схема геологического строения Тихоокеанского региона и размещения древних вулканов. Цифрами обозначены главные вулканы (они обведены кружками) и площади распространения базальтов на континентах: 1 — Бейкер, 2 — Лассен-Пик, 3 — базальты Колумбии, 4 — базальты Патагонии, 5 — базальты Монголии, 6 — Трес-Виргинес, 7 — Парикутин, 8 — Полюкатепетль, 9 — Мон-Пела, 10 — Котопахи, 11 — Таравера, 12 — Кермадек, 13 — Мауна-Лоа, 14 — Кракатау, 15 — Тааль, 16 — Фудзияма, 17 — Богослов, 18 — Катмай.

Вулканы океанических островов:

-  подводные
-  наземные

Вулканы окраинных морей:

-  подводные
-  наземные

 Рифтовые долины срединно-океанических хребтов (зоны подводного трещинного вулканизма)

 Оси глубоководных желобов

Вулканизм континентального обрамления:

-  вулканы центрального типа
-  площади развития базальтов

Вулканы островных дуг и активных континентальных окраин:

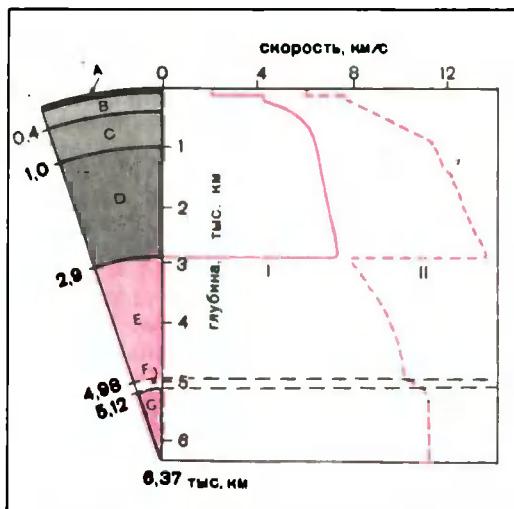
-  подводные
-  наземные

происхождения магм значительно усложнилась. Магматизм стали связывать с локальным плавлением твердых оболочек Земли (земной коры и подстилающей ее мантии) под действием глубинных флюидов. Согласно экспериментальным данным, эти поступающие из недр уплотненные газы значительно понижают температуру плавления пород, иными словами, способствуют их плавлению. Вулканы извергают магмы, очень богатые такими флюидными компонентами, как  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $HF$ ,  $HCl$  и другие. Отделяясь во время извержения от силикатных расплавов, эти флюиды «консервируются» в эффузивных породах в виде пузырьков газов.

Извержению вулканов предшествует обычно поступление на поверхность Земли большого количества газов, характерных для восстановительной химической среды. Эти глубинные флюидные потоки и стимулируют образование магматических очагов, питающих вулканы. Но наряду с этим установлено, что породы, слагающие твердые оболочки Земли, бедны летучими компонентами или вообще их не содержат. Поэтому вопрос о происхождении глубинных флюидных потоков достаточно сложен. По-видимому, летучие компоненты ( $H_2$ ,  $CH_4$  и другие) сосредоточены преимущественно во внешнем ядре Земли на глубине 2900—4980 км. Именно там, по сейсмическим данным<sup>1</sup>, вещество находится в жидком (расплавном) состоянии и способно вследствие этого удерживать большое количество флюидных компонентов.

Во всяком случае, магматизм и метаморфизм свойственны только неполоностью консолидированным (затвердевшим) планетам. Продолжающаяся консолидация сопровождается отделением летучих компонентов, образующих флюидные потоки вдоль тектонически ослабленных зон. На Луне, например, активные вулканические проявления ограничиваются возрастом 3,2—4,6 млрд лет и представлены двумя формациями вулканических пород, площади распространения которых хорошо различимы на видимой стороне этой планеты.

Древнейшие вулканические породы Луны возрастом около 4,6 млрд лет (этот возраст отражает время первичного расслоения планет земной группы) представлены лейкократовыми базальтами и



Глубинный разрез Земли, основанный на сейсмических данных [по В. Гутенбергу, 1959]: А — земная кора (30—40 км — под континентами, 6 км — под океанами), В — верхняя мантия, С — переходная зона, D — нижняя мантия, E — внешнее жидкое ядро, F — зона перехода между внешним и внутренним ядром, G — внутреннее ядро. Между слоями А и В проходит граница Мохоровичича, между слоями D и E — граница Гутенберга. Римскими цифрами обозначена скорость распространения поперечных (I) и продольных (II) сейсмических волн.

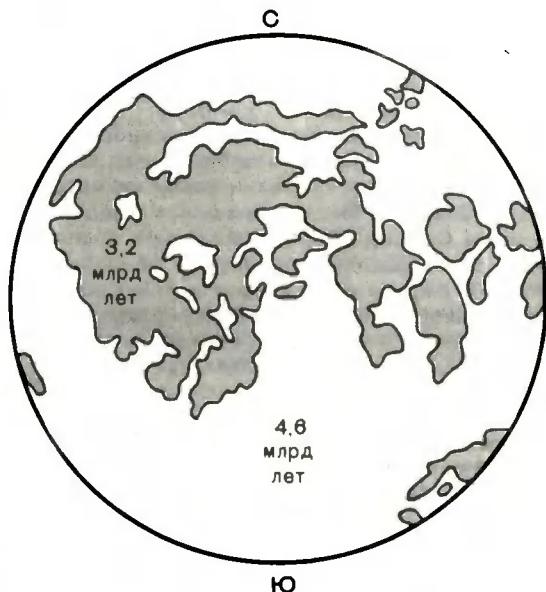


Схема распространения вулканических формаций на видимой стороне Луны. Возраст древнейших лейкократовых базальтов — 4,6 млрд лет, возраст меланократовых базальтов, слагающих прогибы, — 3,2 млрд лет.

<sup>1</sup> Gutenberg B. Physics of the Earth's interior. N. Y.— L., 1959.

микроанортозитами. Богатство светлым минералом — плагиоклазом — обуславливает их высокую отражательную способность, благодаря чему на видимой стороне Луны они выглядят светлыми пятнами. Темные участки лунной поверхности образованы меланократовыми (т. е. богатыми пироксеном) базальтами с низкой отражательной способностью. Они имеют более молодой возраст — 3,2 млрд лет — и слагают депрессии, в которых мощность лунной коры значительно уменьшилась вследствие ее растяжения. К этим депрессиям приурочены аномалии силы тяжести (масконы), обусловленные внедрением плотного ультраосновного вещества из лунной мантии. Это вулканическое обновление коры на Луне, связанное с зонами ее растяжения, аналогично по своей природе тому, что происходит на Земле в срединных океанических хребтах. Но лунный спрединг прекратился на ранних этапах развития этой планеты вследствие ее быстрой консолидации и потери запаса летучих компонентов. Характерно, что при этом Луна потеряла и магнитное поле, которым она обладала в пору ее вулканической активности (отсюда — лунные породы обладают остаточной намагниченностью).

Как показывают космические снимки, Луна и планеты земной группы покрыты множеством кольцевых структур — кратеров, происхождение которых принято связывать с ударами метеоритов. Однако по крайней мере часть их, несомненно, имеет вулканическую природу. Так, на Марсе детальными снимками с космической станции «Маринер-9» была однозначно доказана вулканическая природа горы Олимп и ряда кратеров в пределах хребта Фарсид<sup>2</sup>. Гора Олимп возвышается над окружающей ее равниной более чем на 20 км, а поперечник ее основания составляет 500 км. Вулканические кальдеры на вершине этой горы (размер их достигает 65 км) имеют очень сложное строение. На Марсе обнаружено множество более мелких вулканических конусов и лавовых потоков. Обширные территории марсианской поверхности, сложенные эффузивными породами с низкой отражательной способностью, напоминают по этому признаку лунные депрессии.

Вулканизм на Луне и других планетах земной группы в общем укладывается

в систему срединного обновления их первичной коры и в этом плане сопоставим с магматизмом срединных океанических хребтов Земли, точнее, с магматизмом начальных стадий их развития. На Земле это обновление продолжается и в настоящее время. Оно привело к полной замене первичной земной коры новообразованной океанической, представленной базальтами, и новообразованной континентальной, сложенной метаморфическими породами и гранитами. Вулканизм срединных хребтов — основной процесс, ведущий к обновлению и формированию океанической коры. Континентальная кора отличается от океанической как строением, так и многими другими особенностями. Образуется континентальная кора в результате сложного геосинклинального процесса, на начальных стадиях которого в эвгеосинклинальных прогибах<sup>3</sup> возникают офиолитовые формации. По особенностям вулканических проявлений они сходны с офиолитовыми формациями срединных океанических хребтов, но отличаются от них более мощным осадочным слоем и складчатостью.

#### ВУЛКАНИЗМ ЭВГЕОСИНКЛИНАЛЬНЫХ ПРОГИБОВ

Понятие «геосинклиналь» было введено в 1873 г. американским ученым Дж. Дэна для обозначения зон мощного вулканизма и осадконакопления, из которых впоследствии рождаются складчатые горные сооружения. Развитие геосинклиналей начинается с образования прогибов в области сочленения континентальных и океанических литосферных плит. Интенсивное прогибание земной коры в этих областях связано с тем, что океанические плиты здесь погружаются под континентальные массивы, а окраины континентов и островные дуги проявляют обратную тенденцию — слабо надвигаются на океанические плиты. На ранних стадиях формирования прогибов в них накапливаются мощные вулканогенно-осадочные толщи. Так, в обрамлении Атлантического и Индийского океанов, по сейсмическим данным, повсеместно развиты толщи осадков мощностью до 10 км и более. Причем прогибы континентального шельфа заполнены в основном терригенными отложениями, сносимыми с континентов, а в

<sup>3</sup> Эвгеосинклиналь — наиболее подвижная часть складчатой (геосинклинальной) области; приставка «эв» указывает в данном случае на полноту, совершенство.

<sup>2</sup> Книг Э. Космическая геология. М., 1979.

более глубоководной океанической обстановке преобладают вулканические образования, свойственные эвгеосинклиналям (породы в них обладают повышенной магнитной восприимчивостью). В эвгеосинклинальных же прогибах в ассоциацию с глубоководными осадками входят основные и ультраосновные породы офиолитового комплекса, что сообщает этим прогибам сходство со срединными океаническими хребтами.

Геосинклинальные прогибы в обрамлении Атлантического и Индийского

глубоководные желоба, которые составляют современное обрамление Тихого океана.

Их геологическая позиция наглядно выражена в геосинклинальной системе Алеутской островной дуги. На примере этой территории можно проследить, как начиная с нижнего палеозоя и по настоящее время американский континент разрастался за счет океанической впадины<sup>1</sup>. Сейчас эвгеосинклинальный прогиб фиксируется глубоководным желобом, ограничивающим распространение очагов мелкофокусных землетрясений со стороны океа-

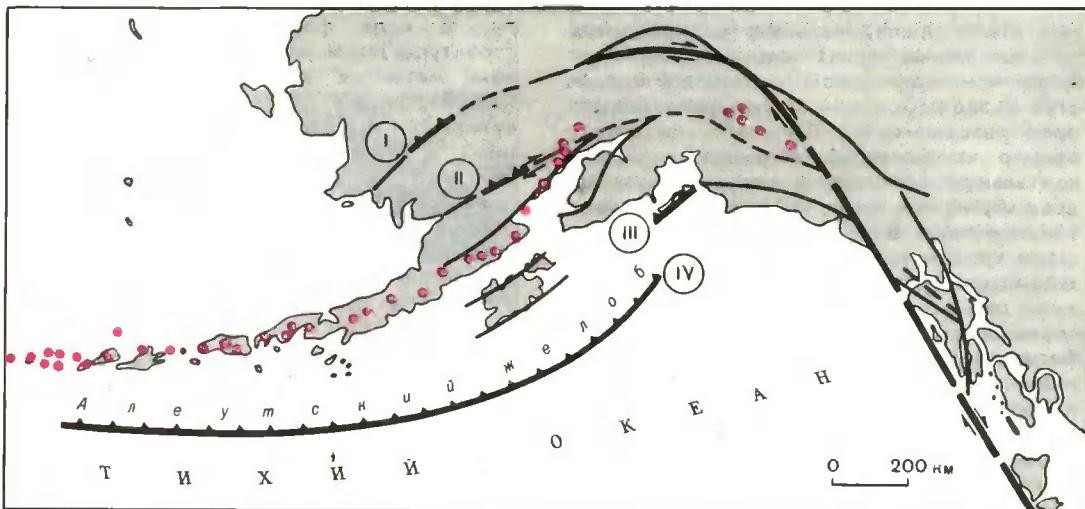


Схема развития Алеутской геосинклинальной системы начиная с нижнего палеозоя и до современности. Со стороны океана эвгеосинклинали ограничены поверхностью Беньофа, совпадающей на выходе с глубоководным желобом. Цифрами обозначено его положение в нижнем палеозое (I), триасе (II), мелу (III) и в настоящее время (IV). Со стороны континента эвгеосинклинальные прогибы ограничены зонами орогенеза (горообразования) со свойственным им наземным вулканизмом.

- Разломы
- Надвиги вдоль поверхностей Беньофа
- Андезитовые вулканы

океанов никак не проявляются в рельефе, поскольку они компенсируются накоплением вулканогенно-осадочных толщ. С развитием складчатости и образованием геантиклинальных поднятий прогибы смещаются в сторону океана, изолируясь от областей сноса терригенного материала с континентов. В этих условиях прогибы не заполняются осадками и образуют

на. Очаги землетрясений, судя по их пространственному распространению, непосредственно связаны с вулканизмом.

Эвгеосинклинальные прогибы, как и срединные океанические хребты, характеризуются развитием мелкофокусных землетрясений, подводными излияниями базальтовых лав вдоль протяженных трещинных зон, внедрениями перидотитовых интрузий и метаморфизмом. Специфика вулканизма этих структур была выявлена Х. Куно, доказавшим сходство базальтов внешнего обрамления Японской островной дуги с базальтами океанических хребтов<sup>2</sup>. Объясняется это сходство аналогичной геотектонической позицией; и те, и другие структуры приурочены к сочленениям литосферных плит. Однако

<sup>1</sup> Stoneley R.— J. Geol. Soc., 1971, v. 127, p. 6.

<sup>2</sup> Куно Х. Латеральные вариации базальтовой магмы вкрест окраины континентов и островных дуг.— В кн.: Окраины континентов и островные дуги. М., 1970.

хребты сосредоточены на границах океанических плит, а эвгеосинклиналильные прогибы свойственны сочленениям океанических и континентальных плит. Этим и определяются черты их различия. Континентальные плиты отличаются большой мощностью (200—250 км) и более сложным строением. Судя по величине теплового потока и положению астеносферного слоя, в котором достигается частичное плавление мантийного вещества, океаническая мантия находится в более разогретом состоянии по сравнению с континентальной.

Как уже упоминалось, континентальные плиты последовательно разрастаются за счет океанических впадин. Формирование континентальной коры сопровождается складчатостью и метаморфическими преобразованиями. Все это отражает общую закономерность развития континентальных массивов, в которых древние докембрийские ядра «обрастают» с приближением к океанам все более молодыми складчатыми сооружениями. Те же закономерности характерны и для островных дуг: со стороны континента они сложены наиболее древними складчатыми формациями, а в направлении к океану возраст формаций постепенно понижается до современного. Например, в западной части Японской островной дуги обнажаются породы древней орогенической зоны Акиоси, в центральной части залегают более молодые породы, а самые молодые породы только намечаются между островной дугой и желобом<sup>6</sup>. Этим определяется главная закономерность развития геосинклиналильного вулканизма, активная зона которого последовательно смещается от континентальных массивов в сторону океанических впадин.

Со стороны континентов эвгеосинклиналильные прогибы ограничены горными континентальными окраинами с очень мощной корой (до 70 км в Андах) или островными дугами. А со стороны океана границы геосинклиналильных прогибов проходят вдоль глубоководных желобов, в которых океанические плиты погружаются под горные окраины континентов или островные дуги. Все это создает очень сложную тектоническую обстановку в области эвгеосинклиналильных прогибов, в которых периоды вулканизма и осадконакопления чередуются с периодами склад-

чатости и метаморфических преобразований.

В ходе эволюции этих структур в них возникают геоантиклиналильные складчатые поднятия. Их формирование сопровождается изменением характера магматизма, который постепенно утрачивает сходство с базальтовым магматизмом срединных океанических хребтов. При этом приобретаются черты, близкие к магматизму островных дуг и активных горных континентальных окраин, т. е. структур более высокого уровня геосинклиналильного развития, в которые в конечном итоге перерождаются эвгеосинклиналильные прогибы. В ходе формирования складчатой структуры подвижных зон коренным образом меняется характер магматизма и метаморфизма. Базальтовый (основной) вулканизм сменяется андезитовым (средним), а затем дацитовым и липаритовым (кислым). В глубинных зонах получает развитие гранитный магматизм, который сопровождается интенсивным метаморфическим преобразованием осадочных и вулканических пород. С метаморфизмом этой стадии становления гранитов в складчатых поясах связаны особенно интенсивное разуплотнение их глубинных зон и увеличение мощности коры, чем можно объяснить воздымание горных сооружений на активных окраинах континентов.

Андезитовый тип вулканизма считается специфическим для складчатых поясов. Он намечается еще в ходе их формирования и интенсивно развивается во все последующие стадии горообразования, а затем и эрозии складчатых сооружений. Поэтому его следует рассмотреть более подробно.

## ВУЛКАНИЗМ ОСТРОВНЫХ ДУГ И КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИН

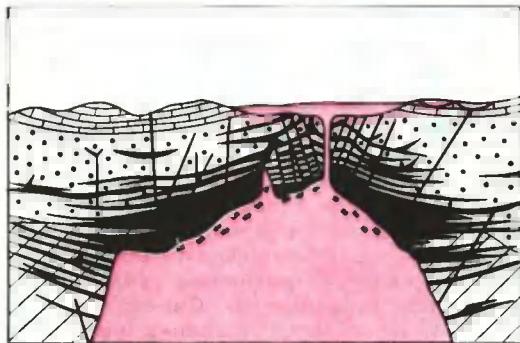
Островные дуги и горные окраины континентов, выделяющиеся повышенной сейсмичностью и крайне интенсивным наземным вулканизмом, составляют так называемое Тихоокеанское огненное кольцо. Здесь сосредоточены преимущественно стратовулканы<sup>7</sup>, которые группируются в протяженные пояса, накладываются на эродированные складчатые сооружения различного возраста. В Алеутской дуге, например, современный вулканический пояс накладывается на палеозойские и мезозойские складчатые структуры, разби-

<sup>6</sup> Исикава М. Механизмы землетрясений в Японии и близрасположенных районах и связанные с этим вопросы.— В кн.: Земная кора и верхняя мантия. М., 1972.

<sup>7</sup> Стратовулкан — полигенный вулкан, построенный из лавовых потоков, а также рыхлого пирокластического материала.

тые на блоки. Протяженными разломами, разделяющими блоки, контролируется положение вулканов. В их извержениях нормальные базальты играют подчиненную роль, уступая место более богатым кремнеземом породам — андезито-базальтам и андезитами (около 60 %  $\text{SiO}_2$ ), дацитам и липаритам (70—75 %  $\text{SiO}_2$ ).

Извержения вулканов этого типа с давних времен поражали воображения людей. Происходило это прежде всего потому, что они сопровождаются катастрофическими взрывами (эксплозиями) с обра-



Геологический разрез стратифицированного вулкана Рейнир в США (по X. С. Йодеру, 1979).

-  Верхняя толща вулканических пород и афанитов
-  Средняя вулканическая толща
-  Нижняя вулканическая толща
-  Кислые магматические породы
-  Ранее внедрившиеся массы тех же пород

зованием больших масс обломочного материала — вулканических бомб и лапиллей<sup>8</sup>, песка, пыли, шлаков. При уплотнении обломочный материал превращается в туфы, которые представляют такой же важный продукт вулканизма, как и эффузивные породы (излившиеся лавы). Соотношением туфов и лав определяется коэффициент эксплозивности вулканизма, указывающий на взрывной или, наоборот, спокойный его характер. Наиболее яркий пример катастрофического извержения —

взрыв вулкана Кракатау в Индонезии (1883 г.), в результате которого на месте двух гор образовалась морская депрессия глубиной около 300 м. Крайний тип взрывного вулканизма получил название бандайсанского по имени вулкана Бандайсан в Японии, извержение которого (1886 г.) представляло собой газовый взрыв, не сопровождавшийся лавовыми излияниями.

Взрывной характер извержений андезитовых и более кислых лав объясняется формированием магм в очагах под вулканами в условиях высокого флюидного давления. Это связано с тем, что андезитовый вулканизм развивается в режиме сжатия, господствующего в складчатых поясах и препятствующего отделению летучих компонентов от расплавов. В этом заключается его отличие от базальтового вулканизма, связанного с режимом растяжения подвижных зон, облегчающим дегазацию магм и поступление их на поверхность. Эксплозивный андезитовый характер вулканизма свойствен островным дугам и горным континентальным окраинам, таким как Анды, по которым он и получил свое название. Эти структуры орогенного воздымания складчатых сооружений характеризуются высокой сейсмичностью, как и рассмотренные выше зоны развития базальтового вулканизма — срединные океанические хребты и эвгеосинклинальные прогибы. Однако орогенные структуры отличаются от них глубокофокусным характером землетрясений, гипоцентры которых погружаются при переходе от океанической к континентальной стороне рассматриваемых подвижных зон. Это перемещение происходит вдоль так называемой сейсмо-фокальной поверхности Беньюфа. Предполагается, что в направлении к континентам возрастает и глубина залегания магматических очагов, питающих андезитовые вулканы. Магмы, образующиеся в этих очагах под вулканами, застывают в основном на глубине, и только часть их (8—10 %) изливается на поверхность.

В типичном развитии вулканизма выделяется ранний этап образования куполообразных поднятий, когда магма еще не достигает поверхности и формирует интрузивные тела типа силлов, лополитов, штоков. Затем внедряется новая порция магмы, которая образует очаг, дающий уже непосредственные излияния лав. Часто очень значительные размеры магматических очагов несоизмеримы с небольшим объемом лав, поставляемых ими на по-

<sup>8</sup> Лапилли — округлые или угловатые вулканические выбросы размером от горошины до грецкого ореха.

верхность. Магматические очаги под вулканами рассматриваемого типа образуются в основном за счет магматического замещения вулканогенно-осадочных толщ и ранее внедрившихся интрузивных пород. Происходит такое замещение при интенсивной фильтрации через расплавы флюидов, названных Д. С. Коржинским трансмагматическими. С растворяющим воздействием этих флюидов на породы тектонически ослабленных зон связано образование особых каналов — диатрем, через которые глубинные расплавы выходят на поверхность. Согласно геофизическим данным, магматические очаги под андезитовыми вулканами залегают на глубине до 20 км (в сиалическом слое земной коры). Свойственное им высокое флюидное давление определяет способность очагов разрастаться за счет замещения сиалических пород и селективного усвоения их компонентов. При этом состав магм изменяется от базальтового к андезитовому и более кислому, согласно принципу кислотно-основного взаимодействия компонентов, разработанному Коржинским<sup>9</sup>.

Механизм магматического замещения играет главную роль в развитии подобного корового магматизма. С ним связано селективное усвоение колоссальных объемов сиалического материала земной коры, ведущее к формированию андезитов и более кислых вулканических пород, а в глубинных зонах складчатых поясов — гранитных плутонов и больших объемов мигматитов (метаморфических пород, пронизанных гранитными инъекциями)<sup>10</sup>. Особенно характерно образование богатых калием андезитов — латитов, извергающихся обычно в комплексе с калиевыми дацитами, липаритами и игнибридами, которые приурочены к участкам земной коры большой мощности. Однако во многих случаях андезиты образуются в результате дифференциации базальтовых магм. Сильное флюидное воздействие приводит к развитию таких видов кристаллизационной дифференциации, при которых от базальтовых магм отщепляются расплавы, соответствующие по составу лейкократовым базальтам, андезитам и более кислым породам. Расщепленные

базальтовые магмы при их извержении на поверхность и быстром застывании образуют вариолиты — базальты с каплевидными выделениями андезитов, дацитов и липаритов. Развитие корового магматизма в складчатых поясах отражает общий процесс метаморфической и магматической дегазации и разуплотнения их глубинных зон, ведущий к подъему горных сооружений (орогенезу) на островных дугах и активных континентальных окраинах.

## ВУЛКАНИЗМ КОНТИНЕНТОВ И ОКРАИННЫХ МОРЕЙ

Мощные трещинные излияния базальтов на континентах связаны с образованием рифтовых структур растяжения складчатой континентальной коры, слагающей основания древних платформ. В результате таких излияний на платформах образуются мощные и протяженные покровы плато-базальтов (траппов) молодого возраста. В континентальном обрамлении Тихого океана к трапповым территориям относятся Колумбия и Снейк в штате Айдахо, Патагония, Восточная Монголия. В трапповых формациях, как и в океанических хребтах, базальты сопровождаются незначительными объемами пирокластического материала, переслаивающегося с лавами, мощность которых меняется от 2 до 50 м. Трапповые излияния приурочены к протяженным трещинам и плоским щитовым вулканам.

Переход от трещинного вулканизма к трапповому сопровождается заменой базальтов субщелочными базальтами, трахибазальтами и щелочными породами. «Большие объемы базальтов формируются вдоль тех рифтовых структур, где растяжение коры было значительным, а щелочные породы возникают в более ограниченном масштабе в тех рифтах, в которых растяжение коры играло меньшую роль. Базальтовая магма внедряется вдоль даек с большой скоростью при минимальной дифференциации, тогда как щелочные магмы интродуцируют главным образом в форме трубообразных тел, в которых дифференциация достигает своего максимального развития»<sup>11</sup>. Дифференциация обусловлена возрастанием флюидного давления и начинается с развития лейкократовых типов базальтов. Они возникают на переходе от базальтовых к

<sup>9</sup> Коржинский Д. С. — Доклады АН СССР, 1959, т. 128, № 2, с. 128.

<sup>10</sup> Коржинский Д. С. Проблемы петрографии магматических пород, связанные с связью магматических растворов и гранитизацией. — В кн.: Магматизм и связь с ним полезных ископаемых. М., 1955.

<sup>11</sup> Филпотс А. Р. Рифтовый магматизм в восточной части Северной Америки. — В кн.: Континентальные рифты. М., 1981, с. 101.

щелочным сериям пород так же закономерно, как и на переходе к андезитовым сериям, отражая усиление флюидного воздействия на базальтовые расплавы. Но лейкократовые базальты отличаются в этом переходе более значительной ролью щелочных металлов, что связано со спецификой состава флюидов, более богатых в щелочных магмах галогенами и соединениями углерода ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и др.).

В окраинных морях формируются геосинклинальные котловины с базальто-

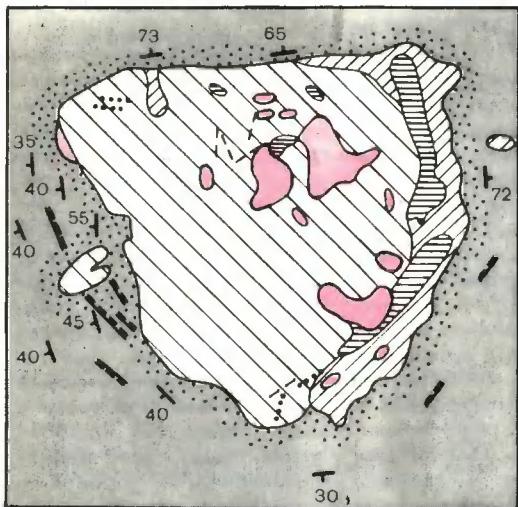


Схема строения массива Одыничка (Сибирская платформа), прослеживающегося, согласно геофизическим данным, на большую глубину. Ультраосновные породы — перидотиты и оливиниты, изначально слагавшие этот массив, почти полностью замещены щелочными породами.

-  Перидотиты и оливиниты
-  Пироксениты
-  Ийолит-мельтейгиты
-  Щелочные и нефелиновые сиениты
-  Карбонатиты
-  Меллилитовые породы
-  Жильные нефелиниты и долериты
-  Зона контактового метаморфизма
-  Породы, окружающие массив
-  Элементы залегания пород

вым основанием, в которых накапливаются мощные толщи вулканогенных и осадочных пород. При более интенсивном растяжении складчатая континентальная кора в этих структурах может замещаться базальтовой корой, сходной с океанической. Особенно наглядно этот процесс выражен в тыловой части молодой Марианской островной дуги: здесь в результате раздвижения более древних формаций в олигоцен-эоценовое время сформировались две океанические литосферные плиты — Филиппинская и Марианская, разделенные спрединговой зоной, через которую поступали молодые базальтовые лавы. В сопряжениях подобных плит с континентальными литосферными плитами развиваются эвгеосинклинальные прогибы со свойственными им базальтовым вулканизмом и гипербазитовым магматизмом.

Примером геосинклинальной системы, образовавшейся в ходе развития континентального рифта может служить также море Лабрадор, отделяющее одноименный полуостров от Гренландии. Формирование океанической коры в нем принято связывать с интенсивным спредингом, который сопровождался излияниями юрских базальтов вдоль грабена. В настоящее время мощность осадков в нем достигает 8 км. Одновременно на окраине п-ова Лабрадор заложился Ньюфаундлендский геосинклинальный прогиб, наиболее мощные отложения в котором (до 10 км) приурочены к границе литосферных плит — континентальной и вновь образованной океанической.

## ВУЛКАНИЗМ РАЗЛОМОВ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ И ОКЕАНИЧЕСКИХ ПЛИТ

Размещение вулканов центрального типа контролируется крупными разломами на континентальных и океанических литосферных плитах, через которые извергаются базальтовые лавы и лавы щелочных пород: щелочных базальтов, трахитов, фолонитов, нефелинитов и др. В океанах вулканы приурочены к цепям вулканических островов и подводных гор, пересекающих разные по возрасту зоны базальтов океанического ложа. Контролирующие их разломы ограничиваются океаническими плитами и не прослеживаются на континентах. Эти разломы, называемые трансформными, отражают общий процесс тектонической активизации ложа Тихого океана.

Развитие вдоль них вулканизма сопровождается, видимо, метаморфическими процессами, о чем можно судить по значительному утолщению земной коры под вулканами, одновременному с формированием куполообразных поднятий земной поверхности. Оно обусловлено разуплотнением глубинных зон, как за счет внедрения магматических масс, еще не имеющих выхода на поверхность, так и благодаря метаморфическому преобразованию пород под действием восходящих флюидных потоков, сопровождающих магматизм. С подобными поднятиями можно связать образование вулканических островов и превращение подводных вулканов в наземные. Так, с января 1966 г. по октябрь 1967 г. куполообразное воздымание поверхности земли на одном из вулканов Гавайских о-вов составило 70 см.

Проблема происхождения вулканов центрального типа затрагивает как генезис базальтов, с образования которых начинается вулканическая активность, так и генезис щелочных пород, образованием которых она завершается. По геофизическим данным, вулканы нередко характеризуются положительными аномалиями силы тяжести, которые связаны с внедрением в земную кору плотных ультраосновных пород — дунитов и перидотитов. Многие исследователи рассматривают их как своеобразные диапиры пластического вещества мантии, из которого выплавлялась базальтовая магма, изливающаяся в начале каждого извержения вулкана. Однако флюидный характер магматизма указывает скорее на полное плавление мантийного вещества под вулканами и его последующее расщепление на гипербазитовую и базальтовую составляющие. Базальтовая магма достигала поверхности и давала лавовые излияния, а более тяжелая гипербазитовая магма оставалась на глубине, образуя под вулканами протяженные трубообразные интрузивы перидотитов и дунитов.

Сибирская платформа представляет собой структуру, где подобные тела ультраосновных пород вышли на поверхность в результате эрозии. Они имеют в эрозионном срезе кольцевую форму и прослеживаются, по геофизическим данным, на большую глубину (например, массивы Кондер, Инагли, Одихинча и др.). Ультраосновные породы по периферии этих массивов в различной мере замещены основными и щелочными интрузивными породами, причем, чем дальше продвинулось это замещение, тем в большей

мере основные породы (габбро) вытеснились щелочными образованиями (нефелиновыми сиенитами, ийолитами, уртитами). Кондерский массив на Алданском щите представляет пример слабо выраженного замещения, поскольку гипербазиты этого массива хорошо сохранились, а основные породы представлены преимущественно габбро, габбро-сиенитами и шонкинитами. Массив Одихинча (Меймеча-Котуйский район) является примером почти полного замещения: ультраосновные породы этого массива сохранились лишь в виде небольших останков от замещения их щелочными породами.

Щелочной уклон в магматизме возникает в процессе замещения магмами ультраосновных пород, которое сопровождается десиликацией магм и кислотно-щелочным взаимодействием компонентов по принципу Коржинского<sup>12</sup>. Поэтому переход от базальтового вулканизма к щелочно-базальтовому и щелочному неизменно сопровождается появлением в лавах включений перидотитов, которые представляют собой останцы от магматического замещения этих пород в глубинных очагах под вулканами.

С замещением флюидными магмами интрузивных тел, сложенных пироповыми перидотитами, связано развитие особого кимберлитового вулканизма, ограниченно в своем распространении древними платформами. Пироповые перидотиты внедряются с очень больших мантийных глубин и содержат минералы высокого давления (пироп, алмаз и др.), которые затем наследуются замещающими перидотитами кимберлитовыми магмами<sup>13</sup>.

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что за последнее десятилетие проблема вулканизма Земли значительно усложнилась. Произошло это в связи с обнаружением стекловатых пород, сходных с вулканическими, в кратерах, которые образуются при ударах крупных метеоритов о земную поверхность. Эти породы получили название зювитов и тагамитов. Проблема их образования, а также выработка критериев их отличия от вулканических пород, служит в настоящее время предметом острых дискуссий и еще далека от разрешения.

<sup>12</sup> См. сноску 9.

<sup>13</sup> Маракушев А. А. Происхождение алмазов.— Природа, 1982, № 2, с. 46.

## Символика огня в истории культуры

**С. А. Токарев,**  
доктор исторических наук  
Москва

### МИФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРО- ИСХОЖДЕНИИ ОГНЯ

Из признаков, отличающих человека от животных, один из самых ясных, однозначных и бесспорных — это умение добывать и пользоваться огнем. Ни одно животное этим умением не обладает. Правда, считается, что есть исключения и среди людей: у жителей Андаманских островов не обнаружено каких-либо приборов для добывания огня. Однако тому есть свое объяснение: андаманцы предпочитали тщательно хранить горящие или тлеющие головешки, перенося их с места на место, чем каждый раз добывать огонь заново.

Археологические данные свидетельствуют о том, что человек познакомился с огнем в глубокой древности. В стоянках нижнего палеолита — Чжоукоудянь в Азии, Киик-Коба, Крапина в Европе и др. — обнаружены мощные слои золы. Очевидно, это — следы обитания человека, веками поддерживающего огонь в жилых пещерах.

С чего же началось знакомство наших предков с огнем? Сторонники старой — «мифологической» — школы (около середины XIX в.) полагали, что первобытные люди смешивали в своем воображении небесный огонь (молнию) и земной, природный огонь (самовозгорание сухостойных деревьев, трущихся друг о друга). Люди пытались — де и сами подражать этим природным явлениям, отсюда возникали древнейшие способы добывания огня путем трения друг о друга двух кусочков сухого дерева. К этим

древнейшим мифологическим представлениям с течением времени присоединились другие: будто от возгорания дерева произошли колесо, огненная птица, священный напиток, да и сам человек. Эту точку зрения в середине XIX в. подробно изложил немецкий этнограф Адальберт Кун. Свою книгу он заканчивал так:

«Первейшим и основополагающим для всех рассмотренных здесь мифических мировоззрений надо считать то, что люди мыслили себе небесный огонь и небесный напиток возникшими... в облаках таким же образом, как и на земле; причем, очевидно, что средоточием всего мировоззрения было получение огненной искры; лишь в дальнейшем к этому присоединилось и представление о напитке».

Эта поэтическая картина долгое время оказывала влияние на ученых. Но в дальнейшем тенденция сводить все общественное сознание первобытной эпохи к первобытному мифу о «нисхождении небесного огня», а из него выводить самые различные поверья, обряды и пр. утратила свое обаяние. Оказалось, что дело гораздо сложнее и что сводить к одному корню все, имеющее какое-то, хоть отдаленное, отношение к огню (в других случаях — к небу, к солнцу), не отвечает требованиям науки.

На более высоком уровне научного анализа и научной критики стоит написанная полвека спустя русской исследовательницей Верой Николаевной Харузиной статья «К вопросу о почитании огня»<sup>2</sup>, хотя и она, в свою очередь, страдает некоторой неполнотой. Так, например, в ней ничего не сказано

о высших формах государственного и национального культа огня. Зато она приводит множество строго систематизированных конкретных фактов, главным образом этнографических, говорящих о почти повсеместной распространенности связанных с огнем народных поверий, обрядов и запретов. Харузина, однако, лишь вскользь касается остающегося донны спорным вопроса о происхождении самой практики добывания огня.

Когда и по каким причинам состоялось первоначальное знакомство наших древнейших предков с огнем?

Многие ученые, преимущественно археологи, ставили этот вопрос. Большинство склонялось к взглядам того же Куна, освобождая их от поэтических мотивов (огненной птицы, божественного напитка и т. д.). В упрощенной форме мнение большинства сводится к последовательной смене трех этапов: 1) вначале люди не знали огня; 2) позже они научились пользоваться природным огнем (молнией, степным пожаром, самовозгоранием сухостойных деревьев); но еще не умели его добывать; 3) умение добывать огонь трением сухих дощечек или высеканием из двух камней.

По этому последнему вопросу, впрочем, завязались споры.

### ТРЕНИЕ ИЛИ ВЫСЕКАНИЕ? ДЕРЕВО ИЛИ КАМЕНЬ?

Хотя высекание огня с помощью огнива или кресала распространено сейчас почти повсеместно, большинство археологов считают, что это не древнейший способ: для получения «горячей» искры, принимаемой на трут, недостаточно иметь два кремня, нужен пирит (серный колчедан), залежи которого сравнительно редки, или появившаяся гораздо позже сталь. Поэтому почти все писавшие об этом вопросе склоняются

<sup>1</sup> Kuhn A. Die Herabkunft des Feuers und des Götterfranks. B., 1859, S. 253.

<sup>2</sup> Харузина В. Н. — Этнографическое обозрение, 1906, № 3—4, с. 68.

к мнению о приоритете трения как способа добывания огня.

Но сравнительно недавно Б. Ф. Поршневу, собравший данные со всех частей света и дополнивший их собственными экспериментами, попытался опрокинуть эту схему: высекание огня с помощью двух камней, по его мнению, было как раз древнейшим способом его получения; однако оно не было сознательно целенаправленным действием — огненные искры получались сами собой, будучи побочным продуктом обработки каменных орудий еще в эпоху нижнего палеолита; прошло много времени, прежде чем человек, обнаружив некую пользу от тлеющей сухой подстилки, научился пользоваться ею<sup>3</sup>.

Таковы две главные версии происхождения огня. Надо сказать, что убедительных доказательств в пользу той или другой пока нет. Обе остаются гипотезами, причем не исключаящими друг друга: в зависимости от местных условий, мог входить в употребление то «деревянный», то «каменный» огонь. Ведь и сейчас еще держатся у огнеземельцев и эскимосов традиции высекания огня, у индейцев — высверливания, а в Индонезии — использования огневого поршня наряду с высеканием.

Каковы бы ни были, однако, этапы и способы добывания огня нашими предками, ясно одно: освоение его положило границу между человеком и остальным животным миром. И это — грань не только в понятиях, в классификационных таблицах: это была реальная борьба, борьба не на жизнь, а на смерть.

### МИФИЧЕСКИЕ ГЕРОИ

Наши неандертальские предки охотились на крупных животных — копытных и хищных, а также и на мелкое зверье — грызунов, змей, ящериц. И охота эта была не только средством добычи мясной пищи, но и борьбой на жизнь, за жилые пещеры — ведь как раз на холодную мустьерскую эпоху приходится большинство жи-



Женская статуэтка «матери, или хранительницы очага», так называемая «Венера с рогом». Барельеф из навеса Лоссель (Франция).

лых пещер. Вот тут-то, в борьбе за изгнание крупных и опасных зверей из пещер, и пригодились людям горящие головешки. Полезны были они и при облавных степных охотах.

Процесс освоения огня любопытным образом преломился в общественном сознании, особенно в мифотворчестве. Хорошо известно, что мифы, особенно примитивные, почти всегда строятся по схеме «от противного». На вопрос «откуда появилась такая-то вещь?» миф дает ответ: «раньше ее не было, или было нечто противоположное»; и этим ответом наивное мифологическое сознание удовлетворялось. Самые примитивные мифы о происхождении огня сохранились у аборигенов Австралии. Если теперь люди владеют огнем, а у животных его нет, то прежде, согласно мифу, было наоборот — некое животное было единственным владельцем огня, который человеку предстояло добыть. Отсюда возник мотив похищения.

Вот, например, простой миф, записанный в одном из туземных племен Виктории (Австралия). В давнишние времена

единственным обладателем огня был зверек-дауттробка (бандикут), не желавший им ни с кем делиться. Другие животные совещались, как бы им завладеть огнем. Попытался сделать это голубь, но неудачно; за ним более удачную попытку сделал сокол, на лету подхвативший головешку, выброшенную бандикутом; от нее загорелась сухая трава, и таким образом огонь стал известен людям<sup>4</sup>.

Мифы такого же типа есть и у народов, стоявших на более высоком уровне исторического развития, например у индейцев Северной Америки.

В мифах этого типа главным действующим лицом является похититель огня, передавший его людям. Это так называемый «культурный герой» — мифический персонаж, хорошо известный едва ли не всем народам мира. Ему приписывается установление разных обычаев, введение культурных благ. Самым же огнем в мифах изображается как чисто материальный предмет, у кого-то похищаемый и передаваемый людям. Какого-либо олицетворения или обожествления огня здесь нет и в помине.

Этот тип мифов отвечает древнейшему укладу жизни — охотничьему быту, не завершившейся оседлостью.

Этапу более прочной оседлости соответствует формирование иного мифологического персонажа, уже олицетворенного: это — «мать огня», или «хозяйка огня», «мать очага», как ее называют еще и сейчас народы Сибири и Севера.

На многих стоянках эпохи верхнего палеолита Евразийского Севера (особенно в ориньякскую эпоху) археологи находят скульптурные, вырезанные из камня или кости, фигуры обнаженных женщин. Эти скульптуры с подчеркнутыми признаками пола — так называемые ориньякские Венеры — принято считать изображениями «женских предков», символизировавшими женское начало. К ним примыкают и найденные в более поздних слоях (неолит, мезолит) более схематизированные женские фи-

<sup>3</sup> Поршневу Б. Ф. — Сов. этнография, 1955, № 1, с. 7.

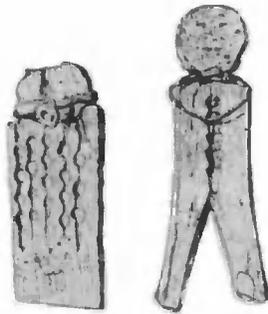
<sup>4</sup> Genner A., van. Mythes et legendes d'Australie. P., s. a., p. 64—83.

гуры. Судя по тем местам, где они были найдены (возле очаговых ям), правдоподобно считать их не «предками», а изображениями «хозяйки огня», или «матери очага».

В основе этого образа лежала вполне реальная действительность: роль женщины в добывании и поддержании огня в первобытную эпоху была чрезвычайно велика.

Совершенно правильно писала об этом Харузина: «Не была ли на заре жизни человечества женщина естественной хранительницей огня на очаге, временном или постоянном? Мужчина, добытчик дичи, уходил иногда далеко; женщина постепенно принуждена была сократить свою подвижность. Если исходить из трудности добывания огня и удобств сохранения его поддержанием, не представляется ли возможным допустить... что женщина оставалась зачастую на месте стоянки, чтобы только сохранить огонь?.. Женщина более, чем мужчина, имела случай обходиться с огнем, изучать его свойства, привычки... Она замечала, отчего он, сердитый, шипит и трещит, сыплет искрами, что заставляет его поднимать вверх свои языки, с какой жадностью он накидывается на подбрасываемую ему «пищу» — топливо. Ее внимание усиленно сосредоточивалось на стихии, поддержание которой было так существенно важно. В ее уме создавался ряд суеверных представлений, она составляла себе целый кодекс более или менее верных примет, относящихся к огню»<sup>5</sup>.

Харузина вполне права, подчеркивая сохранение этих черт вплоть до наших дней в крестьянском быту: «Женщина, хорошая хозяйка, в русской крестьянской семье знает прекрасно все предосторожности, которые надо принимать, зажигая, вздувая огонь, знает все формы его почитания. За непочтительное обращение хозяйки огонь карает весь дом пожаром»<sup>6</sup>.



Священные доски для вытирания огня у чукчей. Это — своего рода деревянные огниво. Оно представляет собой доску [как правило, имеющую грубую человеческую форму], в дырочках которой вращается деревянное сверло.

Поэтому относительно огня, в частности домашнего очага, широко распространены разные поверья, суеверные запреты и пр. В огонь нельзя плевать, мочиться, бросать нечистоты. Зажигание нового огня должно происходить по определенным правилам, с соблюдением известных обрядов.

Все это свидетельствует о том, что огонь считался чистой и очищающей стихией. В основе подобной идеи лежали реальные факты: огонь и особенно дым костра и очага помогал людям освобождать жилище от всякого рода паразитов — гнуса, мошкары, комаров, москитов.

Та же реальность отразилась и в повсеместном — у всех народов — использовании огня в народной медицине. Трудно перечислить все способы использования его «целительной» функции: прижигание больного места печной золой, окуривание, колпение, «освящение» лечебных средств и пр.

Так складывался — вероятно, еще на грани доклассового и раннеклассового общественного строя — сложный и цветворенный образ «духа огня», ставшего объектом религиозного почитания. Целая галерея таких — в основном женских — образов создана, например, у народов Сибири («хозяйка огня», «мать огня»). Это, конечно, не случайно — в них отразился уклад матрилинейного родового строя. Есть только два исклю-

чения: «уот-иччитэ» у якутов и «гали-эжин» у бурят — «хозяйка огня», что тоже не случайно, ибо эти два народа в то время жили в условиях патрилинейного родового строя.

На пороге классового общества черты мифологического образа «хозяйки огня» переплетаются с образами предков-покровителей рода и семьи. Так обстояло дело у славянских народов (например, русский домовый), у восточнофинских народов (воршуд у удмуртов). Однако нельзя подходить слишком упрощенно к вопросу об отождествлении культа огня с родовым или семейным культом предков, ибо у того и другого — разные исторические корни.

С большой осторожностью надо подходить и к сближению культа огня с соляризм (солнечным) культом, развившимся на почве обрядности, связанной с возделыванием земли и сбором урожая. Хотя они и похожи друг на друга (например, обаяча скатывать зажженные колеса с холма или горы, свойственный обоим культам), однако их происхождение разное.

## БОЖЕСТВО ОГНЯ

В большинстве государств классического Востока и античного мира взаимопереплетались идеологическое и символическое значения огня. Самый выразительный пример — бог Агни в ведической мифологии Индии. Это — двойственный персонаж. Прежде всего, Агни — это собственно огонь, материальный и вещественный, языки пламени (санскритское «агни» этимологически родственно славянскому «огнь»). Но это преимущественно жертвенный огонь, выполняющий важную культовую функцию вестника — доносить до небесных богов пламя и дым приносимой жертвы. В-третьих, он и сам — один из главнейших богов: ему одному посвящено в ведической Индии около 200 гимнов, и в списке богов Агни стоит на втором месте, уступая лишь громоносному богу Индре. Составители гимнов не жалели красок для прославления священного огня. «О Агни,— поется в одном из гимнов,— огонь священный, огонь

<sup>5</sup> Харузина В. Н. Указ. соч., с. 76—77.

<sup>6</sup> Там же, с. 79.

очищающий, ты, спящий в дереве, ты, поднимающийся сверкающим пламенем, ты, божественная искра, скрытая в каждой вещи, и прославленная душа Солнца!» В позднейших религиях Индии Агни отошел на задний план, но в ритуалах функции огня остались — особенно в погребальных обрядах: каждый верующий индус считает для себя особым благом, если тело его будет предано сожжению, по возможности на берегу священного Ганга.

В родственной индийцам иранской религиозной мифологии бог Атар, олицетворение огня, занимал подчиненное место. Но у всех иранских племен огонь рассматривался только как чистая стихия. Любопытно, что одна и та же идея о святости огня привела у индийцев и у иранцев в погребальном ритуале к противоположному результату: умерших иранцы не только не кремировали, но само соприкосновение трупа с огнем считалось оскорблением этой стихии, а значит — тяжчайшим грехом.

Эта идея чистоты огня сохраняется донныне у всех приверженцев «огнепоклоннических» религий — зороастрийцев (парсы, гевры), йезидов. «Храмы огня» были, как то видно из археологических раскопок, в Средней Азии и в Закавказье.

Из античных примеров культа огня самый характерный — почитание богини Весты в Риме. В честь ее был построен храм, в нем на очаге (жертвеннике) горел неугасимый огонь — символ крепости Римского государства. За священным огнем следили жрицы — девочки или девушки, дававшие обет целомудрия и безбрачия (нарушение его каралось смертью). Весталки (и особенно главная из них) пользовались рядом привилегий. Одной из них была привилегия освобождать от казни осужденных. Огонь Весты обновлялся в начале каждого календарного года. Алтари ее были и в частных домах — у входа в жилище, в вестибул (откуда — наш вестибуль).

Аналогичное место в системе государственных культов греческих полисов занимала богиня Гестия — богиня священного домашнего очага. Принад-



Веста — богиня священного очага в Древнем Риме. Мраморный рельеф из Берлинского государственного музея. II в. Веста была также покровительницей хлебопек.

лежа к священному сонму 12 олимпийских богов, Гестия, однако, не была предметом каких-либо мифологических сюжетов.

Римская Веста и греческая Гестия — яркие образцы устойчивого сохранения матриархальных начал в религиях даже развитых классовых и государственных обществ.

Но античность знала и иной «характер» огня — буйный, разрушительный. Его персонафицировали боги Арес и Гефест в Греции, Вулкан в Риме. В этих образах, однако, присутствуют и иные черты: Арес — бог жестокой и истребительной войны, Гефест — бог кузнечного дела, ковач оружия. Вулкан — божество не только разрушительной стихии огня, но и защитник от пожаров.

## СОЦИАЛЬНАЯ ПРИРОДА ОГНЯ

Во всех изложенных выше фактах сакрализации и символизации огня есть одна черта, которая проходит через всю историю общения человека с огнем. Это социальная природа и социальное опосредствование всей огненной сферы.

В чем это выражается? Подобно любому другому явлению культуры, и материальной и духовной, огонь на службе человека выполняет основные и производные функции. Основные функции огня — борьба со зверьями, согревание и освещение жилища, приготовление пищи. А производные? Общение и разобщение людей, интеграция и сегрегация.

Об организации труда в древнейшую эпоху охотничьего хозяйства почти неизвестно. Здесь возможны лишь гипотезы. Вероятно, что облавные охоты требовали все же некоей организации: женщины добывали огонь и охраняли его, мужчины пользовались им при облавах. Уже тогда женщины-хранительницы огня (очага) были как бы стабильным центром орды (рода), мужчины — его более подвижной периферией. Женщин и детей огонь очага сплачивал, отделял от мужчин. В какую-то, пока неясную эпоху произошел раскол рода на семьи. Тогда обнаружилось, что не всякий огонь хорош. Появилось деление на «наш» огонь и «не-наш» («чужой»). Следы такого деления сохранились едва ли не у всех народов Земли. Казалось бы, никакого убытка в хозяйстве не будет, если одолжить соседу голешку или горсть углей: но сколько же создалось по этому поводу ограничений и запретов! Нельзя давать соседу огонь в определенные дни, нельзя быть слишком щедрым и т. д. «Кто никогда не отказывает своим соседям в горячих углях», — писали еще в XIX в. о белорусских крестьянах, — у того отыскать счастье, и хлеб в поле не простоит без потравы». Некоторые крестьяне «опасаются давать из своего очага горячие угли чужим людям, в другую избу; если дают, то весьма неохотно, при том условии, чтобы те же угли были возвращены, хотя бы и потухшие. Иные, если угли не возвращены, в свою очередь посылают к тому соседу, которому одолжили, за горячими углями, хотя бы в них и не было надобности»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Афанасьев А. Поэтические воззрения славян на природу. М., 1968, т. 2, с. 13.

Крайней степени строгости подобные запреты достигли у народов Северо-Восточной Азии. В. Г. Богораз, досконально изучивший поверья и обряды чукчей, писал о них: «Каждая семья имеет собственный огонь. Семьи, огонь которых происходит от разных линий предков, даже в том случае, если они многие годы прожили вместе, тщательно охраняют свой огонь от всякого соединения с чужим огнем. Заем огня от соседей считается величайшим грехом. Или: «Чукотская женщина охотно возьмет у соседей спички, кремень и огниво, так как все это не связано с семейным очагом, но никогда не возьмет нового прута, так как он смешивается с углем, а уголь взят с чужого очага». «Во время моего пребывания среди чукоч,— писал он,— я имел много столкновений с женщинами из-за огня. Многие из них не имели чайников и все же не разрешали мне кипятить воду в моем чайнике, так как он стоял раньше на чужом очаге. Нередко приходилось оставаться без горячего чая»<sup>8</sup>.

Это сакральное противопоставление «нашего» и «чужого» огня отразилось в свое время в Библии, где вообще ритуал жертвенного огня упоминается многократно и со всеми подробностями. В книге «Левит» при описании торжественного общенародного жертвоприношения упомянут следующий эпизод: «Надав и Авиду, сыновья Аароновы, взяли каждый свою кадильницу, и положили в них огня, и вложили в него курений, и принесли пред Господа огонь чуждый, которого он не велел им. И вышел огонь от Господа, и сжег их, и умерли они пред лицом Господним». Дело шло, как видно, не о какой-нибудь незначительной детали жертвенного ритуала, а о принципиальной оппозиции «наш» — «чужой».

Одна из важнейших общесоциальных функций огня — очистительная. В доклассовом обществе она была слабо дифференцирована. Каждый совершал очистительные обряды за

себя, и вся община совершала их за всех. В древних государствах очистительные жертвы и обряды попадали в руки жрецов. У жрецов иерусалимского храма система очистительных жертв была разработана до тонкостей. В средние века очистительная функция огня целиком принадлежала церкви. За каждое нарушение того или иного обряда, как и за крупные преступления, требовалось чаще всего «огненное» очищение — обычно с тем или иным участием огня.

Католическая церковь построила на этой системе учение о чистилище — загробном мире, где грешные души в огне очищаются от грехов, причем срок пребывания в чистилище определялся церковью. Ею же была введена практика «аутодафе» — публичное сожжение «еретиков».

Той же изуверской идеей вдохновлялись на Руси в XVII в. старообрядцы — «самосожженцы», чтобы этим страшным путем очиститься от грехов и войти в «царствие небесное».

## ОГОНЬ — ОБЪЕДИНЯЮЩАЯ И РАЗДЕЛЯЮЩАЯ СТИХИЯ

В современной структуральной этнологии огню не уделяется почетного места. Для главы этой школы, К. Леви-Стросса, огонь — «медиатор» (посредник) между сырой и вареной пищей, один из членов бинарных оппозиций «огонь — вода» или «высекание — трение»<sup>9</sup>.

С общеприимственной точки зрения, огонь — это форма опосредствования человеческих отношений, их взаимоталкивания и взаимоотталкивания, форма разграничения трудовой деятельности женщин и мужчин, сплочения родовых групп, затем семьи. Родовые и семейные группы ограничивали себя строгими правилами несмешивания огня. Огонь замыкал собой кольцо родственников и членов семьи.

В ходе дальнейшего расширения форм общения симво-

лическое значение огня уменьшается, но не исчезает. Скажем, родовая (родоплеменная), а позже национальная и классовая сегрегация сохраняются в течение длительного времени, а в эпоху капитализма обостряются, хотя и принимают иные, менее экспрессивные формы. Отделить членов крупного банкового концерна от группы безработных и бездомных бедняков можно и без применения огня. Но иногда этот символ служит внешним выражением общности национальных и общенародных интересов, что сказывается, главным образом, в моменты острых социальных кризисов. Торжественные факельные шествия сторонников мира, неугасимый огонь на местах захоронений борцов за свободу и демократические права напоминают о древней сплывающей роли огня. Высшей формой этой символики является новая традиция перенесения олимпийского огня с его родины в ту страну, где проводятся очередные спортивные игры, выражая стремление к миру широких народных масс.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ефименко П. П., ПЕРВОБЫТНОЕ ОБЩЕСТВО. Киев.: Наукова думка, 1953.

Мелетинский Е. М. ПРЕДКИ ПРОМЕТЕЯ.— Вестник истории мировой культуры, 1967, № 3.

Токарев С. А. К ВОПРОСУ О ЗНАЧЕНИИ ЖЕНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭПОХИ ПАЛЕОЛИТА.— Советская археология, 1961, № 2.

Фрэзер Дж. ЗОЛОТАЯ ВЕТВЬ. М.: Политиздат, 1980.

Штернберг Л. Я. ПЕРВОБЫТНАЯ РЕЛИГИЯ В СВЕТЕ ЭТНОГРАФИИ. Л.: Изд-во. Ин-та народов Севера, 1936.

<sup>9</sup> См.: Леви-Стросс К. Структурная антропология. М., 1983, с. 133; Levi-Strauss C. Du miel aux cendres. P., 1966, p. 208, 211.

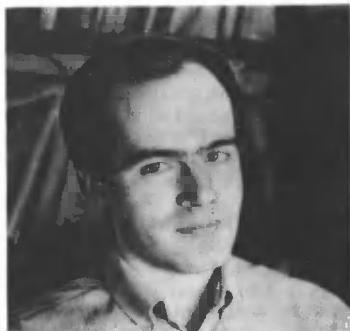
<sup>8</sup> Богораз В. Г. Чукчи. Л., 1939, ч. II, с. 54—55.

## Метод гибридом и его возможности

Е. Б. Мечетнер, А. В. Червонский



Евгений Борисович Мечетнер, старший лаборант лаборатории иммунологии Научно-исследовательского института канцерогенеза Всесоюзного онкологического научного центра АМН СССР. Занимается вопросами дифференцировки нормальных и опухолевых кроветворных клеток.



Александр Викторович Червонский, старший лаборант той же лаборатории. Область научных интересов — антигены дифференцировки Т-лимфоцитов, регуляция иммунного ответа, рецепторы Т-лимфоцитов.

Прогресс в современной биологии часто зависит от появления такого метода, который позволяет количественно оценить качественные феномены и выделить важнейшие звенья из бесконечной цепи фактов. Подобные методы по праву можно считать собственно научным открытием, хотя создаются они на базе общепринятых подходов и используются для многих технологических разработок.

Красивый пример такого открытия — метод гибридом, предложенный 8 лет назад Г. Келером и Ц. Мильштейном. В основу этого метода был положен принцип соматической гибридизации двух типов клеток: лимфоидных, образующих антитела, и клеток злокачественной лимфомы

(миеломы). В результате такого слияния образуется лимфоидная опухоль (гибридома), сохраняющая свойства обоих родителей — расти в культуре, как миелома, и производить антитела, как иммунный лимфоцит.

Сам методический подход был заимствован у цитогенетиков, да и использовать клеточные гибриды авторы собирались для изучения генов иммуноглобулинов. Однако, будучи иммунологами, они оценили возможности этого метода для получения моноклональных антител.

Что же такое моноклональные антитела и для чего они нужны? Мы постараемся ответить на эти вопросы, остановиться на деталях метода, охарактеризовать основ-

ные области применения гибридом и принципиальные наблюдения, сделанные с их помощью.

★

Организм высших животных постоянно сталкивается с огромным количеством чужеродных веществ — антигенов. Попадая в кровь животного, антигены вызывают ответную реакцию организма, в частности образование биологически активных белков, называемых антителами. Разнообразие антител, как и антигенов, чрезвычайно велико. Что же обеспечивает столь широкий спектр синтезируемых в организме специфических белков? Это связано со строением антител, а точнее, с наличием переменных участков. Сами антитела состоят из субъединиц, образованных двумя парами полипептидов — легкими и тяжелыми цепями. Тяжелые цепи бывают 5 основных классов ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\mu$ ), а легкие — двух ( $\chi$ ,  $\lambda$ ). Каждая цепь имеет два участка — переменный и константный, отвечающие за разные функции антител: переменный участок узнает уникальный антиген среди множества других и взаимодействует с ним; константный участок связывает комплемент (комплекс сывороточных белков, с помощью которых антитела разрушают клетки, несущие антиген), адсорбируется на специальных рецепторах, проникает в слизистые секреты и т. д.

Какие клетки производят антитела? Сколько вариантов антител образует одна клетка? Ответы на эти вопросы уже получены. Антитела вырабатываются лимфоцитами костномозгового происхождения (В-лимфоцитами). Более зрелые потомки В-лимфоцитов — плазматические клетки — выделяют антитела в кровь, при этом всегда соблюдается правило: одна клетка — одно антитело. В ходе иммунного ответа В-клетка делится, образуя клон, клетки которого производят антитела одной специфичности (моноклональные).

Участок антигена, с которым реагирует антитело, называется антигенной детерминантой. Как правило, антигены имеют несколько детерминант, т. е. против одного антигена может быть направлено несколько антител. При иммунизации животных в крови образуется смесь антител разной специфичности — продуктов многих клонов, т. е. получаемая при этом сыворотка поликлональна.

С помощью поликлональных сывороток были получены многие важные результаты, однако работа с ними затруднена по следующим причинам. Специфические антитела в поликлональных сыворотках со-

держатся в довольно низких концентрациях, поскольку организм животных и человека не способен вырабатывать большие количества антител к какому-либо одному антигену. Очевидно также, что специфичность, концентрация и другие характеристики антител таких сывороток сильно варьируют от одного животного к другому. В поликлональной сыворотке против данного антигена присутствуют еще антитела к антигенам, которые загрязняют иммунизирующий препарат. Кроме того, в сыворотке крови всегда имеется определенный уровень так называемых нормальных антител, не зависящий от иммунизации.

Таким образом, получить «чистую» поликлональную сыворотку, т. е. реагирующую исключительно с одним антигеном, очень трудно. Более того, концентрация некоторых антигенов в препаратах так ничтожна, что получить к ним даже слабореагирующую сыворотку невозможно. Для удаления лишних антител из поликлональной сыворотки были разработаны специальные приемы, более или менее успешные, однако полный успех достигнут не был.

Существует еще один подход для получения «чистых» антител — выращивание клонов, образующих антитела вне организма. Действительно, Н. Клинману удалось размножить такой клон до тысячи клеток, но, разумеется, количество полученных антител при этом было незначительным<sup>1</sup>. Вот если бы секретирующий антитела клон мог неограниченно размножаться в культуре вне организма!

Эту сложную задачу и решили в 1975 г. Г. Келер и Ц. Мильштейн<sup>2</sup>. Им удалось путем гибридизации клеток опухолей с иммунными В-лимфоцитами придать гибридным клеткам сразу два необходимых свойства: самоподдержание в культуре и секрецию антител. Эти гибридные лимфоидные опухоли были названы гибридомами. Способность жить неограниченно долго в культуре, гибридомы унаследовали от опухолевых клеток, а способность синтезировать антитела — от иммунных лимфоцитов.

За 8 лет существования метод гибридом много раз модифицировали приме-

<sup>1</sup> Klinman N. R., Press J. L. *Transplant Rev.* 1975, v. 24, p. 41.

<sup>2</sup> Köhler G., Milstein C. — *Nature*, 1975, v. 256, p. 495.

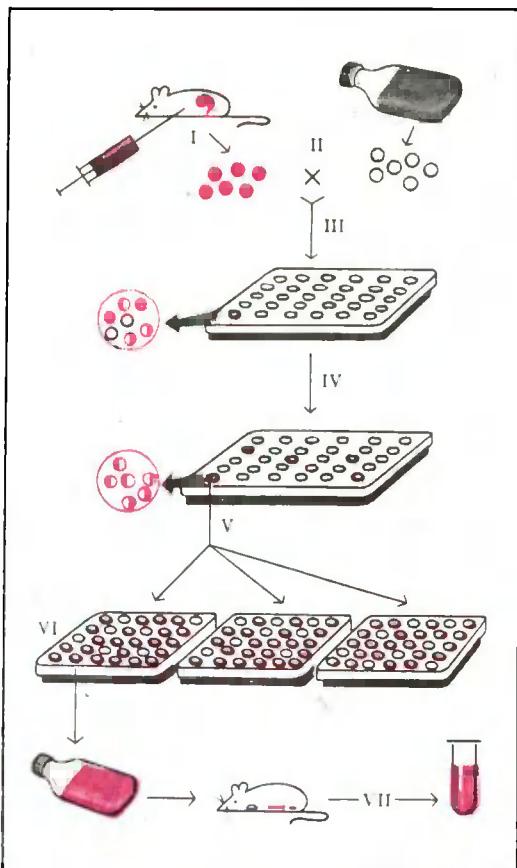


Схема получения и выделения гибридом, секретирующих моноклональные антитела. Пояснения в тексте.

нительно к задачам каждого конкретного исследования. Здесь важно остановиться лишь на основных этапах метода (см. схему на с. 82).

**Первый этап** — иммунизация животных. При этом нет необходимости добиваться высокой степени очистки вводимого антигена. Если в иммунизирующем препарате есть хотя бы ничтожное количество изучаемого антигена, проблема получения нужных антител сводится к выбору гибридного клона, секретирующего соответствующие антитела.

**Второй этап** — гибридизация, т. е. слияние в пробирке иммунных лимфоцитов селезенки мыши с клетками опухоли. В качестве фактора, способствующего соединению клеток, обычно используют полиэтиленгликоль. Как правило, антиген

вводят животному несколько раз, а гибридизацию проводят на 3—4-й день вслед за последней иммунизацией, поскольку в это время в селезенке больше всего клеток, образующих антитела.

**Третий этап** — отбор нужных гибридов. После гибридизации в пробирке присутствуют три типа клеток: родительские клетки — опухолевые и В-лимфоциты — и их потомки — гибридные клетки. Нормальные лимфоциты вне организма не могут жить долго и гибнут в течение нескольких дней. Опухолевые клетки можно удалить, используя метаболическую систему отбора, предложенную в 60-х годах Дж. Литтлфилдом<sup>3</sup>. Так что вскоре в пробирке остаются только гибридные клетки.

**Четвертый этап** — скрининг, или, иными словами, отбор из массы гибридов клеток, продуцирующих нужные нам антитела. Искользуемые здесь методы должны быть воспроизводимы, достаточно просты и продуктивны (от 200 до 300 анализов в день). Исследуемый антиген (это может быть клетка или растворимый антиген, иммобилизованный на каком-либо носителе) сначала обрабатывают культуральной средой, в которой растут гибридные клетки. Затем вводят в систему антитела, направленные против самих гибридных антител. Причем эти «вторые» антитела метят или радиоактивным иодом, или флуоресцентным красителем, или ферментом. Если в культуральной среде имеются нужные гибридомы, то метка связывается с антигеном.

**Пятый этап** — получение потомства одной гибридной клетки с устойчивой секрецией антител (клонирование). Он занимает основное время при работе, так как его приходится повторять многократно. Это объясняется несколькими причинами: во-первых, нужно быть уверенным в том, что антитела, которые мы считаем моноклональными, действительно производятся потомками только одной клетки; во-вторых, известно, что в ходе культивирования гибридные клетки постепенно теряют хромосомы, причем, как правило, полученные от нормальных лимфоцитов, а значит вместе с ними — и способность синтезировать антитела. Поэтому чем больше повторных клонирований, тем выше вероятность получения устойчивой ли-

<sup>3</sup> Littlefield J. W.— Exp. Cell. Res., 1966, v. 41, p. 190.



Препарат клеток костного мозга мыши, состоящий из различных клеток: лимфоидных, эритроидных, миелоидных и др. (слева). Этот же препарат живых клеток, обработанный моноклональными антителами и затем проинкубированный с другими антителами, меченными флуоресцентным красителем (справа). В сини-фиолетовом свете четко выявляются клетки, несущие на своей поверхности специфический антиген — эритробласты. Увел. 700. Препарат Е. С. Иовлевой, Е. Б. Мечетнера и А. С. Ходцева.

нии, стабильно секретирующей антитела. Обычно проводят 3—4 клонирования, до тех пор пока 90 % выросших клонов не будут продуцировать нужные антитела.

#### Шестой этап — снова скрининг.

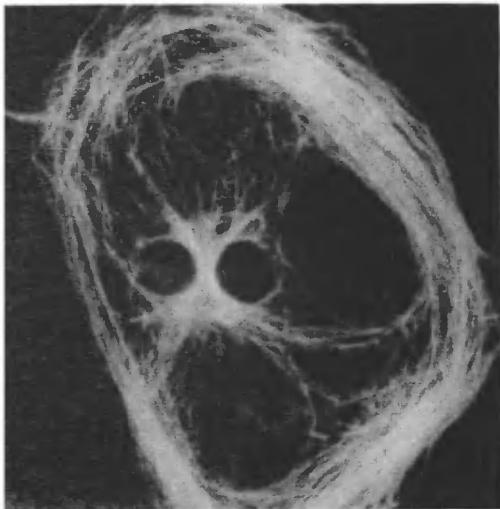
И наконец, **седьмой этап** — получение неограниченного количества моноклональных антител. Концентрация моноклональных антител в культуральной среде обычно невелика — 0,05 мг/мл. Поскольку гибридомы сохраняют свойства опухоли, они хорошо растут в организме, поэтому из сыворотки и асцитической жидкости мышей можно получить несколько миллиграммов чистых антител.

До сих пор речь шла о гибридомах, полученных на основе В-лимфоцитов. В настоящее время широко развивается направление, связанное с получением гибридом, образованных при гибридизации Т-лимфоцитов с Т-клеточными опухолями, так называемых Т-Т гибридом. Как известно, Т-клетки — это второй тип лимфоцитов, распознающих антигены, об устройстве и работе которых мы знаем гораздо меньше, чем о В-лимфоцитах. Появление

Т-Т гибридом позволяет изучать антиген-специфические рецепторы Т-лимфоцитов.

К началу 1983 г. было получено около 400 гибридомных линий. Организованы фирмы, делающие моноклональные антитела на заказ (в том числе и из «материала заказчика») и торгующие ими. Вклады в гибридомный бизнес в 1982 г. составили 60 млн долл., а к 1992 г. достигнут колоссальной суммы — 8 млрд долл. Методика получения и очистки моноклональных антител позволяет в достаточно короткие сроки получать гибридомы нужной специфичности, синтезирующие в промышленных масштабах моноклональные антитела. Себестоимость этих технологических процессов не слишком велика и неуклонно снижается.

Гибридомы и моноклональные антитела в первую очередь были использованы для решения иммунологических проблем: изучения механизмов образования антител и генетики иммуноглобулинов. Получены данные, подтверждающие существование перестроек генов иммуноглобулинов в нормальных В-лимфоцитах (в то время, как в прежних работах это было показано только для опухолевых клеток). Определена также локализация этих генов в хромосомах. С помощью гибридом стал возможен тонкий анализ уникальных участков антител, ответственных за антигенную специфичность. Моноклональные антитела представляют собой уникальный инструмент для анализа множества антигенов, и на этом примере следует еще раз подчеркнуть основное их преимуще-



Фиксированный фибробласт мышечного эмбриона, обработанный моноклональными антителами и «вторыми» антителами, меченными флуоресцентным красителем. В цитоплазме отчетливо видна сеть так называемых промежуточных филаментов, важного компонента клеточного скелета. Увел. 4500. Препарат и фото А. Д. Бершадского.

щество перед обычными сыворотками — высокую разрешающую способность.

Г. И. Абелев очень точно назвал метод гибридом «иммунологическим микроскопом» с колоссальным разрешением, позволяющим «увидеть» то, что не позволяли ранее поликлональные сыворотки, «увидеть» среди множества антигенных детерминант, одну, нужную.

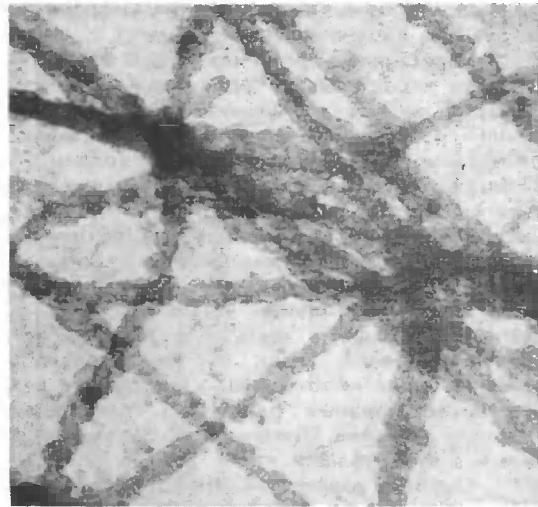
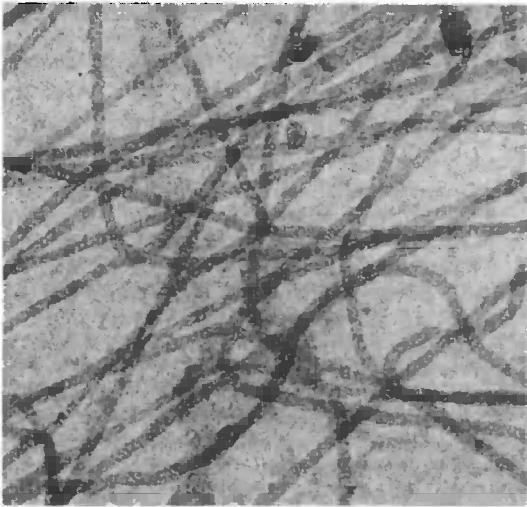
Умение выявлять тонкие различия в сходных по другим критериям антигенах, без сомнения, делают гибридомы незаменимыми в онкологических исследованиях. Уже сейчас моноклональные антитела нашли широкое применение в онкологии: прежде всего, при изучении дифференцировки в нормальных и опухолевых клетках, свойства трансформированной клетки, а также в онковирусологии. Гибридомы стали незаменимы в иммунодиагностике, когда нужно найти соответствующие антигены в крови, моче и др., в цитологических и иммунологических исследованиях, а также для обнаружения первичной опухоли и метастазов. Кроме того, их начали применять при лечении некоторых форм рака.

В области фундаментальных исследований исключительно важные результаты были достигнуты при изучении поверхност-

ных антигенов лимфоцитов. Т- и В-лимфоциты имеют общую клетку-предшественницу (так называемую стволовую лимфоидную клетку, которая в свою очередь происходит из стволовой клетки крови) и проходят по мере созревания несколько последовательных этапов развития. Т-лимфоциты неоднородны — выделяют несколько субпопуляций Т-клеток, имеющих различные функции: Т-киллеры, разрушающие чужеродные клетки, Т-супрессоры, подавляющие функции лимфоцитов, антиген-реактивные клетки и др. Каждый этап дифференцировки Т- и В-клеток, каждая субпопуляция Т-лимфоцитов характеризуются уникальным набором антигенов клеточной поверхности и их количественным соотношением, т. е. определенным фенотипом. Идентификация и выделение таких антигенов с использованием поликлональных сывороток были чрезвычайно сложными, в особенности когда речь шла о Т-клетках человека. Появление гибридом в корне изменило ситуацию: за несколько лет были получены десятки гибридных линий, секретирующих моноклональные антитела к различным антигенам Т- и В-лимфоцитов. На основании полученных данных была составлена схема лимфоидной дифференцировки, где каждая стадия созревания отличалась специфическим набором антигенов, выявляемых с помощью моноклональных антител.

Эта схема, имеющая большое значение для теоретической и экспериментальной иммунологии, открыла новые подходы к диагностике и прогнозированию лейкозов и лимфом. Еще в 60-е годы было доказано, что подавляющее большинство лейкозов — опухолей кроветворной системы — имеет клональную природу, т. е. все клетки лейкоза возникают в результате злокачественного перерождения одной нормальной кроветворной клетки. До введения моноклональных антител в клинику принадлежность клетки-родоначальницы к той или иной субпопуляции и стадии дифференцировки оценивали по морфологическим и цитохимическим критериям с привлечением хромосомного анализа и исследований клеточных функций. Все эти методы не обладают абсолютной разрешающей способностью.

Изучение различных форм лейкозов с применением большого набора моноклональных антител к мембранным антигенам кроветворных клеток позволило точно идентифицировать степень зрелости лейкозных клеток. В схеме лимфоидной дифференцировки каждой форме лейкоза или



Электронная микрофотография промежуточных филаментов эмбрионального фибробласта мышцы (слева). Тот же препарат, обработанный моноклональными антителами к белку промежуточных филаментов (справа). Хорошо видно, что промежуточные филаменты сильно утолщены за счет электронно-плотных узелков, которые образованы крупными молекулами иммуноглобулина класса М моноклональных антител. Именно это специфическое связывание позволяет выявлять промежуточные филаменты в реакции иммунофлуоресценции. Препарат и фото Т. М. Савиткиной.

лимфомы соответствует определенная стадия дифференцировки нормальных Т- и В-клеток. Таким образом, клиницист, имеющий набор моноклональных антител (в основном коммерческих) к различным поверхностным антигенам, может соотносить фенотип опухолевых клеток с определенной стадией нормальной кроветворной дифференцировки, что является отправным пунктом для выбора стратегии лечения пациента.

Яркой иллюстрацией сказанного служит следующий пример<sup>4</sup>. Хронический миелоидный лейкоз характеризуется появлением в костном мозге и крови большого количества трансформированных миелоидных клеток и их предшественников. При заболевании в первую очередь поражается стволовая кроветворная клетка. В хронической фазе болезнь те-

чет довольно вяло, однако в большинстве случаев через несколько лет возникает «сверхзлокачественный» лейкозный клон, вытесняющий остальные кроветворные клетки из костного мозга и крови, т. е. развивается так называемый бластный криз. Ранее гематологи на основании клинической картины и цитохимических данных описывали 2 основных типа бластного криза. Полную ясность в проблему внесли исследования с применением моноклональных антител. Миелоидный бластный криз, встречающийся в 70 % случаев, характеризуется плохим прогнозом: химиотерапия практически не эффективна, средний срок жизни больных — до 6 месяцев. В этом случае лейкозные клетки имеют на своей поверхности особый набор антигенов (маркеров Ia<sup>+</sup>, CALLA<sup>+</sup>, BI<sup>-</sup> My7<sup>-</sup>), сходный с маркерами острого миелоидного лейкоза. Клетки бластного криза 2-го типа, лимфоидного, по спектру фенотипических маркеров (Ia<sup>+</sup>, CALLA<sup>+</sup>, My7<sup>-</sup>) сходны с клетками острого пре-В-лимфолейкоза. Прогноз при лимфоидном типе бластного криза значительно лучше: химиотерапия приводит к улучшению, в некоторых случаях возможен возврат к хронической форме. Таким образом, клиницист, имея в руках набор всего из 4 моноклональных антител, может точно и быстро ставить диагноз, прогнозировать развитие заболевания и проводить активную лекарственную терапию.

Разумеется, область применения моноклональных антител не ограничивается лейкозами и лимфомами. Они используются при диагностике других опухолей

<sup>4</sup> Foon K. A., Schroff R. W., Gale R. P. — Blood, 1982, v. 60, p. 1.

(печени, молочных желез, легких, мочевого пузыря, кишечного тракта и др.).

Нарастание в крови некоторых белков служит характерным признаком роста определенной опухоли. Например, при первичном раке печени обнаруживается эмбриональный белок — альфафетопротеин<sup>5</sup>, а так называемый раково-эмбриональный антиген находят при раке толстого кишечника<sup>6</sup>. При злокачественных опухолях, возникающих из плазматических клеток, в крови и моче присутствуют иммуноглобулиновые продукты, класс и тип которых необходимо знать для лечения и прогнозирования. Ясно, что для такого анализа также необходимы стандартные и высокоспецифичные реагенты. Моноклональные антитела потеснили поликлональные и в этой области.

Особый вопрос — это диагностика *in vivo*, т. е. прямое введение антител в организм. При этом антитела метят радиоактивным изотопом, например иодом-125, вводят внутривенно и с помощью специального прибора измеряют уровень радиоактивности (скенируют) в каждой точке тела пациента. На скенограмме, обработанной с помощью ЭВМ, опухоли и метастазы видны в виде цветных пятен.

Несмотря на большие достижения в гибридной диагностике, многие исследователи считают, что моноклональные антитела навсегда останутся лишь диагностическим инструментом, и их применение в терапии вряд ли окажется возможным. Разумеется, существуют ограничения, требующие осторожности при введении моноклональных антител в организм, общие для иммунодиагностики и иммунотерапии. Повторное введение антител в организм может вызвать тяжелую реакцию вплоть до анафилактического шока. Кроме того, ряд факторов снижает эффективность действия моноклональных антител: часть антител нейтрализуется циркулирующим в крови антигеном; антитела могут неспецифически накапливаться в выделительных органах или адсорбироваться в тканях за счет имеющихся на различных клетках рецепторов к комплемент-связывающему участку иммуноглобулинов;

наконец, время жизни антител в организме ограничено.

Моноклональность связывание их с одной антигенной детерминантой) отражается на их эффективности при использовании в качестве лечебного препарата: взаимодействие с опухолевой клеткой может быть недостаточным для ее устранения; небольшое химическое изменение антигена в ходе заболевания приводит к неспособности антител узнавать его; может иметь место антигенная модуляция, т. е. данный антиген в результате реакции с антителом может исчезнуть с клеточной поверхности. Ситуация усложняется тем, что у онкологических больных опухолевая популяция может быть неоднородной и состоять из нескольких групп трансформированных клеток, несущих различные фенотипические маркеры. В этих случаях целесообразно использовать не один тип моноклональных тел, а сложный, но хорошо подобранный «коктейль» из моноклональных антител различной специфичности.

Если моноклональные антитела направлены против опухолевых антигенов, имеющих в нормальных клетках, возможно повреждение здоровых тканей. Поэтому очень важно получить моноклональные антитела, избирательно убивающие опухолевые клетки.

Таким образом, моноклональные антитела нельзя включать в традиционные схемы иммунотерапии. Необходим особый подход, или, говоря иначе, клиницистам нужно выработать «моноклональное лечебное мышление». Данное положение иллюстрируется следующими примерами.

Антиген CALLA (Common Acute Lymphoid Leukemia Antigen) присутствует на поверхности 80 % клеток В-лимфоцитов, 40 % клеток хронического миелолейкоза при бластном кризе, на клетках Т-лимфоцитарской лимфомы, лимфомы Беркитта, малодифференцированной нодулярной лимфомы, а также на небольшом количестве нормальных клеток костного мозга. Группа исследователей во главе с Дж. Ритцем получила против этого антигена моноклональные антитела J5 и использовала их при лечении острого лимфобластного лейкоза<sup>7</sup>. После внутривенного введения пациентам моноклональных антител J5 число лейкозных клеток резко падало, но затем

<sup>5</sup> А б е л е в Г. И. Изучение антигенной структуры опухолей.— В сб.: Тр. VII Междунар. противоракового конгр. М.— Л., 1963, т. 3, с. 224.

<sup>6</sup> G o l d P., F r e e d m a n S. O.— J. Exp. Med., 1965, v. 122, p. 467.

<sup>7</sup> R i t z J. et al.— Blood, 1981, v. 58, p. 78; R i t z J. et al.— J. Immunol., 1980, v. 125, p. 1506.

возрастало, по словам авторов работы, «так же катастрофически быстро, как снижалось до этого».

Анализ лейкозных клеток на клеточном сортире (проточном цитофлуориметре, позволяющем определять интенсивность свечения каждой отдельной клетки, окрашенной соответствующим красителем, и разделять клеточные популяции по этому признаку) дал интересные результаты. Выяснилось, что моноклональные антитела J5 убивают лейкозные клетки. Однако через 48 часов после начала введения в организм моноклональных антител антиген CALLA исчезает с мембраны опухолевых клеток. Оказалось, что это явление не зависит от «маскировки» CALLA: моноклональные антитела не закрывают детерминанты этого антигена. После прекращения введения моноклональных антител в организме вновь появляются в большом количестве клетки, несущие антиген CALLA. Исходя из этих наблюдений, исследователи предложили более тонкий и эффективный метод лечения острого лимфобластного лейкоза<sup>8</sup>. У пациентов в состоянии ремиссии брали костный мозг, содержащей не более 5% лейкозных blastов, и замораживали его в жидком азоте, чтобы сохранить жизнеспособность клеток. При ухудшении состояния больного костный мозг размораживали и обрабатывали моноклональными антителами J5. В результате такой обработки все лейкозные клетки, имеющие антиген CALLA, уничтожались, а здоровые кроветворные клетки оставались неповрежденными. Обработанную таким образом взвесь клеток вводили пациентам, прошедшим курс облучения и химиотерапии. В результате жесткой химиотерапии и высоких доз облучения в организме больного все лейкозные и здоровые кроветворные клетки погибали. Внутривенное введение размороженных и очищенных антителами от лейкозных клеток стволовых кроветворных клеток восстанавливало кроветворную систему больных. Строго говоря, и прежде использовали ремиссионный костный мозг для защиты больных, прошедших химио- и радиотерапию. Однако добиться такой степени очистки трансплантата от злокачественных клеток без моноклональных антител было невозможно. Предложенная схема лечения в ряде случаев дала стой-

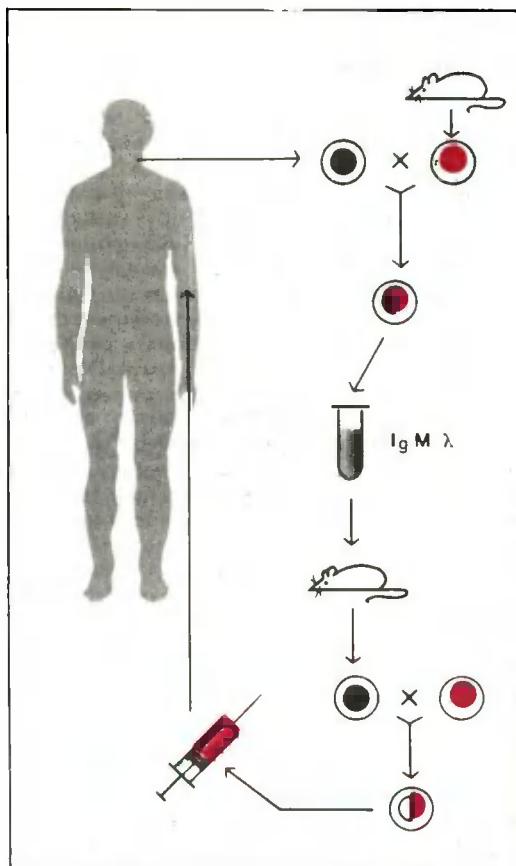


Схема лечения больного нодулярной лимфомой. Сначала клетки опухоли человека, взятые из лимфатического узла, сливали с миеломными клетками мыши (цветной кружок). Выделяли гибриды, вырабатывающие человеческий опухолевый иммуноглобулин IgMλ. Чистым продуктом иммунизировали мышь и гибридизировали лимфоциты из ее селезенки с мышиными миеломными клетками. Моноклональные антитела против IgMλ, продуцируемые гибридомой, вводили пациенту. В результате наступило длительное и стойкое улучшение (ремиссия).

кое улучшение состояния больного. Авторы этой работы считают, что более эффективно можно удалять опухолевые клетки не комплемент-зависимым лизисом, а используя клеточный сортир, обладающий высокой разрешающей способностью.

Помимо перечисленных приемов, повышающих эффективность моноклональных антител, разрабатываются и другие направления: снижение числа опухолевых клеток обычными методами химио- и радиотерапии; химическое объединение моноклональных антител с химиотерапевтиче-

<sup>8</sup> Ritz J. et al.— Blood, 1981; v. 58 (suppl.), p. 175 a.

скими агентами, растительными и микробными токсинами, радиоактивными веществами; введение моноклональных антител в липосомы.

До сих пор речь шла о моноклональных антителах, продуцируемых мышинными гибридами. Сейчас во многих лабораториях ведутся поиски миеломных линий человека, пригодных, подобно мышинным миеломам, для слияния с лимфоцитами человека. Клетки-гибриды «мышь—человек» довольно легко образуются, однако отличаются генетической нестабильностью и быстро утрачивают способность секретировать моноклональные антитела. Получение гибридом «человек—человек» откроет принципиально новые возможности в лечении с помощью моноклональных антител.

Понятно, что такие антитела менее чужеродны для организма человека, чем мышинные, и поэтому возможность их применения в терапевтических целях значительно шире. С другой стороны, они могли бы послужить для анализа иммунного ответа человека в норме и при различных заболеваниях, в частности аутоиммунных. Интенсивная работа в этом направлении не оставляет сомнений в том, что в ближайшее время миеломные человеческие линии, пригодные для гибридизации, будут получены.

Ярким образцом «моноклонального мышления» может служить подход Р. Миллера и соавторов к лечению особой формы В-лимфатического лейкоза, не поддающейся традиционным способам терапии (см. схему на с. 87).

Сначала с помощью гибридизации опухолевой клетки человека и миеломной клетки мыши были получены гибридные линии «мышь—человек», секретирующие человеческий иммуноглобулин IgM $\lambda$ , специфичный для поверхности лейкозных клеток. Этим иммуноглобулином иммунизировали мышей. Затем лимфоциты иммунизированных мышей, снова гибридизовали с клетками мышинной миеломы. Полученная гибридома «мышь—мышь» стабильно продуцировала моноклональные антитела, направленные против иммуноглобулина IgM $\lambda$ . После многократной инъекции таких моноклональных антител лимфатические узлы, селезенка и печень у больных приняли нормальные размеры, нормализовалась также картина крови. Спустя 8 месяцев после начала лечения моноклональными антителами пациент находился в хорошем состоянии<sup>9</sup>. На международном симпозиуме по гибридомам, состоявшемся зимой 1983 г. в Калифорнии, авторы сообщили,

что у больного сохранилось состояние полной ремиссии. К настоящему времени появились и другие сообщения об успешной терапии лейкозов с помощью моноклональных антител.

Мы хотим закончить статью словами Ц. Мильштейна: «Всегда трудно провести границу между фундаментальными и прикладными исследованиями, но на меня произвела глубокое впечатление возможность лично ощутить переход от одного типа исследований к другому. Сопряжение теоретических и прикладных исследований, свойственное вообще подавляющему большинству биологических проблем в настоящее время, приводит, с одной стороны, к тому, что в кратчайшие сроки достижения, полученные с помощью моноклональных антител, вводятся в клиническую практику и фармакологию, и, с другой стороны, позволяет клиницистам ставить принципиально новые задачи экспериментаторам, а промышленности щедро финансировать гибридные исследования»<sup>10</sup>.

Авторы будут считать целью, поставленную при написании статьи достигнутой, если нам удалось проиллюстрировать приведенные выше слова Ц. Мильштейна примерами использования моноклональных антител в экспериментальной и клинической онкологии и передать читателю ощущение «перехода от одного типа исследований к другому».

<sup>9</sup> Miller R. A. et al.— N. Engl. J. Med., 1982, v. 306, p. 517.

<sup>10</sup> Milstein C.— Scient. Amer., 1981, № 10, p. 35.

## Как образуются глубокие впадины на континентах?

Е. В. Артюшков



Евгений Викторович Артюшков, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР. Занимается проблемами геофизики. Автор многих работ, посвященных происхождению движений в недрах Земли и на ее поверхности, в том числе монографии: Геодинамика. М., 1979. Неоднократно печатался в «Природе». Член редколлегии журнала «Природа».

В результате бурного развития тектоники плит за последние 20 лет удалось построить достаточно стройную картину дрейфа материков и разрастания дна океана. В то же время природа основных процессов, происходящих в континентальной коре, оставалась неясной. Поэтому к концу прошлого десятилетия строение и развитие континентальной коры вновь стало привлекать основное внимание исследователей. Этим проблемам посвящена специально организованная международная программа «Литосфера» — одно из крупнейших международных мероприятий в науках о Земле 80-х годов.

Одновременно с дрейфом континентов по поверхности Земли постоянно происходят вертикальные движения земной коры. Наиболее интенсивные движения приводят к образованию глубоких впадин и высоких поднятий. Самые глубокие заполненные водой впадины на Земле — это океаны. Под ними лежит тонкая океаническая кора толщиной 5—7 км, состоящая в основном из базальта.

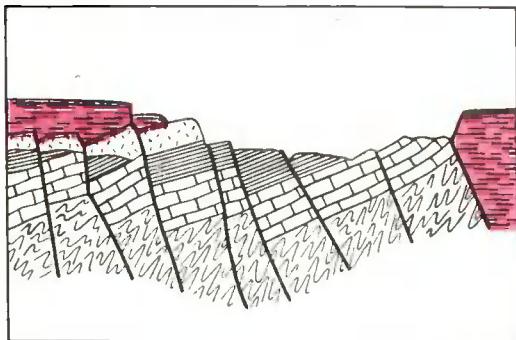
Земная кора под континентами в среднем имеет толщину 40 км. Характерной особенностью континентальной коры является наличие в ее верхней части гранитного слоя. Существует также много областей, где земная кора включает гранитный слой, но ее толщина меньше, чем на

континентах: 10—25 км. Такую кору считают утоненной корой континентального типа. Она обычно располагается под заполненными водой впадинами, глубина которых в среднем изменяется от одного до нескольких километров. Такие впадины шириной 100—150 км и более широко распространены, например, на окраинах Атлантического и Индийского океанов в переходной от шельфа к глубоководному дну океана зоне континентального склона. Крупные участки ряда краевых морей на активных тектонических окраинах Тихого океана, например основная часть площади Охотского моря, также подстилаются утоненной континентальной корой.

Большое число глубоководных впадин с такой корой располагается и внутри самих континентов. Так, под основной частью Черного моря с глубинами до 2 км находится утоненная кора, включающая гранитный слой. Считают, что лишь в центральной части этой впадины существуют два сравнительно небольших участка коры океанического типа, засыпанных мощным слоем осадков. Утоненная континентальная кора залегает и под основной частью Мексиканского залива, под Эгейским морем, под основной частью площади Тирренского моря, а также под целым рядом других глубоких впадин.

Получено много данных, свидетель-

ствующих о том, что поверхность коры во многих глубоких впадинах с утоненной континентальной корой ранее располагалась над уровнем моря или на небольшой глубине. При глубоководном бурении в некоторых глубоких впадинах были обнаружены мелководные осадки. Кора, поверхность которой ранее находилась вблизи уровня моря, должна была иметь толщину 35—40 км. Следовательно, существуют механизмы, которые приводят к сильному утонению коры и образованию глубоких впадин.



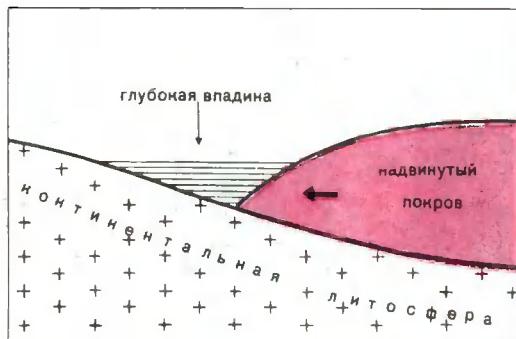
Наклонные блоки, образовавшиеся в верхней части коры при растяжении в Афарском рифте (Эфиопия).

Глубокие впадины на континентальной коре в современную эпоху покрывают площадь во много миллионов квадратных километров. Они являются одним из главных типов структур на континентах. Механизм их образования представляет одну из наиболее важных проблем в геодинамике. Он имеет и большое прикладное значение, поскольку со многими из таких впадин, в частности с упомянутым выше Мексиканским заливом, связаны крупные месторождения нефти и газа. Зная механизм образования впадин, можно было бы, например, лучше оценить температуры, которые существовали в коре и в мантии вскоре после погружения, а следовательно те глубины, на которых можно искать нефть и газ.

#### ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОГРУЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

Еще несколько десятилетий тому назад большинство исследователей отрицало значительные горизонтальные перемещения земной коры и ограничивалось рассмотрением лишь вертикальных движений.

Затем было получено большое количество данных о существовании дрейфа материков и разрастания дна океанов. После этого и вертикальные движения внутри материков также стали рассматривать как следствие горизонтальных движений (правда, иногда без особых доказательств). В частности, образование глубоких впадин на континентальной коре обычно объясняют ее сильным утонением при растяжении под влиянием горизонтальных перемещений литосферных плит. Конкретный механизм растяжения был предложен в 1968 г. для



Образование глубокой впадины в результате прогибания литосферы, на которую надвигается покров в эпоху сильного сжатия.

образования рифтовых впадин на континентах<sup>1</sup> — длинных, узких и глубоких депрессий шириной в среднем около 50 км. Типичный пример рифтовой впадины — озеро Байкал. Предполагалось, что такие впадины образуются за счет растяжения и утонения нижней части коры, где из-за высокой температуры вязкость понижена. Верхняя же, холодная часть коры обладает очень высокой вязкостью и потому не способна быстро растекаться. При растяжении она должна раскалываться на отдельные блоки.

Последующие сейсмические исследования действительно обнаружили значительное утонение коры под рядом рифтовых впадин, и в частности под озером Байкал. Установлено также, что верхний слой коры рифтовых впадин толщиной около 10 км сильно деформирован. В большинстве случаев растяжение приводит здесь к расколу коры на блоки шириной порядка одного или нескольких километров. Во вре-

<sup>1</sup> Артамьев М. Е., Артюшков Е. В. — Известия АН СССР, сер. геол., 1968, № 4, с. 58.

мя растяжения блоки скользят вдоль поверхности срыва, отделяющей их от вязко растягивающейся нижней части коры. При этом блоки наклоняются, что позволяет им покрывать расширяющуюся область.

Согласно первоначальной идее, сформулированной в 1968 г., растяжение континентальной коры может привести только к образованию узких рифтовых впадин шириной меньше или порядка 100 км. При более сильном растяжении в рифтовой зоне должен, по-видимому, происходить разрыв континентальной коры с образова-

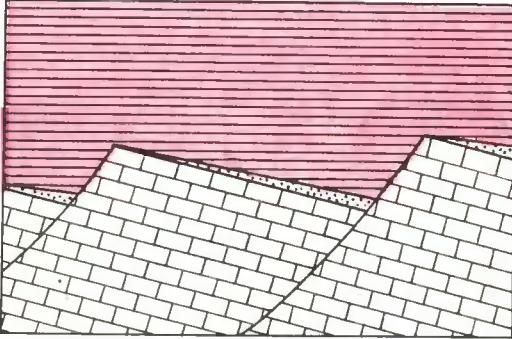


Схема залегания наклоненных блоков, образующихся при растяжении. Видно, как глубоководные слои прислоняются к мелководным под большим углом. Эти осадки разделены тонким переходным слоем, образующимся во время погружения. Граница между мелководными и глубоководными осадками имеет «пильобразную» форму.



нием новой океанической коры между расходящимися континентальными блоками. В 1978 г. один из создателей тектоники плит английский ученый Д. Маккензи опубликовал работу, в которой он применил механизм растяжения к крупным впадинам на континентальной коре шириной в сотни километров и более, таким как Северное и Эгейское моря и другие. В 1981 г. французские ученые К. Ле Пишон и Ж. Сибуэ выделили по сейсмическим данным наклоненные блоки, характерные для структур растяжения, под континентальным склоном Бискайского залива. Они высказали предположение, что континентальные склоны всех пассивных океанических окраин также были образованы в результате растяжения континентальной коры. После этого боль-

шинство ученых за рубежом стали рассматривать растяжение как доказанный механизм образования большинства глубоких впадин на континентальной коре.

Допускается также, что в ряде областей погружение континентальной коры может происходить без сильного растяжения. В таком случае его чаще всего связывают с двумя следующими механизмами. Первый механизм — это уплотнение коры и мантии при охлаждении. Для значительного погружения требуется охлаждение верхнего слоя Земли толщиной около 100 км. По времени этот процесс занимает 50—100 млн лет, т. е. погружение, связанное с охлаждением, развивается медленно. Кроме того, для погружения большой амплитуды требуется сильный предшествующий нагрев коры и мантии.

Второй механизм объясняет погружение действием нагрузки тектонических покровов большой толщины. В эпохи сильного сжатия в складчатых поясах происходит надвигание на кору на сотни километров покровов — пластин континентальной коры или океанической литосферы толщиной 5—25 км. Под их тяжестью возможно изгибание литосферы и погружение коры не только под самой пластиной, но и за ее пределами — на расстоянии до 150—200 км от края пластины. Как показывают расчеты, глубина впадины может достигать нескольких километров, если литосфера под тяжестью покрова деформируется как упругая оболочка. Этот механизм в настоящее время очень популярен среди североамериканских геологов и геофизиков. Они пытаются объяснить с его помощью многие погружения континентальной коры в Аппалачах и в Северо-Американских Кордильерах.

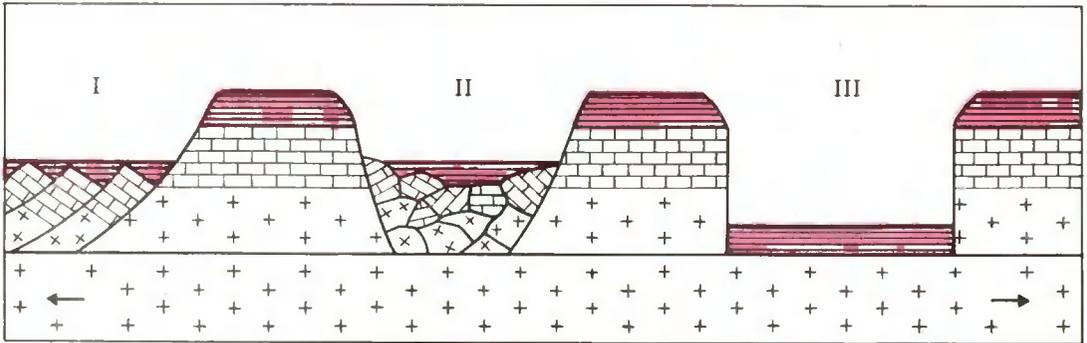
Впадины, образованные под нагрузкой пластины, возникают практически одновременно с ее надвижением. Их глубина возрастает по направлению к краю пластины. Эти признаки, в принципе, позволяют достаточно надежно отличать такие впадины от впадин, образованных другими механизмами.

Еще один механизм образования крупных глубоких впадин на континентах без сильного растяжения был предложен в 1976 г. А. Л. Яншиным, А. Е. Шлезингером и автором этой статьи<sup>2</sup>. Его основа — фазовый переход базальтовых пород, рас-

<sup>2</sup> Артюшков Е. В., Шлезингер А. Е., Яншин А. Л. Причины вертикальных движений земной коры. — Природа, 1979, № 10, с. 2.

полагающихся в нижней части континентальной коры, в эклогит, который представляет собой более плотную ассоциацию минералов. При давлениях, характерных для нижней части континентальной коры, базальты с плотностью 2,9—3,0 г/см<sup>3</sup> неустойчивы и должны превращаться в эклогит с плотностью 3,5—3,6 г/см<sup>3</sup>. Однако при низких температурах (300—500° С), характерных для базальтового слоя в большинстве стабильных континентальных областей, это превращение протекает очень медленно и не успевает развиться за сотни мил-

В ряде континентальных областей к коре из глубины поступают крупные объемы так называемой аномальной мантии с повышенной температурой и с пониженной плотностью около 3,25 г/см<sup>3</sup>. Если эта аномальная мантия имеет умеренную температуру 800—900° С и приносит с собой достаточное количество воды, базальт в самой нижней части коры быстро переходит в эклогит. Блоки тяжелого эклогита отрываются от коры и погружаются в менее плотную аномальную мантию с пониженной вязкостью. В результате этого процес-



Виды деформаций при срыве широких блоков с поверхности скольжения во время вязкого растяжения нижележащей части коры. Между расходящимися широкими блоками возникают большие промежутки. При сильном растяжении такие промежутки покрываются порядками половинной площади впадины. Обычно они заполняются узкими наклонными блоками [I], иногда — обломками пород коры неправильной формы [II]. В обоих случаях глубоководные слои, образовавшиеся после погружения, под большим углом прислоняются к мелководным. Можно допустить, что промежутки между блоками во время растяжения остаются пустыми. Тогда в них глубоководные осадки, образующиеся после растяжения, должны отлагаться на кристаллической континентальной коре, сложенной гранитами или гнейсами [III]. В действительности структуры подобного типа в складчатых поясах практически отсутствуют.

са может быть разрушен весь базальтовый слой или его значительная часть. Утоненная континентальная кора погружается с образованием впадины глубиной до нескольких километров. Этот механизм был использован для объяснения происхождения ряда современных и древних впадин, таких как Черное море, Южно-Каспийская впадина, Прикаспийская депрессия и другие. Однако тогда еще не удалось найти прямых доказательств того, что эти впадины действительно образовались за счет превращения базальта в эклогит.



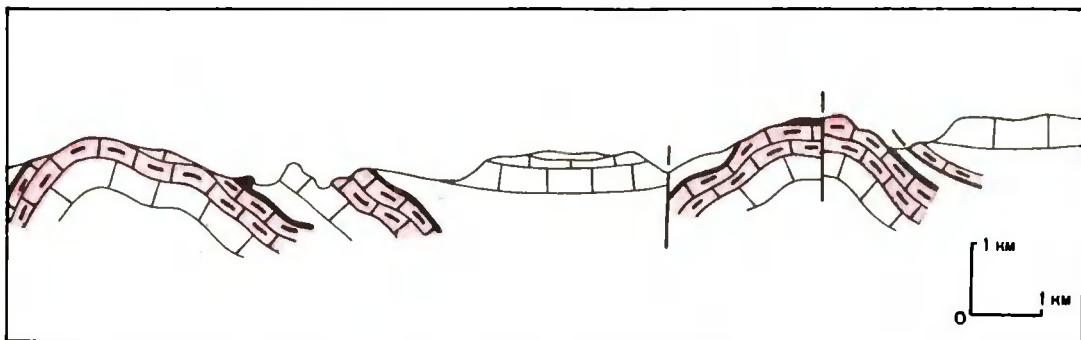
### КАК МОЖНО ВЫЯВИТЬ НАЛИЧИЕ ИЛИ ОТСУТСТВИЕ СИЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

Чтобы определить, как часто каждый из механизмов погружения континентальной коры проявляется в действительности, необходимо рассмотреть образование большого числа глубоких впадин на разных континентах и в различные эпохи. Большинство ученых главным механизмом образования таких впадин считают растяжение. Поэтому в первую очередь надо было установить, как часто встречаются в этих впадинах наклонные блоки — следы сильного растяжения.

лионов лет. Скорость фазового превращения резко возрастает с повышением температуры, а также при поступлении в породу небольшого количества воды — катализатора реакции. При этом сильное увеличение плотности имеет место только при температуре, не превышающей 800—900° С.

Зарубажные специалисты ищут сейчас следы растяжения подо многими современными глубокоководными впадинами на континентальной коре. Сделать это, однако, очень трудно. Во-первых, дно таких впадин находится на большой глубине, и каждую из них удается пробурить лишь в нескольких отдельных местах. Более того, наклоненные блоки, если они возникли при растяжении, должны были формироваться в тех слоях пород, которые отложились до сильного погружения. До этих слоев обычно не удается добуриться, так

М. А. Безром и автором этой статьи был выбран другой, более простой и наглядный способ для выявления роли растяжения в образовании глубоких впадин на континентальной коре<sup>3</sup>. Много таких впадин существовало на Земле в прошлые геологические эпохи. Большинство из них было впоследствии сильно сжато и вошло в состав так называемых складчатых поясов. В этих поясах осадочный чехол сжатых впадин во многих местах оказался на поверхности и стал доступен непосредственному наблюдению. Его строение хорошо изучено на



Фрагмент геологического профиля через мезозойские отложения Боснийской и Сербской зон Динарских гор в Югославии. Толщина переходного слоя между мелководными известняками и глубокоководными осадками, которые не содержат арагонита, составляет несколько десятков метров. Граница между мелководными и глубокоководными осадками видна в нескольких местах на протяжении от 1 до 5 км. В левой части рисунка она видна сразу в двух пластинках, наваленных друг на друга. Слои мелководных и глубокоководных пород на этой границе везде параллельны друг другу, хотя и сильно деформированы последующей складчатостью. Такое параллельное залегание указывает на отсутствие сильного растяжения во время погружения.

Кавказе и на Урале, в Альпах и других областях. В краевых частях складчатых поясов сохранился ряд слабо сжатых или вообще не деформированных впадин, которые когда-то были глубококими, но впоследствии оказались заполненными осадками. Строение их осадочного чехла во многих местах детально изучено с помощью бурения и сейсмического профилирования. Используя большой объем уже имеющихся данных о строении складчатых поясов, можно определить, как часто происходило в них сильное растяжение континентальной коры.

-  Мелководные известняки первой половины среднего триаса
-  Глубоководные кремнистые известняки второй половины среднего триаса и ранней юры
-  Глубоководные радиолариты средней и верхней юры
-  Разломы

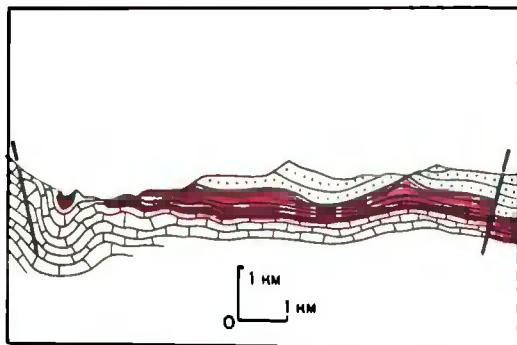
За последние два года удалось провести подробный анализ строения осадочного чехла большинства крупных впадин на континентальной коре, древних и современных, в наиболее хорошо изученных складчатых поясах. К ним относятся Альпийский пояс от Пиренейского п-ова до Гималаев включительно, Урал, Аппалачи, складчатые сооружения на севере Северной Америки и в Скандинавии, Северо-Американские Кордильеры и Верхояно-Колымская складчатая система на северо-

как они часто перекрыты мощным слоем осадков, накопившихся после погружения. Поэтому до сих пор удалось достаточно надежно исследовать строение осадочного чехла лишь в нескольких глубокоководных впадинах на континентальной коре.

<sup>3</sup> Artyushkov E. V., Baer M. A. — *Tectonophysics*, 1983, v. 100, p. 5; Артюшков Е. В., Безр М. А. — *Тихоокеанская геология*, 1984, № 2, с. 10; № 5, с. 12.

востоке нашей страны. Суммарная площадь, которая покрывалась здесь глубокими впадинами на континентальной коре, составляла многие миллионы квадратных километров. На преобладающей части площади не были обнаружены деформации, указывающие на сильное растяжение континентальной коры.

Рассмотрим несколько более подробно, как можно надежно установить наличие или отсутствие сильного растяжения в складчатых поясах. Во многих местах в них наблюдается граница между осадками,



Фрагмент геологического профиля через зону Тетиса в Западных Кумаонских Гималаях. Толщина переходного слоя между мелководными известняками и мелководными черными сланцами здесь составляет всего около одного метра. Нетрудно видеть, что слои по обе стороны этой границы параллельны друг другу. Кроме того, можно проследить непрерывность слоев мелководных пород на протяжении до 10 км. В них отсутствуют многочисленные сбросы, характерные для областей сильного растяжения.

-  Мелководные отложения средней и верхней юры
-  Верхнеюрские черные сланцы
-  Турбидиты
-  Разломы

образовавшимися на малой глубине до сильного погружения, и осадками, которые накопились на большой глубине после сильного погружения. Толщина переходного слоя между ними обычно невелика, от нескольких метров до нескольких десятков метров. Начальная глубина впадин после сильного погружения составляла 1—2,5 км. Можно рассчитать, что для образования впадин такой глубины за счет растяжения кора должна быть растянута в 1,3—2,7 раза.

При сильном растяжении в верхней части коры образуются узкие наклоненные блоки. Для указанной величины растяжения угол их наклона должен лежать в пределах от 15 до 35°. Столь сильно наклоненные блоки должны быть хорошо заметны в тех местах, где слои пород видны на поверхности на большом расстоянии, превышающем ширину блоков. В складчатых поясах известны сотни геологических разрезов длиной в 5—10 км и более. Однако наклоненные блоки наблюдаются в них очень редко — в одном или нескольких процентах случаев.

Переход между осадками, образовавшимися на мелководье до сильного погружения и на большой глубине после такого погружения, в складчатых поясах чаще всего наблюдается на сравнительно небольших обнажениях размером порядка 100 м. Насчитываются тысячи таких обнажений. Наклоненные блоки шириной в километр или более в них увидеть нельзя. Однако небольшие обнажения позволяют тем не менее легко обнаружить наклон блоков, если он имел место. Слои мелководных осадков в наклоненных блоках при растяжении поворачиваются вместе с блоками. Глубоководные слои, образующиеся после растяжения, отлагаются практически горизонтально. В результате мелководные слои на большей части площади впадины должны «прислоняться» к мелководным под большим углом порядка 15—35°. Такое прислонение, которое было названо «угловым несогласием растяжения» сохраняется и после сильных деформаций осадочного чехла, в процессе последующей складчатости.

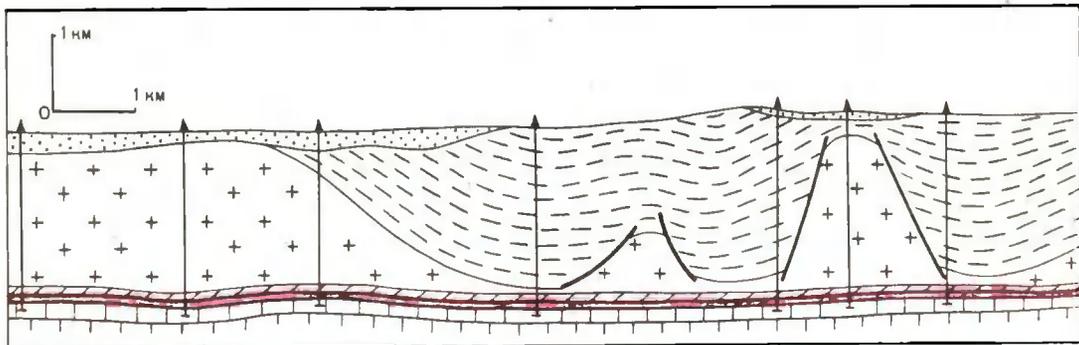
В подавляющем большинстве обнажений мелководные и мелководные слои в складчатых поясах залегают параллельно друг другу. Их прислонение под большими углами встречается лишь в одном или нескольких процентах случаев. Это означает, что растяжение с образованием наклоненных блоков, характерное для рифтовых впадин, в складчатых поясах происходило очень редко.

В рифтовых зонах при растяжении в верхней части коры иногда образуются блоки большой ширины порядка 10 км или более, сорванные с основания. Такие блоки существуют, например, в провинции Бассейнов и Хребтов на западе США. Широкие блоки скользят по поверхности срыва без вращения. Поэтому слои мелководных осадков должны на них отлагаться параллельно мелководным слоям.

Однако при сильном растяжении между блоками, скользящими без вращения, должны возникать широкие промежутки. Они обычно заполняются узкими наклонными блоками. Последние легко обнаруживаются по прислонению глубоководных слоев к мелководным на значительной части площади впадины. Если эти слои почти повсеместно залегают параллельно друг другу, то это исключает значительное растяжение любого вида.

Кратко существо вопроса можно суммировать следующим образом. Если погру-

жение в какой-то области было обусловлено сильным растяжением, то суммарная протяженность глубоководных слоев, образовавшихся после погружения, должна существенно превышать протяженность мелководных слоев, которые образовались непосредственно перед погружением. Тогда глубоководные слои на большей площади должны перекрывать слои значительно более древних осадков или кристаллическое основание. Если же глубоководные слои по всей площади впадины залегают на мелководных слоях параллельно послед-



Фрагмент геологического профиля через Предуральский прогиб. Слой мелководных известняков и доломитов и непосредственно перекрывающих их более глубоководных кремнистых и глинистых известняков и мергелей непрерывны и практически горизонтальны. В мелководных слоях нигде не видно разрывов с широкими промежутками, где относительно глубоководные слои ложились бы на кристаллическое основание. При образовании впадины глубиной около 1 км за счет растяжения с такими разрывами эти промежутки покрывали бы примерно 1/4 площади впадины. При растяжении с образованием наклонных блоков угол наклона был бы около 15°.

-  Четвертичные и третичные континентальные отложения
-  Отложения конца ранней перми и поздней перми
-  Пермские соленосные отложения

Глубоководные отложения позднего карбона и ранней перми:

-  мергели и глинистые известняки
-  кремнистые известняки
-  Средне- и позднекаменноугольные мелководные известняки и доломиты
-  Скважины

ним, то сильного растяжения быть не могло.

Погружение континентальной коры часто сопровождалось образованием в ней отдельных разломов-сбросов, удаленных друг от друга на расстояние в десятки километров и более. Наличие сбросов указывает на растяжение коры во время погружения. Однако при большом расстоянии между разломами величина растяжения оказывается очень небольшой — порядка нескольких процентов. Это растяжение много меньше того, которое требуется для образования глубокой впадины за счет растяжения. Сильное растяжение может быть достигнуто только при образовании густой системы сбросов, расположенных на расстоянии не более нескольких километров друг от друга. Более того, смещения соседних блоков вдоль сбросов должны быть порядка ширины этих блоков.

### НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛУБОКИХ ВПАДИН НА КОНТИНЕНТАХ

Чтобы получить представление о том, как происходили быстрые погружения континентальной коры, приведем несколько типичных примеров.

В палеозойское время и в начале мезозоя, в течение примерно 400 млн лет, на севере Африки, в Малой Азии и в Аравии существовали континентальные условия. В начале мезозоя эта область была покрыта шельфовым морским бассейном глубиной 50—100 м. Около 220 млн лет назад в его северной части произошло быстрое погружение. В результате образовалась глубокая Динарско-Таврская впадина шириной от 400 до 1000 км. Она простиралась на 3000 км от Восточных Альп до территории современного Ирана. За несколько

миллионов лет на этой обширной территории мелководные известняки сменились породами, в которых исчез известковый минерал арагонит. В эпоху погружения этот минерал накапливался в Средиземноморском поясе на глубине до 1,5 км, а глубже он растворялся в воде. Исчезновение в осадках арагонита означает, что дно впадины погрузилось ниже данной глубины.

Осадочный чехол впадины был сильно смят во время последующей складчатости, а затем он был поднят выше уровня моря. В результате размыва реками граница меж-

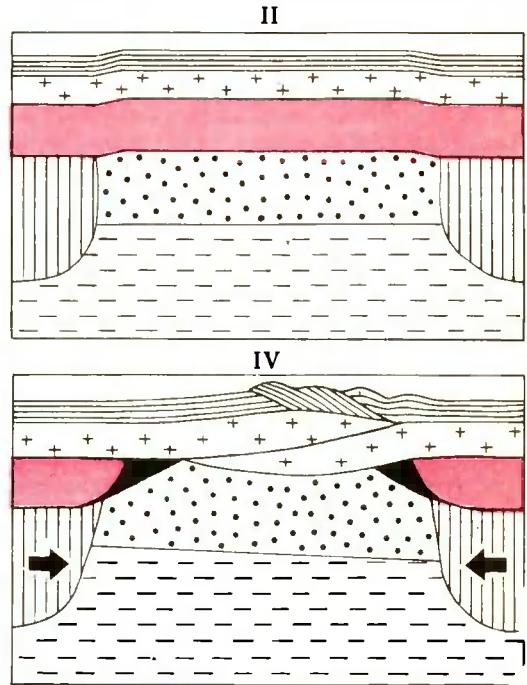
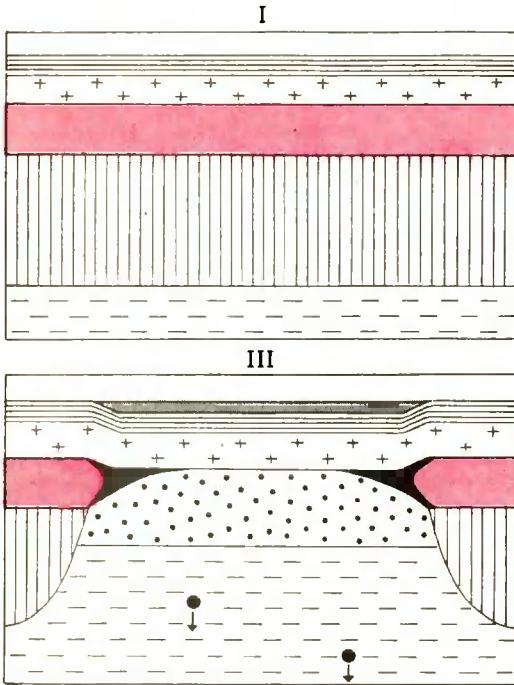


Схема последовательного развития континентальной коры от платформы до складчатого сооружения. I — формирование платформенной литосферы, включающей мощный слой холодной мантии; II — подход к коре аномальной мантии с умеренной температурой и образование небольшого поднятия на поверхности; III — образование глубоководной впадины — многоосинклинали — в результате разрушения базальтового слоя в процессе эклогитизации; IV — сжатие утоненной коры под влиянием сходящихся движений литосферных плит и образование складчатых сооружений на континентальной коре. Сжатие океанической коры, которая также входит в состав складчатых поясов, здесь не рассматривается.

-  Гранитный слой
-  Базальтовый слой
-  Эклогит
-  Мантия в подкоровой части литосферы
-  Аномальная мантия, относящаяся по своей вязкости и астеносфере
-  Нормальная астеносфера
-  Погружение эклогита в астеносферу

-  Вода
-  Осадочный слой

ду мелководными и глубоководными осадками оказалась хорошо видной во многих местах. Несмотря на то что слои были сильно деформированы складчатостью, на этой границе они практически во всех случаях параллельны друг другу. Отсюда следует, что погружение происходило без сильного растяжения. В то же время для образования впадины глубиной больше 1,5 км за счет растяжения нужно было бы растянуть кору по крайней мере в 1,6 раза.

Рассмотрим теперь область Гималайских гор на востоке Альпийского пояса. На основной части этой области в течение палеозоя и в первой половине мезозоя также существовал мелководный шельф. В позднеюрское время, около 150 млн лет назад, в области Тибетских Гималаев произошло небольшое поднятие коры, что сопровождалось кратковременным осушением шельфа. Затем последовало быстрое погружение, которое за время около 1 млн лет привело к образованию впадины длиной примерно в 2000 км и шириной около 300 км. В ней сначала накапливались черные сланцы, а затем турбидиты — ритмично переслаивающиеся песчаные и глинистые породы. В современном океане турбидиты отлагаются на континентальных склонах на значительных глубинах больше или порядка 2 км.

Впоследствии глубокая впадина, образовавшаяся в Тибетских Гималаях в поздней юре, была сильно сжата, а затем здесь образовались высокие горы. Граница между мелководными и глубоководными слоями видна в них во многих местах. Эти слои по обе стороны от данной границы везде параллельны друг другу. Это означает, что погружение происходило без сильного растяжения коры.

В двух описанных впадинах после погружения имело место сжатие коры, которое сильно деформировало слои, первоначально залегавшие горизонтально. Рассмотрим теперь пример области, где сжатия коры после погружения не происходило. На Урале в позднепалеозойское время, около 280 млн лет назад, погружение охватило восточный край Русской платформы, где до этого существовал мелководный шельф. В результате за время около 1 млн лет образовалась основная часть впадины Предуральского прогиба длиной примерно в 2000 км и шириной 100—200 км. Ее глубина на западном краю была около 1 км, а к востоку она, по-видимому, возрасла. Перед быстрым погружением имело место кратковременное поднятие коры на несколько сотен метров. Западная часть

Предуральского прогиба в дальнейшем осталась несмятой и была целиком заполнена осадками. Большая часть этой области детально разбурена и покрыта сейсмическим профилированием.

Перед погружением в Предуральском прогибе накапливались мелководные известняки и доломиты. После погружения они были перекрыты отложениями, характерными для достаточно глубоководных впадин — кремнистыми и глинистыми известняками и мергелями. Эти относительно глубоководные породы везде залегают на мелководных породах. Их слои горизонтальны и параллельны друг другу. Таким образом, здесь отчетливо видно, что протяженность слоев, накопившихся после погружения и до него, одинакова. Следовательно, при погружении существенного растяжения коры не происходило.

### С ЧЕМ БЫЛО СВЯЗАНО ОБРАЗОВАНИЕ БОЛЬШИНСТВА ГЛУБОКИХ ВПАДИН

Здесь приведены лишь отдельные примеры из большого числа рассмотренных глубоких впадин в указанных выше складчатых поясах. Подробное рассмотрение показало, что в подавляющем большинстве этих впадин, как и в рассмотренных здесь примерах, нет следов сильного растяжения во время погружения.

Таким образом, сильное растяжение, которое большинством исследователей считается главной причиной формирования глубоких впадин на континентах, в действительности проявляется редко. Этот результат нельзя было предсказать заранее, и он явился достаточно неожиданным. Очень малое количество структур сильного растяжения — рифтовых впадин — среди глубоких впадин на континентальной коре, по-видимому, можно объяснить следующим образом. Рифтовые впадины, как правило, распространены на поднятиях высотой в 1—2 км, и они очень редко бывают глубоководными. Так, в современную эпоху глубоководные условия существуют только в трех континентальных рифтах — в озерах Байкал, Танганьика и Ньяса. Их площадь по крайней мере на два порядка меньше суммарной площади, покрываемой современными глубокими впадинами на утоненной континентальной коре на пассивных и активных окраинах континентов и в Средиземноморском поясе.

Как отмечалось выше, погружение без сильного растяжения может быть связано с охлаждением коры и мантии, с на-

грузкой крупных покровов, надвинутых на соседние области, или с разрушением базальтового слоя при превращении базальта в эклогит. Исследование, предпринятое для выяснения роли растяжения, обнаружило также ряд других особенностей образования глубоких впадин, помимо отсутствия в них сильного растяжения. Эти особенности могут быть сопоставлены с характерными чертами трех указанных механизмов погружения без сильного растяжения.

Три впадины, описанные в предыдущем разделе, образовались очень быстро — за один или несколько миллионов лет. Оказалось, что и большинство других глубоких впадин в складчатых поясах формировались в среднем за несколько миллионов лет. Этот результат также является новым. Быстрое погружение ранее отмечалось лишь в отдельных случаях, и было неизвестно, что оно характерно для преобладающего большинства глубоководных впадин на континентальной коре. Образование в них глубоководных отложений, как правило, связывалось не с большой скоростью погружения, а с недостатком осадков, поступающих во впадины из соседних областей.

Время погружения в несколько миллионов лет много меньше характерного времени охлаждения коры и мантии — 50—100 млн лет. Поэтому быстрые погружения не могли быть обусловлены этим механизмом. Более того, погружения, которые приводили к образованию глубоких впадин на континентальной коре, чаще всего происходили в стабильных платформенных областях. Кора и мантия в таких областях уже имеют низкую температуру и не могут сильно охладиться дополнительно. Их значительное охлаждение и уплотнение возможно только после сильного предварительного нагрева. Сильный нагрев приводит, однако, к разуплотнению пород и образованию поднятия на поверхности Земли высотой в 1—2 км. Затем после охлаждения коры и мантии поверхность коры возвращается примерно к начальному уровню. Поэтому нельзя сформировать за счет охлаждения глубокую впадину в платформенной области, где кора до погружения располагалась вблизи уровня моря.

Образование большинства рассмотренных впадин происходило в то время, когда в соседних областях не имело места надвигание покровов. Некоторые впадины возникли почти одновременно с надвиганием, но их глубина возростала не по направлению к краю покрова, а по мере удаления от него. Напротив, в те эпохи,

когда покровы большой толщины перемещались на значительное расстояние, в прилегающих к ним областях глубокие впадины не образовывались. Это указывает на то, что нагрузка крупных покровов не играет существенной роли в формировании глубоких впадин.

Единственным известным механизмом, который может обеспечить быстрое погружение континентальной коры в отсутствие сильного растяжения или нагрузки надвигов, является эклогитизация. Отсюда еще, конечно, не следует, что именно с ней связано образование большинства глубоких впадин на континентах, и нельзя исключить, что в дальнейшем удастся найти какой-то новый механизм, который будет лучше описывать формирование этих структур. Существуют, однако, обстоятельства, которые указывают на большую вероятность эклогитизации под глубокими впадинами на континентальной коре.

Быстрая эклогитизация может происходить только при подходе к коре, содержащей воду аномальной мантии с умеренной температурой порядка 800°. Плотность такой аномальной мантии должна быть несколько ниже плотности холодной мантии, которая обычно располагается под корой в нижней части литосферы. Поэтому подъем к коре аномальной мантии с умеренной температурой должен сопровождаться слабым поднятием на поверхности Земли. Большинство быстрых погружений, которые приводили к образованию глубоких впадин, действительно предшествовали слабым поднятия коры, а во многих случаях и слабый вулканизм, иногда имевший место и во время самих погружений.

Еще одна особенность глубоких впадин на континентах заслуживает отдельного рассмотрения.

#### БЫСТРЫЕ ПОГРУЖЕНИЯ И СКЛАДЧАТОСТЬ

Толщина коры в платформенных областях в среднем составляет около 40 км. Скорее всего, примерно такую же толщину кора имела в тех платформенных областях, где происходили быстрые погружения. После погружения без сильного растяжения глубокие впадины в дальнейшем сжимались в процессе складчатости, так что их ширина уменьшалась в несколько раз и более. При этом толщина коры должна была возрасти во столько же раз по сравнению с толщиной коры во впадине. После сжатия коры глубоких впадин в несколько раз в большинстве современных складчатых об-

ластей толщина коры достигла 40—50 км. Так, под Кавказом, где имело место сжатие по крайней мере в два-три раза, она составляет примерно 50 км. В Альпах, где произошло трех-четырёхкратное сжатие, лишь в центральной части кора имеет толщину 55 км. Под Западными и Восточными Альпами она значительно тоньше. Следовательно, после быстрых погружений кора, имевшая вначале толщину около 40 км, должна была утониться до 10—20 км. Такое утонение без растяжения может быть, по-видимому, объяснено разрушением базальтового слоя в процессе быстрой эклогитизации.

Мощный базальтовый слой континентальной коры в складчатых поясах действительно никогда не обнажается на поверхности в крупных покровах. Эти покровы представляют собой пластины гранитно-осадочного слоя толщиной 5—25 км. Они обычно включают лишь тонкий слой базальтовых пород вблизи своей нижней границы. Наиболее толстые из этих пластин, вероятно, представляют собой утоненную континентальную кору, базальтовый слой которой был разрушен в результате эклогитизации.

В настоящее время многие исследователи, особенно за рубежом, считают, что любая впадина на континентальной коре, заполненная слоем осадков большой толщины, может быть сильно сжата. Эта точка зрения была впервые высказана американским геологом Д. Холлом еще в 1859 г. Глубокие впадины на континентальной коре, которые оказались сильно сжатыми (или могут оказаться сильно сжатыми в будущем), обычно называются миогеосинклиналями.

Как показал анализ развития главных складчатых поясов Земли, в сильное сжатие вовлекались отнюдь не любые впадины на континентальной коре. Помимо глубоких впадин, образованных быстрыми погружениями, существовало и существует также много впадин, погружение коры в которых происходило очень медленно, со скоростью 10—100 м за 1 млн лет. В результате чрезвычайно длительного развития таких погружений в спокойных платформенных условиях в течение 500—1500 млн лет в этих впадинах накапливалось до 10—15 км осадков. Медленные погружения не приводили, однако, к формированию глубоководных впадин, так как осадки успевали заполнить медленно образующуюся впадину. Примером впадин, возникших в результате медленного, но очень продолжительного погружения, может слу-

жить Вилкойская синеклиза на севере Восточной Сибири, где за последние 500 млн лет накопилось до 13 км мелководных и континентальных отложений.

На стадии медленного погружения значительного сжатия коры во впадинах не происходило, несмотря на то что многие соседние области интенсивно сжимались. Поэтому такие впадины, строго говоря, нельзя относить к миогеосинклиналям. Стабильность подобных впадин по отношению к сжатию, вероятно, связана с тем, что медленное погружение происходит на холодной платформенной литосфере. Толщина такой литосферы очень велика и оценивается как 100 км и более.

Большинство глубоких впадин, образованных быстрыми погружениями, были сильно сжаты вскоре после своего образования, войдя, таким образом, в состав складчатых поясов. Следовательно, эти структуры и представляют собой миогеосинклинали. Ряд миогеосинклиналей возник в результате быстрого погружения в областях, где перед этим долго происходило медленное компенсированное погружение. Такая картина характерна, например, для Северо-Американских Кордильер. Сильное сжатие коры, однако, произошло там только после быстрого погружения. В рассмотренных складчатых поясах не удалось найти ни одного сильно сжатого блока континентальной коры, который не прошел перед этим стадии быстрого погружения.

Сильное сжатие только тех впадин на континентальной коре, которые образованы быстрой эклогитизацией, можно, по-видимому, объяснить следующим образом<sup>4</sup>. После разрушения базальтового слоя в процессе эклогитизации мощность коры становится равной 10—20 км. Под эту тонкую кору подходит аномальная мантия, которая по своей вязкости относится к астеносфере. В результате толщина литосферы становится очень малой: 10—20 км. Такая тонкая литосфера может быть легко сжата (или разорвана с образованием океанического бассейна) под влиянием сходящихся движений литосферных плит, разделяемых впадиной. Толщина литосферы под холодными платформенными областями очень велика: больше или порядка 100 км. Такая толстая литосфера, вероятно, вообще не может быть сильно сжата в процессе дрейфа литосферных плит.

<sup>4</sup> Артюшков Е. В., Бээр М. А., Соболев С. В., Яншин А. Л.— Сов. геология, 1982, № 9, с. 22.

## Владимир Александрович Энгельгардт



10 июля 1984 г. на 90-м году жизни скончался выдающийся советский биохимик и организатор науки, директор Института молекулярной биологии АН СССР, Герой Социалистического Труда, академик Владимир Александрович Энгельгардт.

Советская наука, отечественная биология по праву гордятся выдающейся научной и общественной деятельностью В. А. Энгельгардта. Его блестящие экспериментальные изыскания и тонкий теоретический анализ многих биологических проблем снизили ему всемирную славу и умножили авторитет советской науки.

В. А. Энгельгардт родился 21 ноября

(4 декабря) 1894 г. в Москве. После окончания Ярославской гимназии в 1913 г. поступил на физико-математический факультет Московского университета, а через год перешел на медицинский факультет. Сразу после окончания университета в 1919 г. ушел на гражданскую войну, где был военным врачом Красной Армии на Южном фронте.

Научная деятельность В. А. Энгельгардта началась в 1921 г. в Биохимическом институте Наркомздрава РСФСР, которым тогда руководил А. Н. Бах. В этот период были выполнены первые работы по иммунохимии, разработаны новые микробиохими-

ческие методы, здесь проявился интерес к изучению превращений фосфорных соединений в процессе клеточного обмена веществ.

В 1929 г. В. А. Энгельгардт возглавил кафедру биохимии Казанского университета, где в начале 30-х годов им был впервые обнаружен процесс дыхательного фосфорилирования (анаэробный ресинтез АТФ, сопряженный с клеточным дыханием). В дальнейшем эта проблема стала одной из центральных в физиологии и биохимии клетки и выделилась в самостоятельную область — биоэнергетику. Работы по изучению дыхательного фосфорилирования были продолжены в Ленинграде на кафедре биохимии Ленинградского университета, которой В. А. Энгельгардт руководил с 1933 по 1940 г.

В 1939 г. было сделано и другое важное открытие: обнаружено, что сократительный белок мышц — миозин — обладает ферментативной активностью (катализирует реакцию расщепления богатых энергией связей АТФ). Эти работы впервые раскрыли конкретную связь между химическими явлениями в мышечном волокне и его механической функцией и положили начало новой области исследования, которую В. А. Энгельгардт назвал механо-химией мышцы. За выдающиеся исследования в области биохимии мышечных сокращений В. А. Энгельгардт и М. Н. Любимова (его многолетний сотрудник и супруга) в 1943 г. были удостоены Государственной премии СССР.

Открытие дыхательного фосфорилирования и АТФ-азной активности вошли в сокровищницу мировой науки и составили золотой фонд отечественной биохимии.

Экспериментальные работы по биохимии витаминов, выполненные в эти годы В. А. Энгельгардтом и его сотрудниками, послужили основой для создания витаминных концентратов, что было особенно важно в трудные военные годы. За эти работы в 1944 г. В. А. Энгельгардт был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В 1944 г. В. А. Энгельгардт утвержден действительным членом Академии медицинских наук, в 1946 г. был избран членом-корреспондентом, а в 1953 г. — действительным членом Академии наук СССР.

Начиная с 1950-х годов, В. А. Энгельгардт выступает как инициатор новой области биологической науки — молекулярной биологии, и в 1959 г. его усилиями был создан Институт молекулярной биологии АН СССР, который он возглавлял до последних

дней своей жизни. Благодаря его научно-организаторской деятельности институт стал крупным научным центром, получившим признание у нас в стране и за рубежом.

В конце 1971 г. В. А. Энгельгардт организовал единую комплексную и целевую научную программу исследований по обратной транскрипции «Ревертаза», во многом способствовавшую развитию генетической инженерии и молекулярной онкологии в нашей стране. В разработке и руководстве проектом «Ревертаза» наиболее ярко проявились его научное предвидение, талант организатора и воспитателя, умение решать сложные междисциплинарные научные проблемы кратчайшим путем. Успешное завершение научной программы проекта было отмечено в 1979 г. Государственной премией СССР.

Помимо научной деятельности В. А. Энгельгардт вел большую педагогическую работу, был одним из организаторов специального биохимического образования в СССР. Его блестящие лекционные курсы по биохимии клеточного обмена и энзимологии, прочитанные им в университетских аудиториях Москвы, Ленинграда и Казани, неизменно привлекали большую массу слушателей. Из лабораторий, руководимых В. А. Энгельгардтом, вышла целая армия прекрасных специалистов — его многочисленных учеников и последователей.

В. А. Энгельгардт был редактором многих изданий, создателем и главным редактором журнала «Молекулярная биология». Более десяти лет был членом редакционной коллегии журнала «Природа», где неустанно пропагандировал достижения молекулярной биологии.

Выдающиеся заслуги Владимира Александровича Энгельгардта отмечены многими наградами: ему было присвоено звание Героя Социалистического Труда, он был лауреатом Государственных премий СССР, кавалером пяти орденов Ленина, а также других орденов и медалей, в том числе Золотой медали имени М. В. Ломоносова — высшей награды Академии наук СССР. Он был членом ряда зарубежных академий, университетов и научных обществ. В течение многих лет он был членом Советского комитета защиты мира, участником Пагуошского движения ученых за мир, против ядерной угрозы.

Владимир Александрович Энгельгардт остался в нашей памяти как человек, проживший большую творческую жизнь, самоотверженно отдавший себя служению науке и людям.

**Редакционная коллегия**

## Космические исследования

**Запущены два японских спутника**

В начале 1984 г. в Японии с помощью японских ракет-носителей были запущены два спутника.

23 января с полигона Танегасима ракетой-носителем N-2 был осуществлен запуск спутника BS-2A, предназначенного для прямого телевизионного вещания. Это первый японский эксплуатационный спутник, который должен обеспечить ретрансляцию телевизионных передач на всю территорию страны. Вначале ракет-носитель вывела спутник на промежуточную орбиту, после выхода на которую спутник получил название «Юри-2А».

В середине февраля этот спутник был переведен с помощью бортового двигателя на стационарную орбиту; точка «стояния» на стационарной орбите  $110^\circ$  в. д.

Спутник разработан и изготовлен фирмой «Тосиба» (отделение американской фирмы «Дженерал Электрик»). Масса спутника на орбите 350 кг; расчетный срок эксплуатации 5 лет.

Спутник оснащен двумя ретрансляторами, работающими в диапазоне 12 ГГц; мощность передатчика 100 Вт. Передачи могут приниматься на бытовые приемники, оснащенные антеннами с отражателем диаметром 0,75—0,9 м (на территории Японии), и на приемники, оснащенные антеннами с отражателем диаметром 3 м (на удаленных островах страны). Затем планируется запустить спутник BS-2B, который будет использоваться в качестве резервного.

15 февраля 1984 г. с полигона Утиноура ракетой-носителем Ми-3S был запущен спутник «ЕХОС-С», предназначенный для исследований атмосферы

Земли. Ракета-носитель вывела спутник на орбиту высотой в перигее 354 км, в апогее — 865 км, наклонением  $74,6^\circ$  и периодом обращения 96,9 мин. После выведения на орбиту спутник получил название «Озора».

На спутнике массой 210 кг установлена научная аппаратура для проведения 11 экспериментов. Основная задача — определить содержание озона, двуокиси углерода и двуокиси серы в слое атмосферы на высотах 30—100 км. Исследования с помощью спутника «Озора» помогут выяснить, какой вред несут верхним и средним слоям атмосферы распыляемые аэрозоли и сжигание ископаемого топлива.

Запуск спутника «Озора» является вкладом Японии в программу MAP (Middle Atmosphere Program — программа исследований средней атмосферы) Air et Cosmos, 1984, № 990, p. 30 (Франция); Interavia Air Letter, 1984, № 10450, p. 7 (Швейцария).

## Астрофизика

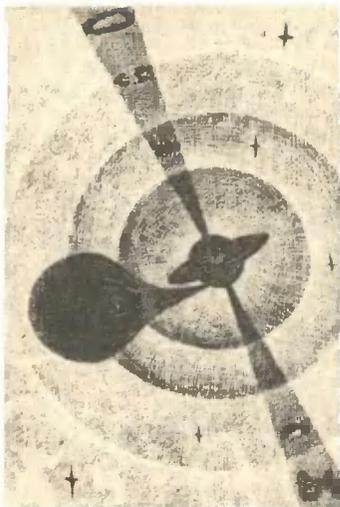
**SS 433 — черная дыра!**

Пятый год не ослабевает внимание астрофизиков к загадочному объекту SS 433 в созвездии Орла. Это источник оптического, радио- и рентгеновского излучения; в двух противоположных направлениях из него выбрасываются две узкие струи сравнительно холодного ( $10^4$  К) газа, движущегося с колоссальной скоростью — 80 000 км/с. Таких релятивистских скоростей не наблюдается больше нигде в нашей Галактике. Газовые струи, сохраняя взаимно противоположное направление, изменяют свою ориентацию в пространстве, описывая с периодом в 164 дня координатные поверхности<sup>1</sup>.

Интенсивные наблюдения, ведущиеся в десятках обсерваторий мира, показали, что SS 433 представляет собой двойную звездную систему, где в паре с нормальной звездой находится релятивистский объект — белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра. Толстый газовый диск, образовавшийся вокруг релятивистской звезды из вещества, падающего с нормальной соседки, и является тем «двойным соплом», которое формирует газовые струи. Разгоняется газ под действием мощного давления электромагнитного излучения, рождающегося в горячей центральной части диска. Чтобы определить тип релятивистского объекта, необходимо измерить его массу; если она превышает  $3,5\text{--}4 M_\odot$ , объект может быть только черной дырой.

Но определить массу невидимого спутника нормальной звезды — задача нелегкая. Ее можно частично решить, установив, с какой скоростью вращается вокруг центра масс двойной системы сама нормальная звезда. Обычно это делают, измеряя доплеровское смещение линий в спектре звезды. Но для SS 433 этот метод неприменим: в оптическом спектре нормальной звезды не видно линий. Отчасти в этом виновата сама звезда. Это горячий гигант высокой светимости, его оболочка очень нестационарна, она расширяется под действием светового давления и притяжения релятивистской звезды. Движение газа в оболочке мешает формированию узких спектральных линий. С наблюдательной точки зрения ситуация осложняется еще и тем, что оптический спектр источника сильно «засорен» излучением высокоскоростного газа и аккрецион-

<sup>1</sup> Колыхалов П. И., Любарский Ю. Э. Уникальный объект SS 433. — Природа, 1981, № 12, с. 19.



Возможное строение SS 433 в созвездии Орла. Видны нормальная звезда — горячий гигант, релятивистская звезда и аккреционный диск вокруг нее. В обе стороны от релятивистской звезды отходят узкие струи холодного газа, движущегося с огромными скоростями. [Рисунок В. М. Липунова.]

ного диска, который излучает не меньше света, чем сама нормальная звезда.

Учитывая трудности, возникающие при интерпретации спектров, А. В. Гончарский, З. Ю. Метлицкая и А. М. Черепашук (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга) использовали для определения характеристик SS 433 кривую изменения его оптического блеска. Дело в том, что в результате орбитального вращения с периодом 13 дней изменяется ориентация компонентов системы относительно земного наблюдателя. А оптическая яркость объекта существенно зависит от того, с какой стороны на него смотреть. Во-первых, излучение аккреционного диска возникает в его горячей центральной части, которая становится не видна, когда диск поворачивается к нам ребром. Во-вторых, излучение диска сильно нагревает и делает более яркой, повернутую к нему сторону нормальной звезды. В-третьих, нормальная звезда — не шар: под

действием притяжения соседки она приобрела грушеобразную форму и, вращаясь, показывает нам то большую, то меньшую часть площади своей поверхности. И, наконец, то звезда, то аккреционный диск частично закрывают от нас друг друга; в моменты затмений блеск системы значительно уменьшается. В результате все четыре эффекта (в действительности их еще больше) влияют на яркость источника. Тем не менее можно выделить вклад каждого эффекта и определить тем самым физические параметры звезды, газового диска и релятивистского объекта. Для этого необходимы мощные математические методы.

С помощью ЭВМ БЭСМ-6 авторы исследовали математическую модель двойной системы и установили, что наилучшее согласие теоретической и наблюдаемой кривых блеска достигается при следующих параметрах двойной системы: масса нормальной звезды второе превышает массу релятивистского объекта; аккреционный диск вносит 50—60 % в полную светимость системы; нормальная звезда заполняет свою полость Роша, т. е. ее внешние слои под действием центробежной силы и приливного влияния соседки почти полностью потеряли связь со звездой. В результате нормальная звезда интенсивно теряет вещество,  $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ . Почти все оно обрушивается на релятивистский объект, формирует вокруг него диск и по спирали приближается к его поверхности. Но релятивистская звезда, чем бы она ни была — белым карликом или черной дырой, не может «поглотить» такого количества вещества, ведь чем больше поток падает на релятивистский объект, тем больше энергии выделяется из-за трения слоев газа друг о друга. Светимость внутренних частей диска становится настолько большой, что давление излучения начинает превышать силу тяжести. Падение газа во внешних частях диска приостанавливается, но снаружи поступают все новые порции газа. «Лишний» газ начинает двигаться вдоль оси вращения диска и, подгоняемый световым давлением, приобре-

тает гигантскую скорость; действительно наблюдаемую в быстрых струях.

И, наконец, самый главный вопрос — какова масса релятивистского объекта? Расчет показал, что при массе нормальной звезды около  $18 M_{\odot}$ , масса ее релятивистской соседки 5—6  $M_{\odot}$ . Итак, черная дыра? Пока — еще один кандидат. Нужны дальнейшие наблюдения.

Астрономический журнал, 1984, т. 61, вып. 1, с. 124—135.

Астрофизика

Проект искусственного космического лазера

Впервые сильное нетепловое излучение на длинах волн 9,4 и 10,4 мкм было обнаружено в атмосферах Марса и Венеры А. Бетцем и др. (Калифорнийский университет, США)<sup>1</sup>. Предполагалось, что излучение вызвано поглощением солнечной радиации в близкой инфракрасной области: вначале происходит так называемый «столкновительный» переход поглощенного кванта на определенный колебательный уровень молекулы CO<sub>2</sub>, а уже затем — излучение в области 10 мкм.

Недавно Д. Деминг и М. Мумма (D. Deming, M. Mumma; НАСА, Гринбэлт, США) рассчитали модель этого излучения. Поток излучения, по этой модели, дает 100 %-ное совпадение с наблюдаемым потоком от Марса (14,4 эрг/см<sup>2</sup> · с при 130 К и 20,6 эрг/см<sup>2</sup> · с при 170 К) и 74 %-ное совпадение для Венеры (75,3 эрг/см<sup>2</sup> · с — теория и 56 ± 4 эрг/см<sup>2</sup> · с — наблюдение).

Лазерное усиление, которое имеет место в атмосфере Марса и Венеры, конечно, мало по сравнению с тем усилением, которое характерно для стан-

<sup>1</sup> Betz A. L., Johnson M. A., McLaren R. A., Sutton E. C. — *Astrophys. J.*, 1976, № 208, p. 144.

дартных лабораторных лазеров. Однако в таком космическом лазере огромный объем газа, а энергия накачки, идущая от Солнца, несравненно больше лабораторных мощностей. Исходя из этого, авторы предложили использовать атмосферу этих двух планет как естественную среду для конструирования лазера большого объема. Например, в случае Венеры использование больших зеркал, помещенных на орбиту высотой около 130 км и базой до 2500 км позволило бы получить экстремально большое значение мощности излучения за счет его резкой направленности и сжатия спектра. Расчетная величина мощности —  $5 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> (ограничивается скоростью накачки) — позволяет надеяться на создание искусственного космического лазера, интенсивность которого будет превышать 1 МВт.

Подобный лазер, по мнению авторов, можно было бы использовать для связи с внеземными цивилизациями (программа SETI), тем более что, согласно оценкам, такую связь лучше всего проводить именно в микроволновой части спектра. (Icarus, 1983, v. 55, p. 347 (США).

#### Физика

### Открыт новый вид естественной радиоактивности

Х. Роуз и Дж. Джоунс (Н. Роуз, G. Jones; Оксфордский университет, Англия) сообщили об открытии нового вида радиоактивного распада: ядра хорошо известного нестабильного изотопа радия <sup>223</sup>Ra (время жизни 11,2 дня), распадаясь, испускают не только  $\alpha$ -частицы, но и гораздо более тяжелые фрагменты — ядра изотопа углерода <sup>14</sup>C. Самопроизвольное испускание ядрами столь тяжелых частиц не является с теоретической точки зрения абсолютно невозможным, но процесс имеет столь малую вероятность, что обнаружить его экспериментально чрезвычайно

сложно. Достаточно сказать, что в эксперименте Роуза и Джоунса на один распад ядра <sup>223</sup>Ra с испусканием <sup>14</sup>C приходился миллиард распадов с испусканием  $\alpha$ -частицы.

В качестве источника использовался долгоживущий изотоп актиния <sup>227</sup>Ac (время жизни 21 год), с которым <sup>223</sup>Ra находится в равновесии. Заряд и энергия испускаемых частиц измерялись телескопической системой кремниевых детекторов. Поскольку экспериментаторы должны были предугадать и устранить все возможные процессы, имитирующие в аппаратуре искомое явление, то в течение полугода измерялся фон, создаваемый космическим излучением; кроме того, выполнены специальные исследования, позволившие отделить от истинных событий случайные совпадения импульсов от четырех  $\alpha$ -частиц, попавших в счетчик друг за другом с интервалом времени менее 100 нс. Вывод о том, что испускается именно <sup>14</sup>C, был сделан на основании измерения энергии распада и его вероятности; полученные данные сравнились с предсказаниями теории.

С точки зрения теории вероятность распада определяется двумя факторами. Первый (фактор Гамова) зависит от энергии распада и массовых чисел испускаемого фрагмента и дочернего ядра. Он рассчитывается с некоторой степенью достоверности. Второй фактор (так называемую вероятность формирования испускаемого фрагмента в материнском ядре) современные модели ядра предсказывают с плохой точностью. Ожидается, что он больше для плотно упакованных фрагментов с большой энергией связи, таких как  $\alpha$ -частица или ядро <sup>12</sup>C. Поэтому вызвало удивление, что <sup>223</sup>Ra испускает нестабильный изотоп <sup>14</sup>C, а не <sup>12</sup>C. Объяснить это можно большей энергетической выгодностью испускания <sup>14</sup>C, поскольку дочернее ядро <sup>209</sup>Pb в этом случае оказывается соседним с «магическим» ядром <sup>208</sup>Pb. В результате фактор Гамова компенсирует малую вероятность формирования <sup>14</sup>C.

Основываясь на резуль-

татах измерений скорости новой ветви распада и расчетах фактора Гамова, можно подсчитать, что если испускается <sup>14</sup>C, вероятность его формирования в ядре <sup>223</sup>Ra составляет  $7 \cdot 10^{-5}$  —  $4 \cdot 10^{-7}$  от вероятности формирования в этом ядре  $\alpha$ -частицы. Если же испускается <sup>12</sup>C, то вероятность его формирования составит 0,1—10 от вероятности формирования  $\alpha$ -частицы, а это слишком большая величина. Конечно, хотелось бы иметь более надежные основания для определения массы испускаемого фрагмента. На это в первую очередь и будут направлены усилия других экспериментальных групп. Подобные эксперименты уже проведены в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова<sup>1</sup> и планируются в Мичиганском университете (Ист-Лансинг, США).

Открытие распада <sup>223</sup>Ra → <sup>14</sup>C + <sup>209</sup>Pb наверняка вызовет вспышку интереса к поискам новых «экзотических» видов радиоактивности. Самопроизвольное испускание ядром тяжелого фрагмента как бы перебрасывает мост между столь, на первый взгляд, разными типами превращений тяжелых ядер, как  $\alpha$ -распад и деление на два осколка приблизительно равной массы. И в первую очередь это относится к так называемому сильно-асимметричному делению — процессу, в котором два осколка значительно различаются по массе. Экспериментальные указания на существование сильно-асимметричного деления неоднократно появлялись в научной литературе<sup>2</sup>, но не получили пока надежного подтверждения.

Nature, 1984, v. 307, p. 245—247 (Великобритания).

<sup>1</sup> Александров Т. В., Белявский А. Ф. и др. — Тезисы докладов 34-го Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра. Алма-Ата, апрель, 1984. Л., 1984, с. 269.

<sup>2</sup> Шуколюков Ю. А. и др. — Геохимия, 1966, № 8, с. 923; Rao V. K. et al. — Phys. Rev. C, 1974, v. 9, p. 1506.

Физика

### Расход ядерного горючего измерен по нейтринному излучению

Специалисты Ровенской АЭС во главе с В. А. Коровкиным и физики Института атомной энергии им. И. В. Курчатова под руководством Л. А. Микаэляна провели совместную работу, в которой нейтринное излучение впервые использовалось в практических целях. Работа выполнена в специализированной нейтринной лаборатории, функционирующей на Ровенской АЭС с 1982 г.<sup>1</sup>

Расход топлива (M) и выработка энергии (W) — основные характеристики любого энергетического устройства. В ядерном реакторе эти величины тесно связаны с нейтринным излучением: каждый акт деления ядра в активной зоне реактора приводит к увеличению массы, израсходованного ядерного горючего и дает вклад в выработку энергии, а образующиеся при делении β-радиоактивные ядра-осколки служат, как известно, источником нейтрино.

Нейтрино регистрируются по реакции обратного β-распада ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ ): фиксируются запаздывающие совпадения между позитроном и нейтроном, возникающим в реакции. Мишенью служит водород, входящий в состав жидкого органического сцинтиллятора.

В основе метода лежит связь между количеством зарегистрированных нейтрино  $N_\nu$  и числом актов деления  $N_f$  в активной зоне:

$$N_\nu = (N_f / R^2) \gamma, \quad \gamma = (\sigma_f / 4\pi) N_n \epsilon,$$
 где R — расстояние между реактором и детектором,  $N_n$  — число атомов водорода в сцинтилляторе,  $\epsilon$  — доля зарегистрированных в детекторе событий обратного β-распада,

$\sigma_f$  — сечение реакции обратного β-распада. По «показаниям прибора», т. е. числу нейтринных событий  $N_\nu$ , находят число делений  $N_f$  и, далее, массу прореагировавшего за время измерений горючего и энерговыработку реактора.

Нейтринный детектор используется двояко. Во-первых, для определения  $N_f$ , M и W (абсолютный метод). В этом случае требуется знание всех величин, входящих в приведенную выше формулу. Погрешность абсолютного метода еще довольно велика (12%), что связано с недостаточно точным знанием сечения  $\sigma_f$ . Во-вторых, детектор используется для определения постоянной γ (эталонный метод). Его шкалу предварительно градуируют путем фиксации показаний при различных уровнях мощности реактора, измеряемой тепловыми методами. Погрешность шкалы прибора в этом случае составила около 5%.

Были проведены контрольные измерения. В течение приблизительно недели непрерывно регистрировался нейтринный поток; одновременно тепловым методом определялась средняя мощность реактора. Были получены следующие результаты:

Метод	W, ГВт·сут	M, кг
нейтринный (абс.)	9,04	9,5
нейтринный (этал.)	9,79	10,3
тепловой	9,64	—

Авторы указывают, что погрешность нейтринного метода может быть в несколько раз уменьшена. Его принципиальные достоинства состоят в дистанционном и бесконтактном характере измерений. Отмечается, что можно представить себе условия, при которых нейтринный метод окажется основным источником информации о цепной реакции деления.

Атомная энергия, 1984, т. 56, № 4, с. 214—218.

Физика

### Физические критерии возникновения жизни

Л. Л. Морозов, В. В. Кузьмин и В. И. Гольданский (Институт химической физики АН СССР) разработали подход, с помощью которого можно оценить вероятность возникновения жизни на различных космологических объектах, в том числе и на планетах типа ранней Земли.

Все чаще возникновения жизни в ходе предбиологической эволюции рассматривают как процесс самоорганизации в системах, далеких от состояния равновесия. В результате этого процесса исходное хаотичное предбиологическое состояние системы теряет устойчивость, а затем система приходит к новому устойчивому состоянию. Это новое стационарное состояние — ранняя биосфера, возникающая в результате перехода «беспорядок → порядок», характеризуется определенной упорядоченностью, единством; например, единым генетическим кодом, использованием единственной из возможных L- или D-зеркально изомерных форм органических молекул (белков, углеводов) и т. д.

Согласно новым положениям статистической физики, новое состояние отличается от хаотического, симметричного, нарушенной симметрией, мерой чего служит параметр порядка p. Например, p можно определить как отношение (L—D) / (L+D). В свою очередь, процесс перехода «беспорядок → порядок» характеризуется параметром  $\tau_{\text{exp}}$  — временем ожидания нарушения симметрии. Таким образом,  $\tau_{\text{exp}}$  можно рассматривать как время ожидания возникновения жизни из хаотичного предбиологического состояния. Величина  $\tau_{\text{exp}}$  зависит от свойств этого состояния: температуры T, плотности частиц  $\rho$ , энергии их взаимодействия ΔH. Зная физические характеристики исходного состояния космологического объекта, можно оценить  $\tau_{\text{exp}}$ , а сопоставив  $\tau_{\text{exp}}$  со временем существования космологического объекта  $\tau_{\text{сущ}}$  можно оценить возможности формирования

<sup>1</sup> Микаэлян Л. А. Нейтринная лаборатория на Ровенской АЭС.— Природа, 1983, № 9, с. 43; Эксперименты по обратному β-распаду протона.— Природа, 1984, № 2, с. 106.

ранней биосферы на этом объекте.

Как один из возможных вариантов перехода «беспорядок → порядок» Л. Л. Морозов с соавторами рассмотрели переход от симметричного (рацемического) состояния органической материи с равновероятными L- и D-формами молекул зеркальных изомеров к состоянию с одной преобладающей формой. Подобный вариант нарушения симметрии особенно интересен, поскольку для Земли характерна L-форма аминокислот; именно в этой форме аминокислоты входят в состав белков.

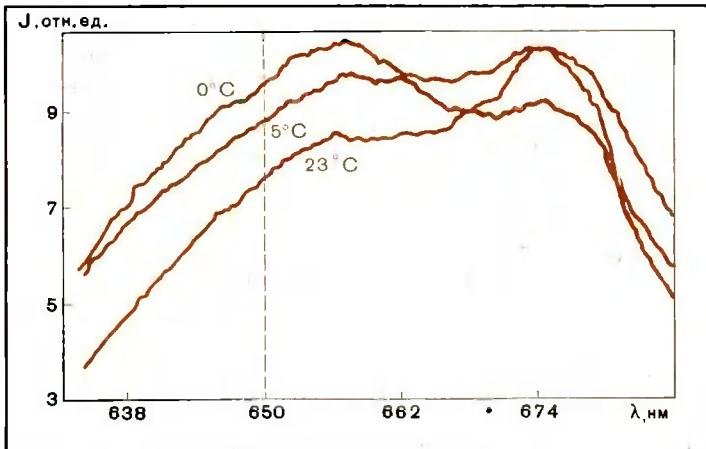
Авторы предположили, что в исходной симметричной системе, типа водной среды на ранней Земле, с  $T \approx 300$  К и  $\rho \approx 10^{21}$  частиц/см<sup>3</sup> время от времени в результате каких-то флуктуаций возникали зародыши фазы с нарушенной симметрией, у которых  $\Delta H/kT \sim 10$  (что соответствует пептидной связи), с постоянной структуры  $a \sim 10^{-8}$  см. При этих условиях, как показали расчеты,  $T_{\text{ср}} \approx 10^6$  лет, что значительно меньше времени существования Земли ( $\sim 4 \cdot 10^9$  лет). Отсюда был сделан вывод, что физические условия на космологических объектах типа ранней Земли пригодны для формирования биоорганического мира на основе тех структур и тех взаимодействий, которые мы действительно наблюдаем на Земле. Доклады АН СССР, 1984, т. 274, № 6, с. 1497—1500; т. 275, № 1, с. 198—201.

#### Физика

### По синезеленым определяют температуру океана

Общезвестна роль синезеленых<sup>1</sup> в биологии водных масс, составляющих фитопланктон — основной источник кислорода и органических веществ

<sup>1</sup> Название происходит от сине-зеленого цвета этих водорослей, обусловленного пигментами хлорофиллом и фикоцианином.



Спектры люминесценции синезеленых в воде при различных температурах.  $J$  — интенсивность излучения.

для других водных организмов. Но оказалось, что синезеленые могут быть полезны и для решения задач гидрооптики, например для дистанционного определения динамических параметров приповерхностного слоя океана.

Обычно для этого используют температурную зависимость спектра комбинационного рассеяния света на молекулах воды. Ф. В. Бункин, Д. В. Власов, Л. М. Герасименко и В. П. Слободянин (Институт общей физики АН СССР) предложили определять температуру воды по спектрам люминесценции синезеленых, присутствующих в приповерхностных слоях воды. Существует ряд физических механизмов, определяющих изменение спектра люминесценции с температурой. В частности, это изменение может быть обусловлено перераспределением в населенности колебательных уровней, изменением средних расстояний между атомами в молекуле, межмолекулярной релаксацией и т. п. В органических объектах температурная зависимость спектра люминесценции может быть связана с изменением состояния и активности микроорганизма.

Эти соображения были проверены экспериментально.

Для возбуждения люминесценции синезеленых использовался аргоновый лазер ЛГ-106М; регистрация спектров проводилась оптическим многоканальным спектроанализатором. Спектры люминесценции синезеленых записывались при различных температурах. Как показали эксперименты, если регистрировать интенсивность сигнала в области, скажем, 650 нм, то по изменению спектра можно судить о температуре воды.

Квантовая электроника, 1983, т. 10, № 8, с. 1529—1531.

#### Химическая физика

### Графит из углеводов

Известно, что при температуре выше 1000 °С и давлении, близком к атмосферному, углеводороды претерпевают сложные превращения, разлагаясь в конечном итоге на углерод и водород. Углерод, в зависимости от условий разложения и строения исходных соединений, имеет или неупорядоченную (сажа), или двумерно-упорядоченную (кокс) структуру.

Исследования, проведенные сотрудниками Института физики высоких давлений АН СССР и Института органической химии им. Н. Д. Зелинского АН СССР, показали, что при высоком давлении и температурах

порядка 1000 °С возможна полная графитизация углерода, образующегося при разложении углеводородов. Эксперименты проводились в аппарате, обеспечивающем давление 4—8 ГПа (40—80 тыс. атм) при одновременном нагреве исследуемых образцов. Термическому разложению подвергались твердые углеводороды различного молекулярного веса и строения: каменноугольные и нефтяные пеки, нафталин, адамантан, антрацен, толан, парафин, полиэтилен и т. п. С помощью рентгеновского дифрактометра и электронного микроскопа было установлено, что все исследованные углеводороды, разлагаясь, образуют графит — углерод с трехмерно-упорядоченной гексагональной структурой.

По степени упорядоченности решетки получающийся графит превосходит лучшие формы природного графита, который широко используется в электротехнике. Предполагается, что графитизация углерода, образующегося при термическом разложении в условиях высокого давления, — достаточно общее явление, присущее углеводородам различного типа.

Доклады АН СССР, 1984, т. 274, № 1, с. 100—102.

#### Биохимия

### Пептид сна против стресса

Под влиянием эмоционально-болевого стресса наряду с поражением сердца, сосудов, желудка ухудшается работа иммунной системы организма; в частности, снижается активность «атакующих» клеток (киллеров), ответственных за сопротивляемость организма опухолевым заболеваниям (или за противоопухолевую резистентность).

Было показано, что в ответ на эмоционально-болевого стресс активируется ГАМК-эргическая (т. е. действующая на  $\gamma$ -амино-масляную кислоту) система, действие которой направлено в первую очередь на снижение концентрации адреналина в надпочечниках и сердце. Таким образом, естествен-

ный «тормоз» ограничивает стрессорную реакцию в организме<sup>1</sup>. Один из конечных метаболитов этой тормозной системы —  $\gamma$ -оксимасляную кислоту — можно использовать для профилактики чрезмерных стрессорных повреждений внутренних органов.

Можно ли таким способом защитить и иммунную систему организма? Как показали эксперименты, проведенные группой исследователей из Института общей и патологической физиологии АМН СССР, Института биоорганической химии им. М. М. Шемякина АН СССР и Института морфологии человека АМН СССР, предупредить депрессию киллеров при стрессе можно, причем не только введением  $\gamma$ -оксимасляной кислоты, но и с помощью другого тормозного агента — образующегося в мозгу во время сна эндогенного пептида дельта-сна.

Опыты проводили на мышках-самцах; животных разделили на три группы: контрольную; группу, подвергавшуюся стрессу, где животных заставляли находиться без движения в течение 6 часов, и группу, которой перед стрессом вводили вещество-«тормоз» ( $\gamma$ -оксимасляную кислоту или пептид дельта-сна). Для определения активности киллеров предварительно готовили культуру опухолевых клеток-мишеней, меченных радиоактивным хромом.

Через сутки после стресса спленоциты (клетки селезенки, среди которых киллеры составляют почти половину) подопытного животного инкубировали в течение 4 часов вместе с опухолевыми клетками в термостате, а затем исследовали жидкую среду, полученную после центрифугирования и отделения клеток. Об активности киллеров судили по радиоактивности среды, так как пораженные киллерами клетки-ми-

шени, разрушаясь, высвобождают радиоактивный хром. Чем больше радиоактивность осадка, тем выше активность киллеров.

По сравнению с контрольной группой у животных, подвергшихся стрессу, активность киллеров снижалась на 30—55%. Если же перед иммобилизацией животным вводили  $\gamma$ -оксимасляную кислоту, активность иммунных клеток снижалась значительно меньше. Введение животным перед стрессом естественного пептида дельта-сна также прекрасно защищало их иммунную систему: в этом случае активность киллеров мало отличалась от контроля. Еще больший защитный эффект получен при использовании синтетического аналога, циклического пептида дельта-сна; система противоопухолевой резистентности организма совсем не пострадала после стресса.

Существенно, что полное предупреждение стрессорных повреждений киллеров было достигнуто, когда доза синтетического пептида была в 6000 раз меньше, чем доза  $\gamma$ -оксимасляной кислоты, необходимая для получения того же эффекта.

Доклады АН СССР, 1984, т. 274, № 2, с. 482—484.

#### Биохимия

### Хлеб с добавкой отрубей

При сортовом помоле зерна пшеницы источником муки служит основная, внутренняя часть зерна — эндосперм. Остальные части: алейроновый и приалеироновый слои, зародыш будущего растения, богатые белками, жирами, сахарами, витаминами, ферментами и другими соединениями, плодовая и семенная оболочка, состоящие в основном из балластных веществ, — с трудом поддаются измельчению и попадают в отруби. В итоге при переработке зерна в отруби уходит до 20% его массы, в том числе вещества, необ-

<sup>1</sup> Меерсон Ф. З., Малышев В. В., Попова Н. С. и др. — Булл. эксп. биол. и мед., 1979, т. 88, № 12, с. 659.

ходимые для нормальной жизнедеятельности организма. По имеющимся данным, мука из целого зерна без отбора отрубей содержит по сравнению с пшеничной мукой первого сорта больше белка на 16%, аминокислот — на 10—25%, лизина — на 70% и витаминов — на 75%. Однако использование отрубей — непростая задача; имеются определенные трудности перевода составных частей отрубей в легко усваиваемые организмом соединения.

Группа под руководством Н. С. Ениколопьяна (Институт синтетических полимерных материалов АН СССР, Научно-производственные объединения «Хлебпром» и «Норпласт») провела физико-химическое исследование тонкоизмельченных отрубей и их влияния на пищевую ценность хлебных продуктов.

При помолке отрубей происходит разрыв прочных клеточных стенок, и неорганические и органические вещества переходят в измельченный материал, который в итоге обогащается белком, фосфором, калием, магнием. Продукты, изготовленные из муки с такой добавкой, обладают повышенными пищевыми качествами.

Важную роль в оценке питательных и технологических свойств муки играет наличие в ней жироподобных веществ — липидов. Среди входящих в отруби частей особенно богат жирами зародыш зерна; он отличается наибольшей пластичностью и труднее всего поддается измельчению. При тонком помолке клетки зародыша расщепляются, высвобождая токоферолы, составляющие витамин Е. Однако поскольку токоферолы участвуют в процессах окисления липидов, тормозя эти процессы, то витамин Е расходуется; поэтому для сохранения биологических свойств муки (т. е. определенного содержания в ней витамина Е) муку с добавкой тонкоизмельченных отрубей следует использовать только в строго ограниченные сроки.

На основании полученных данных предложена рецептура и технология приготовления нового вида хлеба с включением отрубей тонкого помола. Продукт обладает улучшенными

органолептическими качествами и повышенной биологической ценностью. Заключение авторитетных медицинских учреждений (1-го Московского медицинского института им. И. М. Сеченова и Института питания АМН СССР) и дегустационных комиссий подтверждают целесообразность организации массового производства нового сорта хлеба.

Доклады АН СССР, 1984, т. 274, № 6, с. 1403—1407.



Биохимия

### Адаптация клеток к металлам

В настоящее время интенсивно изучаются адаптивные способности клеток животных и человека к действию различных металлов. Этому актуальному вопросу посвящен обзор литературы, сделанный М. Г. Черианом и М. Нордбергом (M. G. Cherian, M. Nordberg; Университет в Умео, Швеция).

Как известно, многие металлы, попадая в организм из воды, почвы, атмосферного воздуха, вызывают хронические отравления и способствуют возникновению ряда тяжелых заболеваний. Обнаружено, однако, что клетки животных могут приспосабливаться к металлам благодаря связыванию их белками и переводу в нетоксичную, нерекреационноспособную форму.

Способность связывать металлы присуща как цитоплазматическим, так и ядерным белкам. В цитоплазме выявлен особый тип белка — металлопротеин, называемый также металлоотионином, который имеет специфические центры связывания металлов. Методами ядерного магнитного резонанса и рентгенокристаллографии в металлоотионине млекопитающих идентифицировано два центра связывания. Один из них способен присоединять 3, а другой — 4 иона двухвалентных металлов. На том основании, что в печени новорожденных млекопитающих обнаружено

высокое содержание металлоотионина, связанного с ионами цинка и меди, сделано заключение, что белок металлоотионин выполняет роль внутриклеточного хранилища некоторых необходимых организму металлов, в частности цинка и меди. Функцию белка-хранилища металлоотионин сочетает, таким образом, с функцией обезвреживания попадающих в клетку металлов путем их связывания и перевода в нетоксичную форму. Интересно, что синтез металлоотионина в клетках «запускается» теми же проникающими в нее металлами. Чем больше металла поступает в клетку, тем активнее синтезируются связывающие его белковые молекулы.

Сродство различных металлов к металлоотионину неодинаково: наиболее активно присоединяются к нему ионы кадмия, свинца, меди, ртути, цинка, серебра, никеля и кобальта. Образование комплексов с металлоотионином — не единственная реакция клеток, направленная на обезвреживание проникающих в них металлов. Установлено, например, что медь, висмут, ртуть и свинец способны активно включаться также в состав белков клеточного ядра, а золото и ртуть изолируются в фаголизосомах.

Биологическое значение разных типов реакции клеток на воздействие металлов и особенности адаптации к тем или иным металлам пока окончательно не выяснены, однако считается, что ведущая роль в подобных реакциях принадлежит металлоотионину.

Toxicology, 1983, v. 28, № 1—2, p. 1—15 (Нидерланды).

Медицина

### Лечение диабета введением инсулина через рот

В организме инсулин, вырабатываемый поджелудочной железой, через воротную вену сразу попадает в печень, где от 50 до 60% его задержи-

вається. При інсулінзависимом сахарном діабеті інсулін вводиться шляхом підкожних ін'єкцій. При такому способі введення він внаслідок поступає в загальну циркуляцію крові і тільки потім — в печінку. В результаті во багатьох випадках виникають діабетическі ускладнення (патологія печінки і ліпідистрофія). Крім того, підкожне введення інсуліну доволно болезненно і чреватим ризиком внесення інфекції. Зручніше було б вводити інсулін через рот, якщо якимсь способом захистити гормон від руйнівного впливу протилітических ферментів шлунково-кишечного тракту. В останні роки для цього стали використовувати ліпосомы: штискусственно получаемые сферические частицы диаметром не более 10 мкм, образованные из бимолекулярного слоя липидов.

Сотрудники Научно-исследовательского института по биологическим испытаниям химических соединений, Всесоюзного научно-исследовательского института фармации и Московского медицинского института им. Н. И. Пирогова изучали действие инсулина, введенного с помощью липосом, на течение сахарного диабета у крыс. Испызовали бычий инсулин в дозе 2 единицы на животное из расчета, что внутрь липосом включалось около 5% этого препарата. Сахарный диабет у животных вызывали введением аллоксангидрата в дозе 150 мг на кг массы тела. 38 крысам с тяжелой формой сахарного диабета инсулин в липосомах вводили через рот в пищеварительный тракт. Без лечения животные с тяжелой формой заболевания погибали в течение первой недели после введения аллоксангидрата. После введения инсулина в липосомах уже через 1 час отмечали тенденцию к уменьшению уровня глюкозы в крови. Еще более явно уровень глюкозы падал через 4 часа. Даже спустя 24 часа после введения инсулина с помощью липосом у 90% крыс уровень глюкозы был ниже, чем до введения препарата. Состояние животных улучшалось: они становились активнее, увеличивалась продолжительность их жизни. В то же

время введение липосом без инсулина или одного инсулина терапевтического действия не оказывало.

По мнению авторов работы, лечебное действие инсулина, заключенного в липосомы, связано с высвобождением этого препарата из липидной оболочки уже после проникновения липосом в кровяное русло.

Химико-фармацевтический журнал, 1983, т. XXVII, № 1, с. 52—55.

#### Вирусология

### Нейраминидаза возбудителя чумы

Фермент нейраминидаза широко распространен у микроорганизмов. Нейраминидазы различного происхождения избирательно гидролизуют субстраты, содержащие N-ацилнейраминовые кислоты. Изучение свойств нейраминидазы позволяет утверждать, что, помимо других функций, она усиливает болезнетворные свойства бактерий и вирусов.

Б. Н. Мишанькин и Н. Я. Шиманюк (Научно-исследовательский противочумный институт, Ростов-на-Дону) обнаружили нейраминидазу у возбудителя чумы (*Yersinia pestis*). В опытах чумные бактерии разрушали, растирая их с песком на колоде, экстрагировали ацетатным буфером, затем экстракт центрифугировали, и в надосадочной жидкости была обнаружена нейраминидаза. На присутствие нейраминидазы в экстрактах разрушенных бактерий указывал тот факт, что под действием этой жидкости от соответствующего субстрата отщеплялась нейраминавая кислота.

Полученный фермент был подвергнут концентрации и очистке; в результате его активность увеличилась почти в 200 раз. Иммунологический и электрофоретический анализы в полиакриламидном геле продемонстрировали гомогенность фермента. Оказалось, что он представляет собой гликопротеин, который предпочтительнее

всего действует на высокополимерные субстраты. Молекулярная масса нейраминидазы возбудителя чумы близка к 250 тыс. Д. Определены оптимальные для ее действия диапазон pH среды, устойчивость к воздействию различных температур, субстратная специфичность и другие свойства. Особенности новой нейраминидазы — сравнительная устойчивость к нагреву. Это свойство, а также относительно высокая молекулярная масса делает эту нейраминидазу похожей на нейраминидазы вирусов.

Авторы высказывают предположение, что нейраминидаза возбудителя чумы принимает участие в развитии болезнетворного процесса, вызываемого этими бактериями у людей и животных.

Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии, 1983, № 9, с. 70—74.

#### Вирусология

### Предупреждение бешенства

Как известно, бешенство лечению не поддается. Предотвратить его возникновение можно лишь с помощью вакцинации и введения антирабической (от лат. *rabies* — бешенство) сыворотки. Однако в ряде случаев не спасает даже своевременное проведение полного курса вакцинации. Дело в том, что введение наряду с вакциной антирабической сыворотки (это необходимо для удлинения инкубационного периода заболевания) отчасти тормозит развитие активного иммунитета.

В последние годы появились работы советских и зарубежных исследователей, свидетельствующие о положительном влиянии на предупреждение бешенства индукторов интерферона. С. В. Грибенча, Н. Н. Носик, И. Ф. Баринский и Ф. И. Ершов (Институт вирусологии им. Д. И. Ивановского АМН СССР) исследовали защитное действие двуспиральной

РНК, которая оказалась еще одним индуктором интерферона<sup>1</sup>. Опыт проводили на мышах. Животным внутримышечно вводили уличный вирус бешенства, через 24 часа вводили препараты РНК (50 мкг/мышь, т. е. 3,3 мг/кг), а еще через 4 часа начинали вакцинацию. В результате в контрольной группе после заражения вирусом заболело и пало 89 % животных. Проведение одной только вакцинации в другой группе мышей также оказалось неэффективным (т. е. не отличалось от контроля). Введение только индуктора интерферона в мозг защищало от гибели около 21 % животных. Внутримышечное и внутривенное введение индуктора от бешенства не защищало, но удлиняло среднюю продолжительность жизни мышей по сравнению с контролем. Комбинированное применение вакцины и РНК давало достоверный защитный эффект при всех путях введения индуктора интерферона, но лучшие результаты были получены при введении РНК в мозг. Даже у тех животных, которые все же заболели бешенством, при этом способе введения РНК средняя продолжительность жизни была наивысшей. При других путях введения средняя продолжительность жизни животных, заболевших бешенством, была меньше, но больше, чем в контроле. Положительный эффект отмечался и при более поздних сроках введения РНК после заражения (например, спустя 72 часа).

Таким образом, введение препарата двуспиральной РНК удлиняет средний инкубационный период бешенства, увеличивая время для проведения вакцинации и способствуя тем самым созданию достаточно высокого уровня иммунитета. Важно отметить, что внутримозговое введение РНК в определенном проценте случаев предотвращает возникновение бешенства.

Вопросы вирусологии, 1983, т. 28, № 5, с. 590—594.

## Психофизиология

### Эндогенные опиаты и внимание

Опиаты (морфиноподобные препараты) снижают способность к концентрации внимания. В последние годы повысился интерес к функции эндогенных опиатов, продуцируемых самим мозгом<sup>1</sup>. Известно, что концентрация внимания на каком-либо сигнале-раздражителе увеличивается амплитуду отклонения электрического потенциала, регистрируемого с поверхности головы примерно через 0,1—0,3 с после воздействия раздражителя; одновременно уменьшается аналогичная электрофизиологическая реакция на другие раздражители. Разность между амплитудой отклонений на «нужные» и «ненужные» сигналы является наиболее объективным показателем избирательного внимания<sup>2</sup>.

Группа американских психофизиологов и психофармакологов из Калифорнийского университета провела следующее исследование. Здоровым испытуемым-добровольцам вводили препарат налоксон, обладающий узкоспецифическим действием; он блокирует участки нервных клеток, чувствительные к опиатам, и тем самым снимает влияние последних. На этом фоне предъявляли три типа звуков, причем внимание требовалось лишь к одному из них. Электрический индикатор внимания (упоминавшаяся разность амплитуд) оказался при этом значительно большим, чем на фоне других (контрольных) веществ.

Поскольку испытуемые не принимали никаких морфиноподобных препаратов, эффект налоксона следует связать с бло-

кадой действия эндогенных опиатов, которые, следовательно, отрицательно влияют на процессы избирательного внимания. Nature, 1983, в. 304, № 5928, p. 725—727 (Великобритания).

## Психология

### Бессознательная жестикуляция

Распространенная в психиатрии точка зрения, будто бессознательные жесты человека (почесывание, потирание кожи, постукивание пальцами, одергивание платья и многое другое) выражают внутренний конфликт и служат для снятия напряжения, пока недостаточно обоснована. Американские психологи из Берри-Колледжа, возглавляемые Х. Уайлдом (H. Wilde; Маунт-Берри, штат Джорджия) считают, что такое бессознательное поведение может быть непосредственно вызвано (независимо от внутреннего психического состояния) определенной стимуляцией.

Две одинаковые группы студентов просматривали схожие учебные документальные фильмы: один — о поведении насекомых, другой — о поведении птиц. Группы не различались по возрасту, полу, расписанию занятий. Оба фильма длились ровно по 14 мин. Несколько наблюдателей, скрытых от глаз испытуемых и не знавших о цели эксперимента, подсчитывали число касаний тела рукой (независимо от длительности и места касания). У лиц, смотревших фильм о насекомых, количество контактов руки с телом было более чем в два раза больше, чем у другой группы.

По-видимому, бессознательная жестикуляция в данном случае была следствием специфической стимуляции, а вовсе не «внутреннего конфликта». Авторы предостерегают, однако, от напрашивающегося объяснения: наблюдая насекомых, человек словно чувствует их на своем теле. Не исключено, что

<sup>1</sup> См., напр.: Механизм влияния алкоголя на эмоции.— Природа, 1983, № 4, с. 112.

<sup>2</sup> См.: Отражение процесса внимания на энцефалограмме.— Природа, 1980, № 3, с. 114; Вызванные потенциалы — ценный диагностический признак.— Природа, 1982, № 8, с. 110.

<sup>1</sup> Односпиральная РНК не является индуктором интерферона.

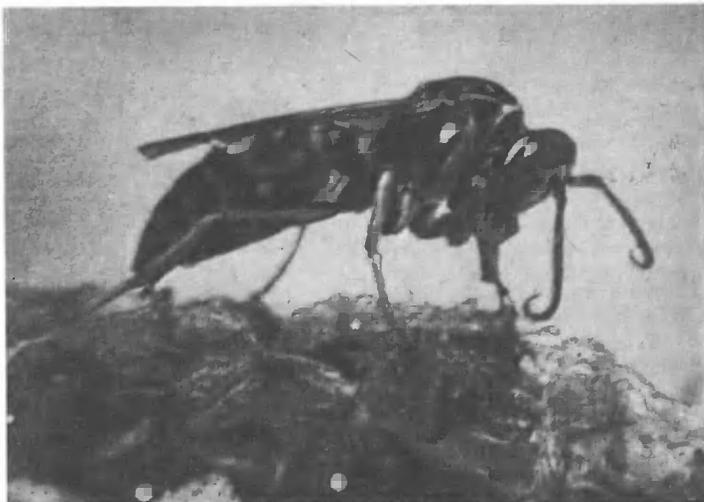
имеются простые рефлекторные механизмы почесывания при виде насекомых. Возможно также, что фильм о насекомых вызвал общее эмоциональное, двигательное возбуждение и именно оно (а не конкретная стимуляция) послужило причиной избыточной жестикуляции. Проверить это можно было бы на опыте с показом другого эмоциогенного фильма, без насекомых. Таким образом, вопрос о причинах бессознательной жестикуляции у человека остается открытым. *Perceptual and Motor Skills*, 1983, v. 56, p. 547—550 (США).

#### Биология

### Особенности социальной организации насекомых

Обычно в колониях перепончатокрылых — самой богатой видами группе общественных насекомых — роль рабочих выполняют самки с недоразвитыми яичниками, а монополия откладки яиц принадлежит матке (в некоторых случаях маток может быть несколько). При этом самцы не принимают участия в социальной жизни колонии<sup>1</sup>. Однако на ранних стадиях развития социальной организации из описанной общей схемы наблюдается ряд исключений.

Первое исключение — откладывание яиц рабочими. У шмелей, ос, некоторых видов муравьев при ослабевании контроля со стороны матки над рабочими последние начинают откладывать яйца, но неоплодотворенные, гаплоидные, из которых у перепончатокрылых выводятся самцы. Как показали исследования энтомолога С. Мияно, у японской бумажной осы-полиста (*Polistes chinensis antennalis*), в колониях которой обычно насчитывается не более нескольких десятков обитателей, откладывание яиц рабочи-



Самец осы-полиста, обрабатывающий комочек белкового корма перед спариванием личинок.

ми не исключение, а норма<sup>2</sup>. Пометив индивидуально всех ос в двух колониях, Мияно вел за ними длительные наблюдения. Выяснилось, что в одной колонии все, а в другой — половина самцов была произведена рабочими. Удивительно также, что в первой колонии, где самцы были выведены в избытке благодаря деятельности рабочих, матка вовсе не откладывала неоплодотворенных яиц, как бы замечая, что их уже достаточно.

Второе исключение из обычной схемы организации колонии — спаривание рабочих. Энтомолог Е. Казуя, наблюдавший за жизнью ос-полистов того же вида, отметил в 5 колониях из 30 (16,7%) ранний (вместе с первыми рабочими) выход самцов, хотя считалось, что они появляются лишь осенью, одновременно с молодыми матками. Некоторые рабочие спаривались с этими ранними самцами и начинали откладывать также и оплодотворенные яйца, из которых выходили самки (рабочие)<sup>3</sup>. Таким

образом, обычный для перепончатокрылых уклад жизни колонии совершенно нарушался, что, впрочем, не приводило к ее деградации. В одних колониях самцы улетали прочь через несколько дней после вылупления, а в некоторых оставались на более длительный срок и либо старались занять высшую ступень иерархической системы доминирования, подчинив себе не только всех рабочих, но и матку, либо занимали более низкое положение в системе, подчиняясь некоторым рабочим.

По литературным данным, есть сведения о раннем выходе самцов и у других видов ос-полистов. В нашей стране это явление наблюдала Е. О. Гречка (Херсонский государственный педагогический институт), и ей удалось сфотографировать, как самец *P. gallicus* кормит личинок остатками белковой пищи, ранее полученной им от рабочего.

Видимо, большое разнообразие в проявлении необычных черт социальной организации говорит просто о невысоком уровне развития социальности у ос-полистов. Но можно также предположить, что социальность у полистов развивается несколько по иному пути, чем у других насекомых.

<sup>1</sup> Bartz S. H.— *Behav. Ecol. and Sociobiol.*, 1982, v. 1, № 3, p. 223.

<sup>2</sup> Miyano S.— *Res. Pop. Ecol.*, 1983, v. 25, № 1, p. 198.

<sup>3</sup> Kasuya E.— *Ibid.*, p. 143.

## Биология

**Бразильский опоссум — новое лабораторное животное**

Биологи и медики давно хотели иметь в качестве лабораторного животного сумчатое млекопитающее. В Институте ресурсов лабораторных животных Национальной академии наук США, в лаборатории, возглавляемой Дж. Вандебергом (J. I. Vandenberg), недавно приступили к разведению сумчатых бразильских опоссумов, и к настоящему времени в виварии уже содержится более 1100 особей. Основой размножаемой популяции стали несколько самок и самцов, полученных из Вашингтонского зоопарка. Чтобы увеличить генетическое разнообразие популяции, в лабораторию доставлены несколько экземпляров животных из Бразилии. Начаты работы по выведению инбредных линий бразильских опоссумов. Эта программа рассчитана на 10 лет.

Бразильские опоссумы (*Marmosa domestica*) — мелкие зверьки серого цвета с коротким хвостом, в общих чертах похожие на домовых мышей. Масса тела взрослых особей 80—150 г. Бразильские опоссумы нетребовательны к условиям содержания в неволе, легко приручаются. Неполовозрелые зверьки и пары взрослых разнополых особей хорошо уживаются в отдельных небольших пластиковых клетках. Кормят животных в основном мясной пищей (как и собак, кошек, лис). Они хорошо размножаются в неволе. Беременность длится около двух недель. Новорожденные детеныши имеют длину около 1 см и весят до 100 мг. В момент рождения они находятся в полуэмбриональном состоянии. 7 недель после рождения детеныши зависят от матери, прячась в сумке и питаясь молоком. Половозрелости животные достигают спустя 4—5 месяцев после рождения. За год самка может дать два потомства (до 2—14 детенышей). В неволе бразильские опоссумы живут до 4 лет.



Бразильский опоссум: вверху — взрослое животное, а внизу — новорожденные детеныши (полуэмбрионы), прикрепившиеся к соскам в сумке самки.

Уже в настоящее время этот вид животных используется в ряде медико-биологических исследований, ведущихся в лаборатории Вандеберга. Поскольку значительная часть периода развития новорожденных детенышей протекает вне матки (в сумке самки), это делает опоссума удобным объектом для эмбриологических исследований.

Science News, 1983, v. 123, № 17, p. 263 (США).



## Биология

**Кенгуру сменяет календарь**

У себя на родине — австралийском о-ве Тасмания, кенгуру-валлаби (*Wallabia*) всегда приносят детенышей в февралемарте — южной осенью. Немедленно после этого они снова спариваются. Зародыш впадает в состояние диапаузы (покоя), из которого выходит лишь перед самым появлением на свет, 11 месяцев спустя.

Биологи Д. Флеминг,

Р. Н. Синдери и Дж. П. Хирн (D. Fleming, R. N. Cinderey, J. P. Hearn; Лондонский зоологический институт, Англия) изучали, как происходит этот процесс у тех валлаби, которые живут в английском Випснейдском зоопарке. Оказалось, что кенгуру, перевезенные из Южного полушария в Северное, отлично перестроились: в связи с тем, что времена года здесь наступают «наоборот», период выведения потомства сдвинулся точно на полгода и наступает в августе-сентябре; в остальном все физиологические черты, включая 11-месячный покой зародыша, остались прежними.

Что же служит у кенгуру сигналом для «перевода биологических часов» на время Северного полушария? Исследователи полагают, что главный «ключ» здесь — продолжительность дня. В нашем полушарии осенние короткие дни наступают в конце августа, что соответствует по продолжительности светлого времени суток австралийскому февралю. «Переждав» полгода, кенгуру попадают в биологическую противофазу со своими единоплеменниками, оставшимися на родине, но длительность и очередность всех процессов в их организме остаются прежними.

New Scientist, 1983, v. 100, № 1387, p. 737 (Великобритания).

## Экология.

**Санитарная оценка питьевых вод в Шри-Ланке**

Исследования химического состава питьевых вод проводятся главным образом в промышленно развитых странах; один из немногих примеров изучения этой проблемы в развивающейся стране — работы, предпринятые в Шри-Ланке коллективом специалистов из Пераденийского университета и Центрального управления охраны природной среды, возглавляемым С. Б. Дissanаяке (S. B. Dissanayake).

Лишь менее 10 % населе-

ния Шри-Ланки имеет возможность пользоваться водопроводом. Совершенно безопасную для здоровья воду потребляют 15—25 % жителей страны; подавляющее большинство берет воду из колодезев, мелких сельских водоемов и рек. Мало-малышки приемлемые системы канализации обслуживают менее 1/3 населения. В результате всего этого 40 % жителей Шри-Ланки страдают брюшным тифом, амёбной и бактериальной дизентерией, инфекционным гепатитом, гастроэнтеритом, колитом или глистной инвазией.

Недавно завершившееся обследование качества колодезной воды в масштабе страны показало, что в ряде местностей содержится в ней количество нитратов, которые могут вызывать кишечные заболевания у детей, существенно превышает установленный Всемирной организацией здравоохранения уровень безопасности (50—100 мг/л). Показательна тесная корреляция между степенью загрязненности вод нитратами и такими факторами, как использование химических удобрений, количество осадков и химический состав пород.

В районах Шри-Ланки, с мягкой водой число лиц, страдающих заболеваниями сердечно-сосудистой системы, оказалось заметно выше, чем в районах, отличающихся большей жесткостью воды. В центральных районах Шри-Ланки, где содержание фтора в воде незначительно, высока заболеваемость кариесом; там, где концентрация фтора в источниках превышает 3 части на миллион, зубные болезни встречаются гораздо реже. Установлена определенная связь между заболеванием кариесом и атмосферными осадками. Интенсивные дожди (в особенности в центральной части острова, отличающейся значительной влажностью) приводят к вымыванию из почвы ионов фтора; появление таких «низофтористых» зон находит отражение в статистике обращения к стоматологам. В отдельных местностях обнаружена существенная загрязненность вод металлами. Так, в крупном водо-

хранилище Полголла количество марганца втрое превышает уровень, установленный Всемирной организацией здравоохранения в качестве безопасного (0,5 долей на миллион). Подобные медико-геологические исследования проводятся в стране впервые.

В настоящее время составляются геохимические карты, подробно показывающие распределение различных веществ в питьевой воде страны. Episodes, 1983, № 3, p. 35—36 (Канада).

#### Геология

### «Черные курильщики» на Кипре

«Черными курильщиками» геологи назвали, как известно, обнаруженные на дне Тихого океана, в рифтовых зонах Восточно-Тихоокеанского поднятия и Галапагосского рифта, конусообразные постройки, из которых в морскую воду поступают гидротермальные растворы черного цвета (откуда и пошло само название). Растворы обогащены ценными элементами, главным образом из группы металлов. Когда горячие растворы (до 350°C) соприкасаются с холодной морской водой (около 2°C), часть металлов, преимущественно в сульфидной или сульфатной формах, отлагаются на стенках жерла и возле устья «курильщиков», постепенно надстраивая эти сооружения; они могут достигать нескольких сот метров в ширину и десятков — в высоту. Образующиеся таким путем массивные сульфидные полиметаллические рудные тела — ценное сырье для металлургической промышленности.

На о-ве Кипр, в его горном массиве Тродоос, разрабатываются сульфидные руды. Э. Уден (E. Oudin; Бюро геологических и минеральных исследований, Орлеан, Франция) и

Г. Константиноу (G. Constantinou; Геологическая служба Кипра, Никозия) показали, что рудные отложения на Кипре — полные аналоги «черных курильщиков» Тихого океана. Сульфидные тела Тродоосского массива имеют позднемеловой возраст (около 75 млн лет). Как и на Восточно-Тихоокеанском поднятии, в них преобладают минералы, содержащие медь, цинк, железо; в обоих случаях встречены также редкие минералы, как иорданит и идаит. Руды совпадают также по многим текстурным признакам: зональности строения, концентричности расположения минералов вокруг устья «курильщика» и т. д. Отличает руды Кипра отсутствие неустойчивых высокотемпературных минералов, которые за прошедшее время перешли в более устойчивые низкотемпературные формы.

Как образования рифтовых зон Мирового океана попали на сушу? Известно, что фрагменты океанической коры можно обнаружить на суше практически во всех складчатых поясах, особенно в молодом Альпийско-Гималайском поясе, частью которого является и о-в Кипр. Фрагменты океанической коры на Кипре — Тродоосский офиолитовый массив — известны и интенсивно изучаются<sup>2</sup>, а руды разрабатываются в промышленном масштабе. Их детальное сравнение с рудными отложениями Восточно-Тихоокеанского поднятия (образование которых исследователи могли в буквальном смысле слова видеть своими глазами) позволяет теперь однозначно решить вопрос о морском происхождении сульфидных руд на Кипре. Получают объяснение также и необычные органические остатки, обнаруженные вблизи рудных тел Тродооса: аналогичные анаэробные формы жизни населяют склоны «черных курильщиков» в Тихом океане<sup>3</sup>.

Nature, 1983, v. 308, p. 347—353 (Великобритания).

<sup>2</sup> Породы дна изучаются на суше.— Природа, 1984, № 2, с. 117.

<sup>3</sup> См.: Несис К. Н. Вестиментиферы.— Природа, 1984, № 4, с. 87.

<sup>1</sup> См. также: «Черные курильщики» на дне Марианского трога.— Природа, 1983, № 6, с. 117.

## Геофизика

**Земля изменяет свою форму**

Известно, что полярный радиус Земли примерно на 20 км меньше экваториального. Несмотря на незначительные масштабы такой сплюснутости, этот факт оказывает существенное влияние на скорость вращения планеты и, тем самым, на продолжительность суток. Группа американских исследователей из Университета штата Техас (Даллас) и Лаборатории реактивного движения (Пасадена, штат Калифорния), возглавляемая Ч. Дж. Йодером (С. J. Yoder), установила, что со временем степень сплюснутости Земли уменьшается. Этот вывод основан на анализе движения искусственного спутника Земли «Lageos», запущенного в 1976 г. на орбиту, которая проходит на высоте 6 тыс. км, т. е. за пределами даже наиболее разреженных слоев атмосферы. Чтобы максимально уменьшить зависимость движения спутника от постороннего влияния, ему были заданы относительно небольшие размеры при весьма значительной массе (около 360 кг); ни научной аппаратуры, ни источников питания на его борту нет. Таким образом, он представляет собой лишь пассивную мишень для высокоточных лазерных измерений расстояния от Земли до спутника. Эти измерения проводятся в соответствии с Геодинамической программой НАСА, ориентированной, в частности, на выявление таким способом движения литосферных плит.

Существует гипотеза, согласно которой около 20 тыс. лет назад, с началом быстрого отступления полярных ледяных щитов, тело Земли в ее высоких широтах стало постепенно возвращаться к своей прежней, более шарообразной форме. Новые массы, перемещающиеся за счет течений в мантии в приполярные районы, изменяют распределение поля тяготения планеты и искажают орбиту спутника. Наблюдаемые в течение 5,5 лет изменения в характере орбиты спутника, вызванные из-

менением силы земного тяготения, по существу, как считают исследователи, подтверждают эту гипотезу.

Другими причинами, влияющими на распределение масс, тяготение и форму планеты, являются вращения Земли и ячеистые конвективные движения в ее мантии.

Неожиданным оказалось то, что вскоре после запуска спутника радиус его орбиты начал сокращаться примерно на 1 мм в сутки. Время пребывания этого спутника на орбите предварительно оценивалось в сотни миллионов лет, но при таком темпе снижения он может упасть на Землю «всею» за каких-нибудь несколько миллионов лет.

Nature, 1983, v. 303, № 5920, p. 757 (Великобритания).

## Метеорология

**Погода в Азии связана с температурой воды в Тихом океане**

За два последних десятилетия холодные летние сезоны на северо-востоке КНР повторяются с интервалами в 3—4 года. Урожай зерновых снижается здесь в такие сезоны на 15 % по сравнению с обычным. Недавно китайские метеорологи из Института физики атмосферы Китайской АН (Пекин) установили определенную связь между температурой приземного слоя воздуха на северо-востоке Китая и температурой поверхности моря в восточных районах экваториальной области Тихого океана. Эти показатели находятся в строгой противофазе: холодное лето в КНР по времени совпадает с Эль-Ниньо.

После анализа метеорологических материалов за период с 1955 по 1977 г., относящихся к Харбину (45°41' с. ш., 126°37' в. д.) и к полосе Тихого океана между 5 и 10° ю. ш. вдоль 130° з. д., оказалось, что коэффициент корреляции между временем возникновения обоих явлений составляет —0,37.

Установлено, что летнее похолодание осуществляется противофазно с названными областями Тихого океана не только в Харбине, но и в широкой среднелинейной области Северо-Восточной Азии. Необычно холодное лето на северо-востоке КНР отмечалось в 1957, 1964, 1965, 1969, 1972 и 1976 гг. Наиболее активные этапы развития теплого течения Эль-Ниньо приходятся на 1957, 1965, 1972 и 1976 гг. В 1969 г. Эль-Ниньо также наблюдалось, но интенсивность его была невелика. Единственный случай за 30 лет, когда низкая температура воды в восточной части Тихого океана отмечена одновременно с холодным летом на северо-востоке Китая, относится к 1964 г. Последнее «возвращение» Эль-Ниньо в 1982—1983 гг. было особенно интенсивным. В то же время в большинстве городов северо-востока Китая установилось необычайно холодное лето: в июне—июле 1983 г. среднемесячные температуры были на 2—4° ниже средних многолетних, а в Муданьцзяне (44°34' с. ш., 129°36' в. д.) они достигли самого низкого уровня с 1881 г.

В весенний сезон обычно происходит «приспособление» атмосферной циркуляции в тропиках к изменению температур морской поверхности, что влияет на погоду в средних широтах. В мае антициклон в верхней атмосфере перемещается из западной части Тихого океана на Индокитайский п-ов, а в июне — далее на север, на Тибетское нагорье. Последние работы китайских метеорологов указывают на связь, существующую между годовыми вариациями Тибетской области высокого давления, с одной стороны, и общим состоянием погоды на территории КНР и температурой поверхности моря на востоке тропической части Тихого океана — с другой. Факт связи столь удаленных метеоролого-океанологических процессов можно считать окончательно установленным, однако причины этого явления и детали его механизма требуют дальнейшего исследования.

## География

**Обнаружена пропавшая арктическая станция**

Арктический ледяной массив с оборудованной на нем метеорологической станцией, использовавшейся до середины 70-х годов, выносится ныне генеральным ледовым дрейфом из Северного Ледовитого океана<sup>1</sup>. Этот массив известен как «Ледяной остров Т-3», или «остров Флетчера», названный так по фамилии климатолога Дж. О. Флетчера, сотрудника Национального управления по исследованию океанов и атмосферы США, который 19 марта 1952 г. высадился на нем с двумя другими исследователями для организации научной станции. В то время остров имел длину 20,3 км, ширину 9,3 км, толщина достигала 52 м, а периметр равнялся примерно 56 км. Этот огромный массив пресного льда откололся в конце лета 1935 г. от шельфового ледника о-ва Элсмira (Канадский арктический архипелаг). Он обладает большей прочностью, чем окружающие его паковые льды, среди которых он дрейфует уже многие годы<sup>2</sup>.

На протяжении четверти века ВВС, ВМФ и другие ведомства США ежегодно высаживали на острове Флетчера научные группы, проводившие там метеорологические наблюдения и широкий комплекс других исследований. Пока не стали применяться космические методы, он был особенно важным местом наблюдений, обеспечивавшим информацией о движении воздушных и водных масс Северного Ледовитого океана. За дрейфом острова Флетчера следила по спутниковым снимкам Арктическая лаборатория ВМФ США, но осенью 1982 г. его «потеряли». И вот недавно остров Флетчера обнаружен летчиком Исследовательского центра по изучению уровней загрязнения в Майами Д. Терне-

ром, совершавшим полет к Северному полюсу для сбора данных о загрязнении Северного Ледовитого океана. По отчетливому изображению на экране радара он нашел его в 225 км от Северного полюса, около Международной линии перемены даты. Несколько раз облетев остров на 100-метровой высоте, летчик обнаружил, что он заключен в паковый лед и его поверхность резко контрастирует с окружающими льдами. Были хорошо видны каркасы построек, множество бочек от горючего, предметы снаряжения и поврежденный самолет С-47, некогда высадивший Флетчера.

На протяжении ряда лет Флетчер внимательно следил за блужданием «своего острова». Исходя из характера его нынешнего движения, он полагает, что в течение нескольких месяцев этот ледяной массив будет вынесен в Гренландское море, а затем в Северную Атлантику. Там он растает и сбросит в океан находящийся на нем груз. Таким образом закончится почти полувековой дрейф ледяного острова Т-3 в Северном Ледовитом океане.

**В. Н. Виноградов**  
Ленинград

## Вулканология

**Иридий в выбросах вулкана Килауза**

Практически повсеместно на земном шаре, как на суше, так и на море, к стратиграфической границе мезозоя и кайнозоя (около 65 млн лет назад) приурочен тонкий (всего несколько сантиметров) слой отложений, резко обогащенный одним из элементов платиновой группы — иридием. Высказывались предположения о его космическом происхождении: возможно, он занесен в атмосферу Земли при ее встрече с крупным метеоритом<sup>1</sup>, а затем

выпал повсеместно в осадок, образовав четкий стратиграфический горизонт. Действительно, метеориты по сравнению с земными породами обогащены этим элементом. Однако ряд специалистов пытаются объяснить происхождение иридиевого горизонта внутриземными причинами.

У. Золлер, Дж. Паррингтон и Дж. Фелан-Котра (W. Zoller, J. Parrington, J. Phelan—Kotra; Гавайский университет, штат Гавайи, США) обнаружили, что в продуктах выбросов в атмосферу вулкана Килауза, расположенного на склоне второго крупнейшего на о-ве Гавайи вулкана Мауна-Лоа, наблюдается необычайно высокая концентрация иридия. Образцы воздуха с содержащимися в них вулканическими газами и пепловыми частицами отбирались с помощью оборудования вулканической обсерватории Мауна-Лоа и затем изучались методом нейтронно-активационного анализа.

Исследователи отмечают один чрезвычайно необычный факт: иридий вместе с вулканическим пеплом и газами поступал в атмосферу, но не накапливался в излившихся породах — базальтовых лавах. Отношение содержания иридия к алюминию в продуктах выбросов в 17 тыс. раз больше, чем то же отношение в базальтах! Единственным элементом платиновой группы, обнаруженным вместе с иридием, было золото.

Высокие концентрации иридия в продуктах извержения вулканов описаны впервые. Сделанное открытие не означает, конечно, что иридиевый горизонт на рубеже мезозоя и кайнозоя возник именно при вулканических извержениях, однако ставит под сомнение его метеоритную природу. В иридиевом горизонте, по примерным подсчетам, содержится около 180 тыс. т этого элемента, тогда как при извержении Килауза на земную поверхность и в атмосферу поступило всего 9 кг. Тем не менее не исключено, что гигантские излияния базальтов в конце мезозоя (сформировавшиеся, в частности, базальтовые плато плоскогорья Декан в Индии) могли привести к резкому накоплению этого элемента в

<sup>1</sup> Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1983, v. 64, № 8, p. 976.

<sup>2</sup> Родаль К. Север. М., 1958, с. 15.

<sup>1</sup> См., напр.: Чуйнов В. А. Следы космической катастрофы — Природа, 1982, № 3, с. 31.

атмосфере, а затем и к его повсеместному отложению на планете.

EOS (Transactions of the American Geophysical Union, 1984, v. 65, № 6, p. 41; Science, 1983, v. 222, № 4628, p. 1118

(США).

#### Охрана природы

### Загрязнение воздуха в ФРГ

В 1983 г. в ФРГ принят закон, которым для всех работающих на каменном угле теплоэлектростанций мощностью от 300 МВт и выше устанавливается верхний предел допустимого выброса двуокиси серы в воздушное пространство, равный  $400 \text{ мг/м}^3$ . Этот же закон вводит ограничения для выброса в атмосферу других загрязняющих агентов — окисей азота, галогенизированных углеводородов и тяжелых металлов. Однако сторонники охраны природной среды считают новый закон малоэффективным. Они настаивают, чтобы предельно допустимый выброс двуокиси серы был установлен на уровне не выше  $100 \text{ мг/м}^3$ . Новый закон, указывают они, не распространяется на уже действующие ТЭС и даже на те, строительство которых только начато по проектам, утвержденным до вступления его в силу. В частности, новая теплоэлектростанция в Бушхаузе (на границе с ГДР) будет «на законном основании» поставлять в воздушное пространство ежегодно около 18,6 т двуокиси серы (примерно 150 тыс. т в год). Учитывая высоту ее дымовой трубы (270 м) и господствующее направление ветров, следует предполагать серьезное загрязнение среды в обширном районе ГДР.

Вызывают также решительные возражения те положения нового закона, которыми из-под его действия изымаются все ТЭС, где стоимость сероочищающих установок ока-

жется настолько высокой, что производство электроэнергии может стать нерентабельным.

Недавно проведенное официальными органами обследования показало, что почти половина всех лесов на территории ФРГ в настоящее время страдает от последствий загрязнения воздушного пространства. *Ambio*, 1983, v. XII, № 6, p. 367 (Швеция).

#### Охрана природы

### Как помочь азиатскому слону

В то время как численность африканского слона, превышающая 1,1 млн голов, может, очевидно, не вызывать беспокойства, количество голов азиатского слона, живущего в естественной среде, упало до весьма опасного уровня. По оценкам экспертов, общая численность этого вида составляет всего 30—40 тыс. Из них около 15 тыс. живет в Индии, 200 — в Бангладеш, 5 тыс. — в Бирме, 100 — в Китае, 300 — в Индонезии (все на о-ве Суматра), около 4 тыс. — в Малайзии (примерно четверть в континентальной части страны, остальные на о-ве Калимантан), 35 — в Непале, по 3 тыс. — в Шри-Ланке и Таиланде и примерно 4 тыс. — в странах Индокитая (Лаос, Кампучия, Вьетнам), вместе взятых.

Международный союз охраны природы создал в 1982 г. в Джалдапаре (штат Западная Бенгалия, Индия) конференцию специалистов по слонам. Участвовавшие в ней представители большинства стран Азии, где встречается это животное, с тревогой говорили о сокращении ареала слона в связи с ростом площадей пахотных земель, выпасов и особенно лесоразработок. На конференции были выработаны и рекомендованы эффективные меры, которые позволят избежать острой конфронтации интересов человека и слона.

Очень серьезной была

признана проблема происходящего расчленения областей обитания слона на все более мелкие участки, не связанные между собой, что явно причиняет существенный ущерб популяциям. Чтобы воспрепятствовать этому, специалисты рекомендуют оставлять или даже создавать лесистые коридоры, проходы через сеть каналов, нефтегазопроводов, предоставляя слонам возможность свободного перемещения. Во исполнение этой рекомендации индийские штаты Западная Бенгалия и Ассам, а также союзная территория Индии Аруначал-Прадеш договорились с соседним государством Бутан о создании подобного коридора, который должен способствовать сохранению одной из самых многочисленных популяций азиатского слона.

На конференции обсуждался вопрос об определении размеров заповедных территорий с учетом численности населяющих их слонов; если эти территории недостаточны, слоны вынуждены совершать набеги на окружающие поля и плантации. Опыт, накопленный в Малайзии, где за 10 лет слоны причинили ущерб в 250 млн долл. посадкам масличной пальмы, уничтожив 1 млн молодых деревьев, показывает эффективность использования в ряде случаев изгородей, находящихся под током, — в дополнение к существующим рвам и завалам деревьев. Были продемонстрированы различные методики отпугивания и перергона слонов с помощью магнитофонных записей звуков, издаваемых тигром, размещения трюпок, пропитанных тигровой мочой, использования в качестве загонщиков прирученных слонов, распознающих до 40 слов и т. п.

Особое внимание специалисты обращали на генетическую угрозу данному виду. В результате браконьерского отстрела самцов с крупными бивнями средней размер бивней в популяциях слонов уменьшился.

*Ambio*, 1983, v. XIII, № 2, p. 132 (Швеция).



## Фламинго на Мангышлаке

До последнего времени считалось, что гнездовой фламинго в обжитых местах п-ова Мангышлак (Казахская ССР) не встречается<sup>1</sup>. Однако материалы, собранные П. М. Ланкиным (Мангышлакская охотничья инспекция), дают примеры способности фламинго успешно прираиваться к условиям антропогенного ландшафта.

При наблюдениях с самолета гнездовья фламинго обнаружены в районе высохшего залива Мертвый Култук. По всей вероятности, есть гнездовая колония и у южного берега залива Комсомолец (200 км от г. Шевченко), где нелетные птенцы выходили прямо к буровой установке. В 1968 г. часть сора Караколь, протянувшегося на десятки километров вдоль побережья Каспия, стала затопляться сбросными водами предприятий г. Шевченко. В результате здесь образовался обширный водоем площадью 4,5 тыс. га. Со временем его западный и частично восточный берега начали зарастать тростником, что создало благоприятные условия для гнездования, зимовки и отдыха на пролете огромного количества птиц различных видов. Фламинго впервые на Караколе были замечены осенью 1970 г. В дальнейшем они стали регулярно останавливаться там на пролете весной и осенью. В 1982 г. они даже кормились на временно затопленной низине на окраине жилых массивов г. Шевченко, при этом птицы не реагировали на автомашины, проезжавшие в 50—100 м от них.

Дальнейшее освоение территорий, прилежащих к району гнездовой в заливе Комсомолец и на Мертвом Култуке, в сочетании с колебаниями

уровня Каспия может привести к исчезновению этих гнездовых колоний. Фламинго внесены в международную и отечественную Красные книги. Чтобы не допустить их исчезновения на северо-восточном побережье Каспия, очевидно, необходимы специальные меры по их охране. Бюллетень Московского общества испытателей природы, отдел биологии, 1983, т. 88, вып. 5, с. 35—38.

## Археология

### Древнейшее цинкоплавильное производство

Старинные цинковые копи в районе Завара (штат Раджастан, северо-западная Индия) давно известны специалистам. До сих пор считалось, что возникли они в средневековье, когда добыча металла была здесь особенно развита. Однако совместные исследования археолога К. Т. М. Хегде (К. Т. М. Hegde; Университет в Вадодаре, штат Гуджарат, Индия), геолога Л. Гурджара (L. Gurjar; Индийская цинковая корпорация) и П. Креддока (P. Craddock; Исследовательская лаборатория при Британском музее, Лондон) позволили установить, что добыча и выработка цинка начались здесь по меньшей мере 2 тыс. лет назад. Об этом свидетельствует радиоуглеродная датировка древесных остатков, найденных на месте плавления металла.

Еще в XVII в. весь цинк, потреблявшийся в Европе, привозили с Востока. Только в конце XVIII в. его производство в Европе достигло промышленных масштабов. Обычно заслугу в разработке процесса дистилляции при массовом производстве этого металла приписывают жителю Бристоля (Англия) У. Чемпиону, запатентовавшему метод в 1738 г. Однако теперь можно утверждать, что идея, очевидно, пришла из Индии, с которой местные купцы поддерживали активные связи. Метод плавки цинка, применявшийся Чемпионом, оказался удивительно сходным с методом древних индийских ме-

таллургов. Изучение средневековых индийских трактатов по алхимии и открытие в Заваре обломков древнейших глиняных плавильных печей, реторт, устройств по конденсации паров цинка подтверждают такое мнение. Похоже, что даже казавшиеся экзотическими рецепты индийской алхимической книги «Расаратнасамукхайя», относящейся в XIV в. и предусматривавшей использование листьев куркумы, белой горчицы, сушеной вишни и сливы, перетопленного масла из молока буйволицы, не столь уж бессмысленны: присутствие органики помогает расплаву, оформиться в шарики и скопиться в реторте таким образом, чтобы их легко было оттуда извлечь.

Большая часть произведенного в Заваре цинка (особенно в середине века) сплавлялась с медью, чтобы получить латунь. Однако в этом районе не обнаружено залежей меди. Зато в известном древнем торговом центре Таксила (северный Пакистан), лежащем в 1 тыс. км от Завара, обнаружено при раскопках большое число латунных изделий; причем некоторые из них датируются IV и даже II в. н. э. Месторождений цинка вблизи Таксилы также нет, следовательно, производство латуни требовало дальних экономических связей. World Archeology, 1983, v. 15, p. 211; New Scientist, 1983, v. 100, № 1367, p. 738 (Великобритания).

<sup>1</sup> Подробнее о фламинго, в частности о местах обитания на территории СССР, см.: Андрусенко Н. Н. Фламинго.— Природа, 1980, № 12, с. 72.

## Практическая польза науки о снеге

Член-корреспондент АН СССР  
В. М. Котляков



А. К. Дюнина. В ЦАРСТВЕ СНЕГА. Отв. ред. П. И. Мельников. Новосибирск: Наука, сер. «Человек и окружающая среда», 1983, 162 с.

Трудно представить себе земной шар без снега, а нашу страну — просто невероятно. Весенний разлив рек, перезимовка растений и животных, хороший урожай на полях, передвижение транспорта в северных заболоченных районах — все это было бы невозможно, если бы огромные просторы нашей страны на зиму не покрывались снегом. Весь уклад жизни в Сибири и на Дальнем Востоке, в северной и центральной полосе Европейской России приспособлен к долгим месяцам зимы и толстому снежному покрову. И неудивительно, что именно Россия в XIX в. стала родиной снеговедения — особой отрасли гляциологии, изучающей про-

цессы возникновения, существования и схода снежного покрова.

К настоящему времени снеговедение превратилось в высокоразвитую отрасль науки, имеющую свой теоретический базис и многие практические области применения, особенно важные для Сибири. Поэтому понятно, что именно Сибирское отделение издательства «Наука» выпустило книгу «В царстве снега» — интересное повествование о проблемах снежного покрова и путях их решения.

Автор книги, доктор технических наук, профессор Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта А. К. Дюнин, — один из ведущих советских снеговедов, ученик Г. Д. Рихтера и последователь А. И. Воейкова. Инженер-путеец, он всю жизнь посвятил изучению проблемы снеготранспорта на транспорте и стал признанным, мировым авторитетом в области изучения метелей. Его монография «Механика метелей», изданная еще в 60-е годы, до сих пор служит непрезойденным образцом в мировом снеговедении.

В рецензируемой книге А. К. Дюнин рассказывает о свойствах снежного покрова, о причинах, вызывающих жестокие бураны и грозные горные лавины, о средствах борьбы с этими опасными явлениями, о многочисленных формах использования снега — от дорожных тоннелей в снежно-фирновой толще Гренландии до защиты нежных плодовых культур от вымерзания в Сибири. Рассказывает интересно, с привлечением разносторонних сведений о научных теориях и конкретных экспериментах, выполненных как в лабораториях, так и в природе — непосредственно «на снежной целине».

Книга написана очень живо, о чем можно судить даже по названиям отдельных глав и более мелких разделов книги: «Чудо метаморфизма», «Начало буранов», «Метелевое электри-

чество», «Есть ли метели на Марсе», «Удар лавины», «"Дактилоскопия" лавины», «Снег-летописец» и др. Здесь читатель узнает о законах формирования снежного покрова и ветровом переносе снега, о сильнейших метелях, которые в Западной Сибири называют метелями-пощельницами, так как они проникают во все щели и порой забивают снегом целые дома.

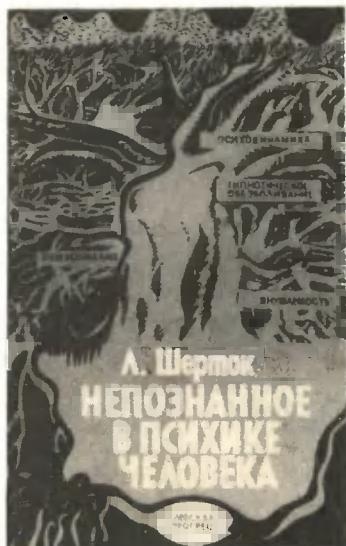
Книга А. К. Дюнина полезна для самообразования: ее страницы наполнены разнородной информацией. Особое значение имеет обширная библиография. В каждой из глав дается несколько ссылок на книги, а в заключение приводится рекомендательный список, включающий почти 40 книг по снеговедению, изданных на русском языке за период с 1954 по 1980 г. К сожалению, книги научно-популярных серий не всегда сопровождаются подобной библиографией.

«На свете нет такой тоски, которой снег бы не залечивал», — сказал Борис Пастернак. Да, снег для России значит много больше, чем другие природные явления. А в век технического прогресса, когда хозяйство и люди продвигаются все дальше в горы и на север, снежные проблемы становятся неотъемлемой частью инженерных проектов — будь то прокладка газопровода из Западной Сибири, строительство БАМа, проектирование сибирских городов и др.

Поэтому так важны научные проблемы, о которых идет речь в этой книге, поэтому так актуальна сама книга и так близка она к жизни, хотя и называется сказочно «В царстве снега». Я советую прочесть эту книжку каждому, кто интересуется природой Сибири и высокогорий, кто участвует в великой работе по освоению нашего Севера и всем тем, кто уже очень скоро сможет поехать в поезде из Москвы в Комсомольск-на-Амуре по Байкало-Амурской магистрали.

## Гипноз и психоанализ

**В. А. Файншевский,**  
доктор медицинских наук  
Москва



**Л. Шерток. НЕПОЗНАННОЕ В ПСИХИКЕ ЧЕЛОВЕКА.** Пер. с франц. Вступ. ст. и общ. ред. Ф. В. Бассина. М.: Прогресс, 1982, 310 с.

Книга эта столь нетрадиционна по характеру поднимаемых в ней проблем, по их многослойности и даже по композиции и жанру, что невозможно однозначно определить ее содержание. Тематическим ядром книги служат собственные исследования и размышления автора — одного из крупнейших современных гипнологов, касающиеся механизмов гипноза, и это интересно и ценно само по себе, так как серьезных книг на эту тему немного. Вместе с тем Л. Шерток-естествоиспытатель одновременно является в другой своей ипостаси (которую он считает главной) — одним из виднейших на Западе теоретиков и практиков психоанализа. При этом интерес Л. Шертока к гипнозу, как мы узнаем от самого автора, ставит его в кругу психоаналитиков в положение еретика. Эта ситуация усложняется для Л. Шертока

ка еще и тем, что в силу своей интеллектуальной честности он считает одной из важнейших для себя задач «примирить гипноз с психоанализом», т. е. объяснить механизмы гипноза в понятиях теории психоанализа.

Читатель книги улавливает внутренний конфликт ученого, столкнувшегося с фактами, которые не укладываются в теорию, составляющую его научное мировоззрение. Возможно, этим объясняется необычный для научного трактата исповедально-эмоциональный тон авторского «Предисловия к советскому читателю» и «Пролога» к книге (за которым следует еще и «Введение»). Предваряя книгу, автор как бы формулирует — и здесь ощущается некоторая торжественность интонации — свое нравственное кредо:

«Я всячески старался избежать заполнения словами, не несущими адекватной информации, пробелов нашего знания» (с. 27).

«Я решил на подобные опыты (с гипнозом. — В. Ф.) не без некоторых колебаний... Отказаться от «чистого золота психоанализа» было для моего психоаналитического «сверх-Я» дальнейшим углублением в ересь... Я заранее предвидел негодующие комментарии коллег. И все же мое научное любопытство одержало верх» (с. 32).

«Как все психоаналитики, — пишет далее автор, — я терпел себя иллюзией, что нам доступны обширные знания о функционировании психики и о психологии отношений... Между тем я не мог не признать, что многое из того, что происходит у меня на глазах, остается загадочным. Я вдруг вернулся к реальности. И заметил, что король голый» (с. 32).

В свете изложенных в «Прологе» установок все последующее воспринимается как напряженная дискуссия автора не только с внешними оппонентами, но и с самим собой.

Но почему так значим для Л. Шертока вопрос о примирении гипноза с психоанализом? А потому, что в этом конфликте нашла выражение гораздо более важная для него проблема, чем сами по себе и гипноз, и психоанализ (она

на самом деле и составляет главную идею книги), а именно проблема сущности и роли межличностных отношений.

Л. Шерток задается вопросом: почему и как отношение человека к человеку, в частности психотерапевта к пациенту, может лечиться? Что в этих отношениях является целебным: выявление вытесненных в бессознательном травмирующих переживаний, как утверждает теория психоанализа, или внушение — прямое и явное в гипнозе и, как преддолагает Л. Шерток, неявное, замаскированное, в психоанализе? А может быть, целебны сами по себе сочувствия врача, понимание им пациента, желание помочь больному? Если же это так, то каким образом эти факторы эмоционально-нравственного характера могут влиять даже на нарушенные физиологические процессы, нормализуя их?

По существу в книге предпринята попытка перевести некоторые традиционно психологические категории в естественнонаучную плоскость. Постановка этой проблемы чрезвычайно важна. Л. Шерток развивает концепцию о существовании у человека «встроенной» в него автоматической (иными словами — врожденной) функции установления так называемых первичных отношений с объектами внешней среды, в первую очередь с людьми. Эта функция приводит в действие «квант аффекта» (т. е. создает эмоциональный толчок) и «вызывает ряд процессов, биологических по своей природе, о которых нам ничего не известно, кроме того, что они играют фундаментальную роль в равновесии организма» (с. 168).

Хотя автор лишь постулирует это положение, не аргументируя его, нам эта мысль представляется глубокой и имеющей достаточно серьезные основания. Действительно, в каждом человеке сосуществуют две противоположно направленные потребности, а именно потребность в ощущении своего «Я» как чего-то, отличающегося от всего, что «не-Я» (в этом направлении идет развитие самоощущения человека и в эволюции человеческого общества,

и в личной истории каждого индивида), и, наряду с этим, потребность в ощущении «Мы» (первичная по происхождению).

На современном уровне культурного развития человечества наименее удовлетворенной, а потому наиболее напряженной, оказывается потребность, большей частью неосознаваемая, в межличностных эмоциональных контактах, что может способствовать повышению предрасположенности к невротическим состояниям.

В таком контексте автор и рассматривает проблемы и психоанализа (который, впрочем, он совершенно неправомерно отождествляет с психотерапией в целом), и гипноза как методов лечения неврозов. Иными словами, он считает, что лечение происходит путем восстановления и активации межличностных эмоциональных связей. Здесь, однако, необходимо сделать некоторое отступление.

В своем предисловии к книге Ф. В. Бассин ставит вопрос о том, каковы те факторы, которые «стабилизируют» психоанализ, делая его «устойчивым» как к массивной критике извне, так и к жестоким противоречиям, раздирающим его изнутри на протяжении всей истории его существования. Основным таким «стабилизирующим» фактором Ф. В. Бассин справедливо считает фрейдовскую концепцию о существовании бесознательных явлений в психике человека, ставшую одним из фундаментальных положений современной психологии.

Но в психоанализе содержится еще и ряд других важных понятий, которые, как пишет Л. Шертон, все еще представляют собой «лишь рабочие метафоры, не имеющие научного основания». Одной из таких «метафор», к которой часто прибегает автор, является трансфер, с помощью которого

психоаналитики описывают передачу аффективного влияния от одного индивида к другому. И этот «аффективный обмен», эта эмоциональная связь между врачом и больным, по выражению Л. Шертона, и составляет «важную тайну психотерапии». Несмотря на такую неопределенность в трактовке трансфера, все же в этом понятии, на наш взгляд, ощущается глубоко запрятанное рациональное звено.

Трансфер интересует автора, прежде всего, в связи с его вышеупомянутой концепцией «первичных отношений». Этим, по-видимому, во многом обусловлен и его интерес к гипнозу, о котором Л. Кьюби высказался, что «это трансфер в чистом виде». Для Л. Шертона гипноз — это самой природой созданная модель, в которой можно в максимально очищенном от приходящих обстоятельств виде демонстрировать и наблюдать влияние именно отношений между двумя людьми не только на психологические, но и на физиологические процессы.

При гипнозе, как понимает его Л. Шертон, «на фоне предварительного разрыва связей с окружающей средой (сенсорная депривация, обусловленная сосредоточением внимания на гипнолизере) ... в какой-то момент по причинам, плохо нам известным, происходит как бы «щелчок», вслед за которым возникает особое отношение с другим человеком и одновременно с этим происходит изменение психофизиологической реактивности» (с. 168).

Автор справедливо отмечает, что «гипноз ничего не создает. Он лишь активирует уже существующие потенциальные возможности» (с. 111). Какие же? Какие свойства человеческой психики обуславливают возможность возникновения тех необычных состояний, которые в конце XVIII в. впервые были вызваны у людей Ф. Месмером в искусственных, по существу лабораторных, условиях? Как эти свойства проявляются в обычной жизни?

Чтобы ответить по возможности короче, укажем лишь на неопределенность критериев тех состояний, которые следует

считать гипнотическими. Ведь многие феномены, которые считаются специфическими для гипноза, нередко наблюдаются и в повседневной жизни: провалы в памяти, избирательное восприятие каких-то фрагментов окружающей обстановки при игнорировании, незамечении всех других (например, когда в шуме мы слушаем интересного собеседника), некритическая доверчивость к чьим-то словам, пассивное подчинение кому-то. Даже такой поразительный феномен гипнотического состояния, как «отрицательные галлюцинации» (избирательное невидение какого-то предмета), имеет аналог в обычной жизни, когда, например, человек разглядывает на своем столе «только что лежавшую здесь» бумагу (книги, очки и т. п.) и вдруг замечает, что этот предмет все время находился у него перед глазами.

Большинство гипнологов определяет гипноз как измененное состояние сознания, сопровождающееся усилением внушаемости. Однако анализ разного рода фактов приводит к мысли, что, возможно, элементы гипнотического состояния вкраплены в нашу повседневность. Именно на этом свойстве человеческой психики — внушаемости — основано воспитание детей. И хотя интеллектуальное и духовное развитие каждого индивида протекает в направлении выработки механизмов противодействия внушению, все же жизнь любого взрослого человека нестрит феноменами внушения; избавиться вовсе от этого естественного и фундаментального свойства психики практически невозможно.

Влияние внушения в обычной жизни на психофизиологическое состояние организма можно проиллюстрировать многими примерами. Возьмем хотя бы печально известные случаи так называемых ятрогенных (вызванных неосторожным словом врача) заболеваний, феномены отвращения к некоторым видам пищи (например, к свинине или к земноводным животным) у различных народов, обусловленного суггесторным (внушающим) влиянием национальных

<sup>1</sup> В ортодоксальном психоанализе трансфер — это неосознаваемый перенос образа авторитарного «Отца» на психотерапевта с возникновением соответственного отношения к врачу.

обычаев, или, наконец, половые запреты.

Л. Шерток совершенно прав, отмечая, что гипнотические состояния бывают разными как по глубине, так и по проявлениям. Но едва ли справедливо его мнение, что так называемые сомнамбулические состояния лишь количественно отличаются от таких поверхностных гипнотических фаз, как отрешенность, сонливость. Каждый психотерапевт, работавший с гипнозом, наблюдал случаи почти мгновенного «впадения» в сомнамбулическое состояние, которое характеризуется не только специфическими изменениями сознания, но и появлением характерных неврологических симптомов<sup>2</sup>.

Л. Шерток ошибается, утверждая, что якобы нет объективных физиологических коррелятов гипноза. Н. А. Аладжолова, В. Е. Рожнов и С. Л. Каменецкий обнаружили выраженные изменения сверхмедленной электрической активности мозга при «впадениях» в глубокий гипноз и на всем его протяжении<sup>3</sup>. Однако наиболее противоречивыми представляются те разделы книги, где Л. Шерток

пытается объяснить гипноз, внушение, лечебные эффекты психотерапии в понятиях теории психоанализа.

В этих местах автор книги отходит от им же провозглашенного правила «избегать заполнения словами, не несущими адекватной информации, пробелов в знании». Мы ощущаем при этом, как живая и честная мысль, желающая быть «свободной и гибкой», бьется о скорлупу метафор застывшей догмы, бывшей некогда живой и в потенции плодотворной гипотезой.

Если же не пытаться объяснить неизвестное непонятным, а до поры ограничиться логическим анализом наблюдаемых фактов, то можно сказать, что специфичность гипнотического состояния, как и внушаемости в широком смысле слова, заключается в добровольном предоставлении субъектом другому лицу санкции (разрешения) на управление своими психологическими процессами, которое в обычных состояниях производится самим субъектом (одной из интрапсихических инстанций, входящих в состав «Я»).

Например, когда мы намерены совершить какое-то движение, скажем встать со стула, то момент начала вставания отличается от предыдущего, по сути дела, только тем, что в этот миг мы даем разрешение (санкцию) нашему психическому состоянию — намерению — привести в действие мышечный аппарат нашего тела. В гипнозе такое разрешение на управление и своими действиями, и психическими процессами — мыслями, чувствами — передается субъектом гипнотизеру. Эта передача совершается, разумеется, не телелатентно, а путем воображаемого помещения гипнотизируемого как бы в свою психическую сферу образа гипнотизирующего (интериоризация этого образа) в качестве управляющей инстанции собственного «Я». Именно такой психологический механизм, а не перенос на психотерапевта мифического образа «Отца», лежит, скорее всего, в основе той связи между врачом и пациентом в гипнозе, которую психоаналитики называют трансфером.

Как отмечалось выше, одна из задач Л. Шертока заключалась в том, чтобы примирить гипноз с психоанализом. Но почему же они находятся в конфликте?

Согласно психоаналитической концепции, излечение от невроза происходит вследствие «извлечения» из сферы бессознательного вытесненных туда психотравмирующих переживаний. Лечение совершается путем чисто интеллектуальной процедуры. Ради сохранения стройности своей концепции З. Фрейд, а за ним и его ортодоксальные последователи стали принципиально стремиться к тому, чтобы элементы гипноза и внушения были исключены из психоанализа. Как известно, Фрейд специально разработал такую процедуру психоанализа («психоаналитическая кушетка»), чтобы терапевт мог уклониться от взгляда пациента и, как пишет Л. Шерток, «получить возможность выключиться из отношения». Может быть, именно вследствие этих стараний психоаналитиков избежать эмоциональных контактов с пациентами сроки лечения психоанализом, как сообщает Л. Шерток, все более удлиняются и «теперь никого во Франции не удивишь десятилетним курсом» (с. 162).

Тем не менее, как проницательно отмечает Л. Шерток, полностью исключить эмоциональные отношения между врачом и пациентом, а также фактор внушения в психоанализе практически невозможно — такие отношения складываются невольно, а сама процедура психоанализа предрасполагает к возникновению гипнотического состояния, в котором одно лишь желание пациента выздороветь выполняет роль самовнушения. Не этим ли обусловлены вообще те лечебные эффекты, которые достигаются при психоаналитическом лечении?

На самом же деле неврозы излечиваются отнюдь не в результате угадывания и извлечения из бессознательного вытесненных туда психотравмирующих переживаний (зачастую мифических и примысливаемых психоаналитиками). Вытеснение, напротив, является крайней формой психологической защиты, когда не срабатывают другие.

<sup>2</sup> Возможно, погружение в глубокую фазу гипноза, так называемое сомнамбулическое состояние, обуславливается особо выраженной способностью индивида управлять своими психическими процессами вплоть до произвольного изменения сознания. Такое объяснение согласуется не только с редкой встречаемостью подобных глубоких гипнотических состояний, и с тем фактом, что чаще они возникают (многие читатели узнают об этом с удивлением) у волевых, уверенных в себе, психологически активных личностей, видимо, способных руководить не только другими людьми, но и собой (Л. Шерток по-иному интерпретирует данное наблюдение).

<sup>3</sup> Аладжолова Н. А., Каменецкий С. Л., Рожнов В. Е. Сверхмедленные колебания потенциалов голодного мозга как объективный показатель гипнотического состояния. — В сб.: Бессознательное. Тбилиси, 1978, т. II, с. 162.

Согласно взглядам Ф. В. Бассина, В. Е. Рожнова и М. А. Рожновой, неврозы, по преимуществу, — следствие нарушения «порядка» в субъективной системе значимых ценностей и утраты установленных адекватных отношений с миром<sup>1</sup>. Отсюда, по мысли этих исследователей, лечение невротических состояний должно заключаться в глубокой перестройке иерархии субъективных ценностей путем снижения значимости утраченных и замены их другими. Такие защитные механизмы действуют в жизни каждого человека, обычно они включаются автоматически. Если же этого не происходит, то возникают неврозы, и в таких случаях задача психо-

терапевта — помочь этому процессу психологической защиты, эмпатически почувствовав, какая новая система значимых ценностей окажется наиболее приемлемой для данного конкретного индивида и каким путем легче воссоздать ее. При этом через посредство врача восстанавливаются утраченные больным, но необходимые для его выздоровления эмоциональные связи с миром людей. Какую же роль при этом играет гипноз? Во-первых, поскольку при нем усиливается внушаемость, то вследствие этого облегчается коррекция врачом неадекватных и ставших инертными переживаний больного. Во-вторых, в гипнозе удается снять отдельные тягостные невротические симптомы — как психические, так и те, которые проявляются в нарушениях функции органов тела. В-третьих, в гипнозе может быть активированы вышеупомянутые естественные защитные механизмы личности.

В заключение следует сказать, что при всех спорных положениях, содержащихся в книге, она интересна и полезна, причем не только своей позитивно-познавательной стороной, но и тем, что включает читателя в мысленную дискуссию по важным проблемам человеческой психологии с проницательным, живым и смелым собеседником.

Эта книга интересна еще и тем, что, написанная одним из виднейших психоаналитиков, она убедительнее многих других, специально посвященных критике психоанализа, высветляет — отчасти, возможно, помимо желания автора — то кризисное положение психоанализа (по крайней мере, его ортодоксальной ветви), в которой он оказался, самоизолировавшись от других направлений психиатрии и от сравнения с практической эффективностью других методов психотерапии.

<sup>1</sup> Бассин Ф. В., Рожнов В. Е., Рожнова М. А. К современному пониманию психической травмы и общих принципов ее психотерапии. Руководство по психотерапии. М., 1974, с. 39.

## НОВЫЕ КНИГИ

### Философия естествознания

Б. Г. Кузнецов. ИДЕАЛЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ. Отв. ред. М. В. Волькенштейн. М.: Наука, 1983, 223 с., ц. 1 р. 20 к.

Книга содержит своеобразный анализ естествознания в целом, она посвящена тем его идеям, принципам и методам, которые помогают составлению единой картины мира.

В основе изучения природы, по мнению автора, лежат идеалы науки. Научный идеал трактуется как «вполне определенная система научных констатаций и обобщений, направляющая мысль исследователя и исходящая из того, что ему известно о мире. Вместе с тем в понятие идеала входит во-

прошающая компонента, ведь само слово «идеал» обозначает нечто, определяющее направление, но недостижимое в конечный срок, всегда сохраняющее перспективу дальнейшего бесконечного развития».

Идеал науки воздействует на ее развитие через интуицию, психологию научного поиска. Анализ научной интуиции, заставляющей менять логические нормы исследования, — основная тема книги, которая легко прослеживается на фоне последовательной смены естественнонаучных представлений.

Отношение науки как постоянно преобразующегося института к ее истории как фактору, лежащему в основе этого института, становится одной из центральных тем и проблем со-

временной теории познания. В связи с этим автор разграничивает два понятия, необходимых, по его мнению, при исследовании феномена науки: историографию и историологию. Историография — это описание событий и анализ их причин; историология — анализ генезиса науки, ее предмета и метода, общих принципов, она охватывает весь исторический процесс развития науки — в целом.

Важным принципом современной науки является экспериментальный диалог ученого и природы, цель которого — преобразование и человека, и природы. Такой диалог ведет к изменению всего стиля мышления, способствует гуманизации и гуманитаризации науки как таковой.

## История науки

Т. Д. Ильина. ФОРМИРОВАНИЕ СОВЕТСКОЙ ШКОЛЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ. 1917—1941 гг. Отв. ред. М. А. Садовский. М.: Наука, 1983, 216 с., ц. 2 р. 80 к.

История науки — это прежде всего история ее идей и методов. Рецензируемая книга важна именно в этом смысле — эрудиция автора помогла ему систематизировать большой объем данных и подробно проследить развитие многих идей о магнетизме Земли, о ее поле тяжести и о сейсмических явлениях. Автор рассказывает о прогрессе этих идей в 1917—1941 гг., а во многих случаях и в позднейшие годы.

Из первой главы книги читатель узнает, как параллельно со старыми и заслуженными учреждениями Петрограда — Академией наук, Главной физической обсерваторией — в исследования Земли включились москвичи: университетская геофизическая школа Э. Е. Лейста, П. П. Лазарев с сотрудниками, астрономы П. К. Штернберг, А. А. Михайлов и др. Первый импульс к этому дали исследования Курской магнитной аномалии.

Прогрессу магнитной разведки — оказавшейся таким образом впереди — а затем и гравиметрической разведке посвящены вторая и третья главы книги. В истории магнитных методов особенно интересным стало приложение их к таким «немгнитным» объектам, как соляные куполы (И. М. Бахурин, 1927), и затем развитие аэромагнитной съемки (А. А. Логачев, 1936).

Гравиметрия — старая отрасль геофизики; например, еще в XIX в. была открыта своеобразная московская гравитационная аномалия, описанная П. К. Штернбергом и Ф. И. Слудским. Но на путь практического применения гравиметрия стала позднее, когда около 1925 г. Г. А. Гамбурцев развил вычислительные методы определения погребенных масс, а затем глубин и формы залегания древних пород. Очень плодотворным был вклад Л. В. Сорокина (ученика Э. Е. Лейста) в разви-

тие морской гравиметрии. Он положил много сил и на создание московской школы геофизиков-разведчиков, его идеи развивали М. С. Зверев, В. В. Федюнский и др.

Следует особо отметить четвертую главу — очерк истории электроразведки, сравнительно мало известной широкому кругу читателей. Идеи А. А. Петровского, заложившие ее основы, видимо, зародились давно, под влиянием Б. Б. Голицына, но быстрое их развитие было связано с созданием соответствующего отдела в Институте прикладной геофизики.

Несколько меньше внимания автор уделил сейсмозаземке — предмету, различные аспекты которого были уже ранее достаточно хорошо исследованы<sup>1</sup>. «Фонарь, зажигающийся на короткое время и освещающий внутренность «Земли», как определил сейсмические явления Б. Б. Голицын в 1911 г., вероятно, первый осветил пути истории прикладной геофизики.

Книга Т. Д. Ильиной с большой тщательностью обрисовала важный период развития геофизической науки в целом — как ее приложений, так и многих теорий.

А. Х. Хргиан,  
доктор географических наук  
Москва

<sup>1</sup> См., например, обширные комментарии к т. II «Избранных трудов» Б. Б. Голицына. М., 1960.

Камчатку якутского казачьего головы А. Ф. Шестакова и драгунского капитана Д. И. Павлуцкого, а также о первооткрывателе Аляски со стороны Тихого океана геодезисте М. С. Гвоздеве.

По инициативе Петра I в связи с государственным преобразованием и активной внешней политикой на путь научного развития стала и русская картография. Первую государственную съемку России в 1717—1752 гг. проводили 282 специалиста, из которых 60 квалифицированных геодезистов и их учеников работали в Сибири и на Дальнем Востоке.

В книге показано, что в отличие от «самоохотных» походов XVII — начала XVIII в. главной особенностью северовосточных экспедиций первой половины XVIII в. стало тесное переплетение решаемых ими государственных задач социально-политического, экономического и научного характера. Экспедиционная активность этого периода была предопределена потребностями всероссийского рынка, борьбой России за выходы к морям и отличалась единой стратегической задачей, обусловившей преемственность исследований.

Реальная возможность детального исследования походов Шестакова — Павлуцкого появилась благодаря находке в архиве личного фонда штурмана Я. Генса и ранее неизвестных материалов Сената. Некоторые из найденных автором документов приведены в приложениях к книге.

## История науки

Л. А. Гольденберг. МЕЖДУ ДВУМА ЭКСПЕДИЦИЯМИ БЕРИНГА. Магадан: Магаданское книжное изд-во, 1984, 238 с., ц. 95 к.

Слова русского поэта XVIII в. И. Дмитриева: «Не забывай, потомок, что росс, твой предок, и на Востоке громок» — могли бы быть эпиграфом к этой книге, в которой рассказывается об экспедициях на Чукотку и

## Вариации на тему «Уральских напевов»\*

**Р. Х. Зарипов,**  
кандидат физико-математических наук  
Москва

### АВТОРЫ-МИСТИФИКАТОРЫ, ИЛИ КАК ДУРАЧАТ ДОВЕРЧИВОГО ЧИТАТЕЛЯ

«Однажды в машину заложили программы (f — Р. З.) всех фуг И. С. Баха. Она написала новую фугу, именно новую, а не компиляцию. Получившееся произведение настолько было похоже на музыку великого композитора, что даже музыковеды посчитали его одной из неизвестных фуг И. С. Баха. И только после повторных прослушиваний убедились, что это все же совершенно новое произведение, хотя и очень похожее на сочинения композитора»<sup>1</sup>.

Прочитав это в книге Г. Максимова, вышедшей в 1976 г., и поразившись, что столь сенсационный результат представлен скромнейшим до несправедливости образом, я сразу же отправил в редакцию на имя автора письмо, в котором просил сообщить, где, когда и кем эта работа была сделана, какие музыковеды исследовали машинные «фуги Баха». В конце письма следовал риторический вопрос: «Или же приведенное в Вашей книге сообщение об этих работах есть изложение «несколько деформированного представления о работах Купера (H. Kupper), описанных в моей книге «Кибернетика и музыка» (М.: Наука, 1971) на стр. 48—51? Купер получил свои машинные композиции (одноголосные, а не полифонические) методом марковского синтеза и назвал их «Computer-Play-Bach». Но все это

не имеет никакого отношения к фугам И. С. Баха. Буду Вам очень признателен за ответ».

Ответ я, видно, уже не дождался, хотя вышло и 2-е издание «Бесед с академиком В. Глушковым», где процитированное место приведено без изменений.

А книга делает свое дело. Эффектное сообщение о «машинных фугах Баха» стали переписывать у Максимова и другие авторы, разумеется, без указания «первоисточника». Вот как, например, представлено дело в книге специалиста по автоматике Л. А. Залманзона:

«О том, что достигнуто в машинном сочинении музыки, можно судить по тому, что, например, машиной, которой в качестве исходных были переданы все фуги Баха, была сочинена новая фуга. Не знакомые со способом ее получения музыканты, которым она была показана, приняли ее за вновь открытую неизвестную до сих пор фугу великого композитора»<sup>2</sup>.

Мифический сюжет о «машинных нотах Баха» проник и на страницы «Литературной газеты»<sup>3</sup>. Сверх того там же описаны и другие забавные музыкальные проказы машин: «Электронные системы уже умеют улавливать и передавать тончайшие нюансы». Удивляюсь, но читаю дальше: «Точно так же машина может выражать индивидуальность исполнительского искусства». Надо же. А я-то все пишу, что такого рода работы «до сих пор находятся на уровне лишь механического воспроизведения нотной записи, к которому, разумеется, не сводится музыкальное исполнение»<sup>4</sup>.

Среди литературных вариаций на эту тему мое внимание привлекла еще одна, о Чайковском:

«Как-то в институт, где я работаю, пришел один товарищ и прочитал лекцию «Кибернетика и искусство», потом вынул виолончель и сыграл вещь, которую сотворила кибернетическая машина. Оказывается, кибернетики исследовали музыку Чайковского, обнаружили какие-то закономерности, с учетом их задали программу машине, и она выдала музыку «под Чайковского». Мелодии мне показались симпатичными, и я спросил музыканта-профессионала из нашего отдела: «Как?» Он ответил: «Банально...» Спустя несколько лет на одной из конференций я слышал выступление другого товарища, который пытается внедрить методы кибернетики в музыку. Он рассказал, что закономерности-то они находили, но музыка оставалась банальной. Тогда они ввели элемент случайности, и это сделало сочинения более оригинальными, в них появился какой-то элемент творчества. Понимаете?»<sup>5</sup>

Понимаете, как все просто? Только чудится мне, что мы так и не узнаем имени ни того, кто научил машину сочинять «банальные» мелодии «под Чайковского», ни «другого товарища», который сообразил додуматься до чудодейственного «способа» преодолеть эту банальность.

После этого я не удивился, узнав из газеты «Московский комсомолец», что мой «Урал» (видимо, тайком от меня) в огромных количествах сочиняет симфонии: «В помещении редакции журнала «Техника — молодежи» мне довелось однажды быть слушателем необычного

<sup>2</sup> Залманзон Л. А. Беседы об автоматике и кибернетике. М., 1981, с. 394.

<sup>3</sup> Искусственный интеллект. — Литературная газета, 1 января 1976, с. 11.

<sup>4</sup> Зарипов Р. Х. Моделирование и музыка. — В кн.: Кибернетика. Современное состояние. М., 1980, с. 169.

<sup>5</sup> Борисовский Г. Крота, польза, образ. — Литературная газета, 27 февраля 1974, с. 12.

\* Окончание. Начало и продолжение см.: Природа, 1984, № 7, 8.

<sup>1</sup> Максимов Г. Беседы с академиком В. Глушковым. М., 1976, с. 179.

концерта, — сообщил корреспондент. — В редакцию был приглашен музыкант и математик Р. Х. Зарипов, известный тем, что по примеру Антонио Сальери «поверил алгеброй гармонию». Зарипов исполнил на виолончели несколько музыкальных пьес, «сочиненных» по его программе электронно-счетной машиной «Урал». Впечатление от концерта было потрясающим. Машина, сочиняющая сотни вальсов и десятки симфоний в час, ни разу не опустилась до уровня откровенной халтуры. По-видимому, это понятие пока еще не известно электронному композитору...»<sup>6</sup>

Но если бы мистификаторов награждали, то, несомненно, пальма первенства досталась бы А. С. Митрофанову.

«Вы так пишете, что сами даете повод для критики ваших работ, — сказал мне один математик, — смотрите, как вы неаккуратно формулируете свои мысли». И показал книгу Митрофанова, где я с удивлением прочитал:

«Познание законов природы и процессов творчества становится объективным только тогда, когда его можно промоделировать на ЭВМ», — пишет Р. Х. Зарипов (Кибернетика и музыка. М., 1971, с. 6)<sup>7</sup>.

Все тут как в научной книге (о дух лже мудрия лукавый!); кавычки, ссылка на источник, указание страницы. Ведь грамотный читатель знает, что редакторы книг обязаны, особенно в полемических местах, тщательно сверять точность цитат. Читатель уверен, что Зарипов именно так и написал, тем более, что Митрофанов еще и разъясняет на той же странице «процитированные» слова: «При этом утверждается, что только, будучи воспроизведенными в ЭВМ, эти процессы и их законы могут быть объективно познанными».

А что же на самом деле написано в цитируемой книге

Р. Х. Зарипова на с. 6? Читаем: «Одним из методов объективного познания законов природы, и в частности изучения процессов творчества, подтверждения гипотез, является моделирование тех или иных сторон, элементов или результатов этих процессов на электронных вычислительных машинах с программным управлением».

Комментарии, как говорится, излишни.

Но это только одна из «жемчужин» книги Митрофанова, «Бурный поток» его розыгрышей так и просится на 16 страницу «Литературной газеты».

## ЗАИМСТВОВАНИЕ — НЕ ПЛАГИАТ

У меня зазвонил телефон — то было раннее утро весны 1983 г. — и я услышал тревожный голос В. Д. Пекелиса. Он получил ругательное письмо от пенсионерки Дубровской, прочитавшей его недавно вышедшую «Кибернетическую смесь». Там на странице 261 напечатаны ноты мелодии, сочиненные, как говорится в книге, машиной по программе Р. Х. Зарипова. Автор письма с возмущением пишет, что кибернетики морочат головы читателям и выдают за машинную музыку известные мелодии — в первой строке этих нот записана не машинная музыка, а мелодия И. Дунаевского «Молодежная», а во второй строке то же, но только в упрощенном виде.

Я поспешил успокоить Виктора Давыдовича — в книге все правильно, никакого обмана нет, машина действительно сочинила мелодию Дунаевского, воспроизведя его «метод». Эта мелодия получена машиной путем преобразования мелодии народной песни «По Дону гуляет казак молодой» — так же, как это сделал композитор. Только композитор не может описать процесс преобразования, а машина шаг за шагом его показывает.

Этот эксперимент не только показал характер связей мелодии «Молодежной» с исходной темой и способ преобразования этой темы, но и подтвердил наши предположения относительно механизма, который лежит в основе создания

мелодии такой структуры, как мелодии массовых песен.

Составляя программу для варьирования мелодий и пытаюсь промоделировать «Молодежную» И. Дунаевского, я долго не мог понять, как устроена ее предпоследний такт. Синтезировать его только посредством уже предусмотренных операторов, без добавления новых, не удавалось. Идея пришла неожиданно — во время отдыха в горах, на спуске с пика Гермогенова. Оказалось, надо «перевернуть» формулу и вычислять ноты не с начала, а с конца такта.

На с. 126 в первых трех строках записаны машинные вариации мелодии «По Дону гуляет казак молодой». Новые элементы, которые вносятся при трансформации темы, меняют ее до неузнаваемости. Очень показательна в этом отношении реакция слушателей на машинную вариацию в четвертой строке. Даже музыканты-профессионалы на музыкаловедческой конференции не узнали исходную мелодию «Чижики», хотя я предупредил, что она всем заведомо известна: за несколько минут до этого «Чижики» был специально — под благовидным предлогом — проигран.

В моей статье «Построение частотных словарей музыкальных интонаций для анализа и моделирования мелодий»<sup>8</sup> описывается формальный способ выявления в разных мелодиях сходных отрывков — не по памяти и слуху, как обычно, а с помощью алгоритма. Ну как тут не вспомнить замечательного журналиста Г. Б. Анфилова, который еще в 1961 г. в шутку писал: «Автоматический композитор обещает массу любопытного. Как заманчиво, к примеру, «скрестить» пусть даже упрощенные творческие стили двух разных композиторов и посмотреть, что из этого получится! Или испытывать творческую индивидуальность сочинителя. Вложил в машину его произведения и через секунду получил исчерпывающий ответ: «Данный опус на 50 процентов является подражанием Дунаевскому, на

<sup>6</sup> Марин В. Искусственный человек. — Московский комсомолец, 5 февраля 1967, с. 5.

<sup>7</sup> Митрофанов А. С. Кибернетика и художественное творчество. М., 1980, с. 133.

<sup>8</sup> Проблемы кибернетики. Вып. 41. М., 1984, с. 224.

Машинные вариации на темы русских народных песен: 1—3 — «По Дону гуляет казак молодой»; 4 — «Чижик»; 5—7 — «Наша жизнь коротка».

Фрагменты музыкальных произведений, в которых звучат интонации «Мурки»: 1 — «Мурка»; 2 — Б. Мокроусов. «Это вам, романтики!»; 3 — П. Чайковский. Шестая симфония. Финал.

40 процентов повторяет Соловьева-Седого, на 10 процентов самобытен. Это еще неплохая оценка. А что если самобытности машина вообще не найдет?<sup>9</sup>

Вышеупомянутый алгоритм обнаруживает не только факт заимствования (а в некоторых случаях и плагиат), но и указывает те мелодии, из которых были взяты интонации.

Заметим, что в музыке между плагиатом и заимствованием как «творческим методом» (об этом я уже писал в книге

«Машинный поиск вариантов...» — М.: Наука, 1983, с. 102) нет четкой границы: различение этих понятий — задача не техническая, а скорее социологическая, которая вряд ли может иметь однозначное решение. Примеров, подтверждающих это, — великое множество.

Как-то у меня собрались друзья, с которыми незадолго до этого мы познакомились в Дилижане на музыкально-фольклорной конференции 1975 г. Зашел разговор о заимствовании в музыке. Я вспомнил, что интонации «Мурки» звучат во многих советских песнях, в частности в одной популярной песне Б. Мокроусова. Это послужило пово-

дом для ее несправедливого осуждения критиком Ю. С. Коревым: «В кульминации же песни (на словах «Это вам, романтики, это вам, влюбленные»), словно в насмешку, появляется известный мотив «Мурки»<sup>10</sup>. Но ведь, пошутил я, никто не осуждал Чайковского за то, что в финале его Шестой симфонии звучит тот же мотив «Мурки», и не очень тихо — фортиссимо. Тут известная азербайджанская пианистка и композитор Ф. Али-заде, обычно спокойная,

<sup>9</sup> Анфилов Г. Б. Физика и музыка. М., 1962, с. 180.

<sup>10</sup> Коров Ю. Против псевдолирики. — Сов. музыка, 1958, № 8, с. 24.

возмутилась: «Нет в этой симфонии «Мурки!» — «А я могу это доказать», — отвечаю я. «Не надо мне доказывать — это моя любимая симфония, я ее знаю наизусть». Пришлось мне достать ноты — переложение симфонии для фортепиано. Франгиз стала играть, и тут раздался дружный хохот присутствующих — все ясно услышали «известный мотив», шокировавший критика Корева.

Потом я не раз рассказывал этот эпизод музыкантам, и они, будто сговорившись, утверждали: «нет там «Мурки», я точно знаю». А через некоторое время: «Да, есть, но это проходящий эпизод, не главная тема» и т. д. и т. п.

В музыкальном произведении «известные мотивы» маскируются новыми элементами — и в этом глубокий смысл «творческой обработки» заимствованных мелодий или их фрагментов. Например, тема «Рококо», гениальных виолончельных вариаций П. И. Чайковского, возникла из мелодии «Вдоль по Питерской» (в этом можно убедиться при визуальном сравнении обеих мелодий), но совсем непохожа на свой прототип. Да и сам композитор, вероятно, не знал об этом заимствовании.

Заимствование в музыке имеет большую историю. Балагур и весельчак И. С. Бах (о чем известно из кинофильма «Антон Иванович сердится») для своих погребальных хоралов использовал мелодии любовных и даже популярных уличных песен, зачастую фривольного содержания (вроде нашей «Мурки»). Но и до Баха — еще в XVI в. — мы находим прецеденты обращения к народной, уличной или массовой песне при создании серьезнейших тем духовной музыки.

Н. А. Римский-Корсаков ввел в оперу «Золотой петушок» «Чижику», П. И. Чайковский в Четвертую симфонию — мелодию «Во поле береза стояла», а Д. Д. Шостакович в оперетту «Москва, Черемушки» — мелодию своей же популярной «Песни о встрече», которая в 1945 г. в Сан-Франциско на международной конференции, посвященной созданию Организации Объединенных Наций, прозвучала как гимн ООН.

Но это были заимствования намеренные, осознанные. А бывают заимствования и неосознанные, о которых композитор может и не подозревать, как в рассматриваемом случае с темой «рококо» П. И. Чайковского. У композиторов-песенников особенно часто встречаются заимствования (а иногда и просто цитирование) оборотов довольно большой протяженности и из «народных» мелодий, и из песен современных композиторов.

Во время моих выступлений иногда возникает разговор о том, что будто бы мелодия «Песни о далекой родине» М. Таривердиева из телефильма «Семнадцать мгновений весны» взята им из «Истории любви» Ф. Лея. Отвергая обвинение в заимствовании, я обычно привожу следующий эпизод, не вошедший в телефильм:

Мюллер:

— Мой дорогой Штирлиц, что-то вы, дружище, часто напеваете мелодию русского композитора Таривердиева.

— Чтоб я сдох, — хмыкнул Штирлиц, внутренне сжимаясь, — какой идиотизм! (Он знал, что это мелодия Франсиса Лея, но он еще не знал, знает ли об этом Мюллер.)

## ГИМН ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

«Гимн во славу могущества вычислительной техники прозвучал вчера в Репине. Это музыкальное «произведение», написанное ЭВМ по специальной программе, было исполнено перед участниками открывшегося здесь Международного совещания по проблемам искусственного интеллекта. Встреча ста пятидесяти ученых и специалистов из десяти государств Европы и Америки организована Академией наук СССР и так называемой Фирбушской группой, объединяющей представителей семнадцати исследовательских центров и лабораторий западных стран, сотрудничающих в области кибернетики. Это первая столь представительная встреча на межнациональном уровне».

Так начиналась заметка «Тема встречи — искусственный интеллект» в газете «Ленинградская правда» от 20 ап-

реля 1977 г. Этот гимн прозвучал и по Всесоюзному радио во время выступления председателя оргкомитета Совещания Г. С. Поспелова. Спустя три года — 25 февраля 1980 г. — Гимн искусственному интеллекту был исполнен артистами театра Ла Скала на семинаре в Милане, посвященном обсуждению книги «Musica con il calcolatore».

А начиналось дело так. В марте 1977 г. я получил из Ленинграда письмо, в котором, в частности, говорилось: «Оргкомитет обращается к Вам с персональной просьбой синтезировать мелодию для Международного совещания по искусственному интеллекту. Хотелось бы иметь гимн Совещания».

С уважением Кулаков Ф. М.»

Через полмесяца я ответил:

«Глубокоуважаемый Феликс Михайлович!

Я выполнил просьбу Оргкомитета, изложенную в Вашем письме. Машинная музыка (мелодии и аккомпанемент, синтезированные ЭВМ «Урал-2») и стихи, соответствующие МСИИ (к сожалению, составленные не ЭВМ, а старым домашним способом), готовы. Получилось нечто вроде Гимна Совещания, названное скромно — «ИИКАНТАТА». Стихи составлены и переведены на англ. язык А. Аверкиным».

Поистине юмор — дело серьезное, как любит повторять Эльдар Рязанов. В последних двух строках заключительного куплета

Мы же кубок дружеский  
Осушим до дна  
некоторые осторожные товарищи усмотрели «пропаганду алкоголизма с помощью ЭВМ на международной конференции». Пришлось А. Аверкину взамен «крамольные» строк срочно сочинить другие:

Мы же в завершение  
Весело споем.

В таком виде каждый участник Совещания получил текст Гимна искусственному интеллекту. Ноты, правда, достались только участникам с фамилиями от А до К. Воспользуемся этим поводом и в заключение наших заметок воспроизведем Гимн в полном комплекте.

# ГИМН ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

Музыка ЭВМ "Урал-2"

Слова А. Аверкина

Вас встречает Репино —  
Тут простор мечтам.  
Интеллект искусственный  
Мудр не по летам.  
Диалог с программами,  
ЭВМ с экранами,  
Шимпанзе с бананами  
Мы покажем вам.

Припев:

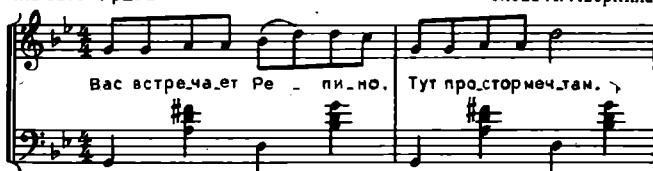
Искусственный интеллект  
Стал теперь проблемой века.  
С искусственным интеллектом  
Мы прославим Человека.

Нам читают лекции  
Главные спецы —  
Всех систем искусственных  
Деды и отцы.  
Фреймы и сценарии  
Внукам мы оставили,  
Пусть в них разбираются  
Наши молодцы.

Припев.

Мы ведем дискуссии, а  
За окном весна —  
И модель без этого  
Будет не полна.  
Пусть там ходят роботы  
И качают хоботом.  
Мы же кубок дружеский  
Осушим до дна.

Припев.



Припев:



В номере использованы фотографии АКУРАТОВА В. Н., АЛЕКСЕЕВА Н. Н., АРХИПОВА А. В., ГИППЕНРЕЙТЕРА В. Е., ЗОРИНА А. В., КАШО В. Н., ЛЮБИНСКОГО Е. Г., ПАСЕНЮКА С. Л., ФОКИНА С. Ю.

Художник П. Г. АБЕЛИН  
Художественные редакторы  
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛЯР

Корректоры:  
Э. А. ГЕОРГАДЗЕ, Т. Д. МИРЛИС

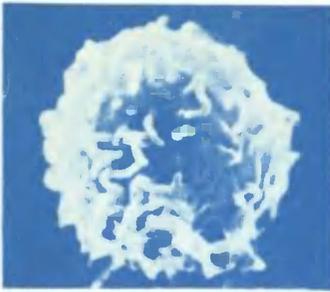
Адрес редакции:  
117049, Москва, ГСП-1,  
Маро́новский пер., 26.  
Тел. 238-24-56, 238-26-33

Сдано в набор 28.06.84  
Подписано к печати 7.08.84  
Т-16918  
Формат 70×100 1/16  
Офсет  
Усл.-печ. л. 10,32  
Усл. кр.-отт. 1429,5 тыс.  
Уч.-изд. л. 15,4  
Бум. л. 4  
Тираж 53 400 экз. Зак. 1816



— символ межправительственной программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера» (The Man and the Biosphere). Этим символом обозначены материалы, которые журнал «Природа» публикует в рамках участия в деятельности этой программы.

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.  
г. Чехов Московской области



## В следующем номере

Организм человека далеко не всегда может справиться с инфекцией, поскольку целый ряд возбудителей не вызывает необходимого иммунного ответа. Победить такие инфекции можно только с помощью искусственных вакцин, принцип получения которых уже разрабатывают.

**Петров Р. В.** От искусственных антигенов к искусственным вакцинам.



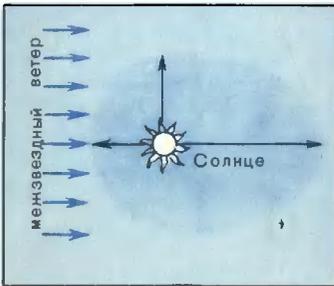
50 лет назад в это едва заметное голубое свечение мало кто верил. Спустя четверть века его открытие и объяснение были отмечены Нобелевской премией. Сегодня — это одна из самых ярких страниц истории советской науки.

### ИЗЛУЧЕНИЕ ВАВИЛОВА — ЧЕРЕНКОВА: 50 ЛЕТ ОТКРЫТИЯ

**Черенков П. А.** От люминесценции к новому свечению.

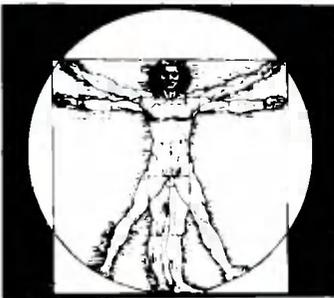
**Болотовский Б. М.** Излучение быстрых частиц в преломляющей среде.

**Франк И. М.** Из истории открытия излучения Вавилова — Черенкова.



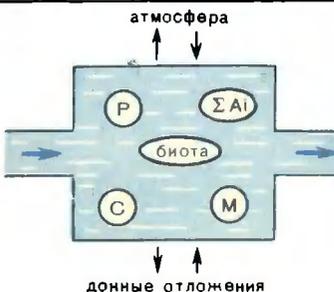
Межзвездная среда — один из интереснейших объектов астрофизики. Движение Солнца в этой среде создает эффект «межзвездного ветра», который изучался в советско-французском космическом эксперименте.

**Курт В. Г.** Атомы межзвездной среды в Солнечной системе.



В современных исследованиях человека наступает качественный сдвиг в сторону реализации системного подхода в изучении этого наиболее сложного феномена. И естественные, и общественные науки должны быть гармонически сопряжены в комплексном человековедении. Являясь равноправным партнером этого исследования, психология помогает налаживать конструктивный диалог между различными областями познания.

**Ломов Б. Ф.** Комплексное исследование человека: место психологии.



Наука о катализе, кроме традиционной сферы своего применения — технологии, распространяется в сферу экологии. Можно надеяться, что в деле сохранения чистоты природных вод ей удастся повлиять на разрешение все обостряющегося конфликта между этими двумя сферами.

**Скурлатов Ю. И., Пурмаль А. П.** Экологическая химия водной среды.

Цена 88 коп.  
Индекс 70767