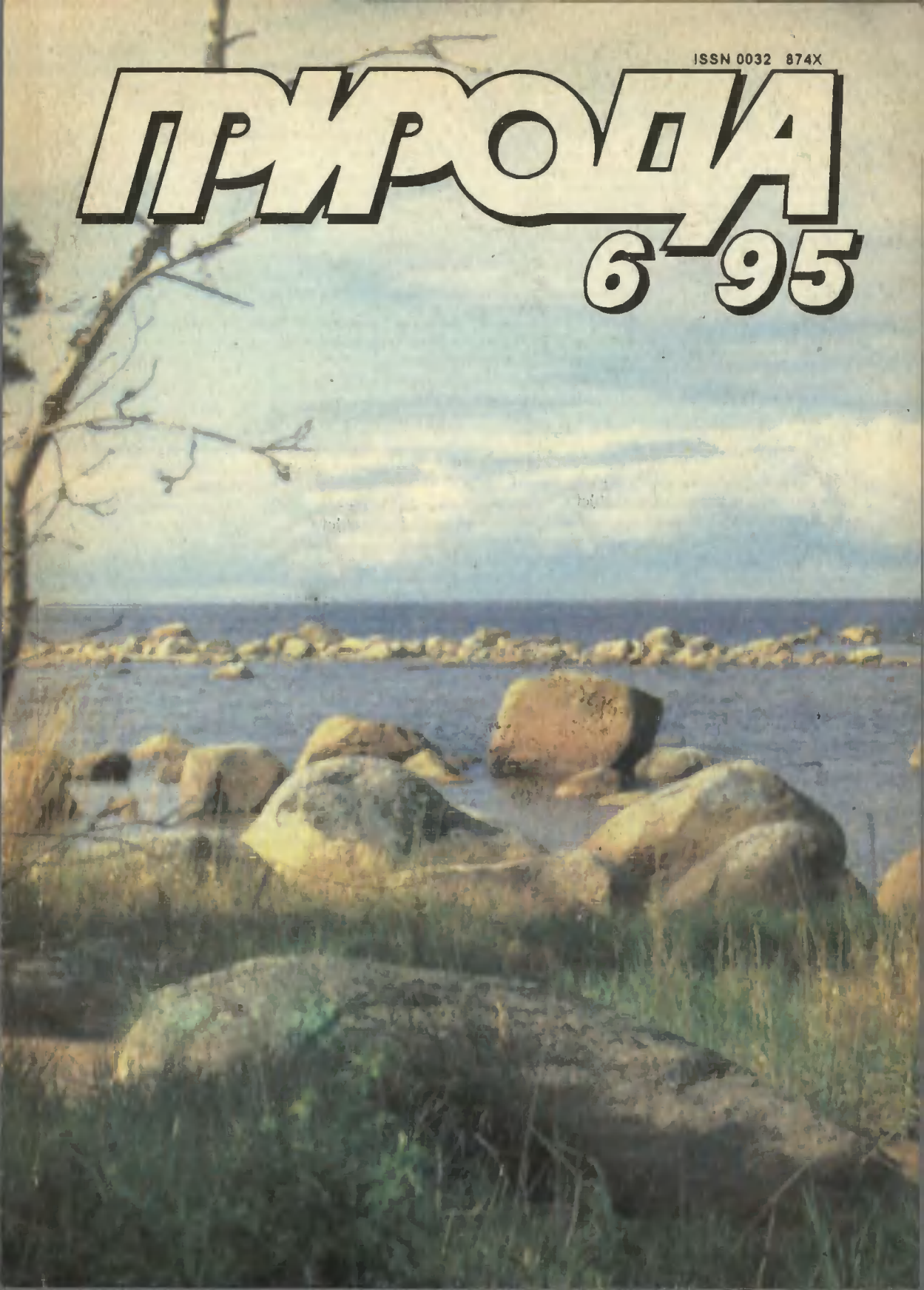


ISSN 0032 874X

# ПРИРОДА

6-95



Главный редактор академик А.Ф.АНДРЕЕВ

Первый заместитель главного редактора А.В.БЯЛКО

Заместители главного редактора:

А.А.ГУРШТЕЙН (история естествознания),

А.А.КОМАР (физика),

А.К.СКВОРЦОВ (биология),

А.А.ЯРОШЕВСКИЙ (науки о Земле)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

И.Н.АРУТЮНЯН (редактор отдела физико-математических наук), О.О.АСТАХОВА (редактор отдела биологии и медицины), кандидат химических наук Л.П.БЕЛЯНОВА (ответственный секретарь), член-корреспондент РАН Н.А.БОГДАНОВ (геология), член-корреспондент РАН В.Б.БРАГИНСКИЙ (физика), член-корреспондент РАН А.Л.БЫЗОВ (физиология), доктор географических наук А.А.ВЕЛИЧКО (палеогеография), академик АМН А.И.ВОРОБЬЕВ (медицина), доктор биологических наук Н.Н.ВОРОНЦОВ (охрана природы), академик М.Е.ВИНОГРАДОВ (биоокеанология), член-корреспондент РАН С.С.ГЕРШТЕЙН (физика), доктор географических наук Н.Ф.ГЛАЗОВСКИЙ (география), академик Г.С.ГОЛИЦЫН (физика атмосферы), академик Г.В.ДОБРОВОЛЬСКИЙ (почвоведение), академик В.А.ЖАРИКОВ (геология), член-корреспондент РАН Г.А.ЗАВАРЗИН (микробиология, экология), М.Ю.ЗУБРЕВА (редактор отдела географии и океанологии), академик В.Т.ИВАНОВ (биоорганическая химия), академик В.А.КАБАНОВ (общая и техническая химия), Г.В.КОРОТКЕВИЧ (редактор отдела научной информации), академик Н.П.ЛАВЕРОВ (геология), Л.Д.МАЙОРОВА (редактор отдела геологии, геофизики и геохимии), доктор биологических наук Б.М.МЕДНИКОВ (биология), Н.Д.МОРОЗОВА (научная информация), доктор геолого-минералогических наук Л.Л.ПЕРЧУК (геология), доктор технических наук Д.А.ПОСПЕЛОВ (информатика), член-корреспондент РАН В.А.СИДОРЕНКО (энергетика), академик В.Е.СОКОЛОВ (зоология), академик В.С.СТЕПИН (философия естествознания), академик В.Н.СТРАХОВ (геофизика), Н.В.УСПЕНСКАЯ (редактор отдела философии, истории естествознания и публицистики), академик Л.Д.ФАДДЕЕВ (математика), доктор биологических наук М.А.ФЕДОНКИН (палеонтология), доктор биологических наук С.Э.ШНОЛЬ (биология, биофизика), О.И.ШУТОВА (редактор отдела экологии и химии), доктор физико-математических наук А.М.ЧЕРЕПАЦУК (астрономия, астрофизика).

НА ПЕРВОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ.  
Места гнездования лебедей на о.Малый.  
См. в номере: Симачев В.И., Боч М.С.,  
Норсков Г.А. Мир островов.

Фото В.И.Симачева

НА ЧЕТВЕРТОЙ СТРАНИЦЕ ОБЛОЖКИ.  
Куртина перистого ковыля - степного растения "окской флоры". См. в номере:  
Белянова Л.П. Биосферный заповедник  
в Подмоскowie.



Издательство «Наука» РАН

© Российская академия наук  
журнал «Природа» 1995

## В НОМЕРЕ

### 3 КРУГОВОРОТ МЕТАНА В ЭКОСИСТЕМАХ

Отмечающееся в последние годы увеличение атмосферного метана связывают в основном с деятельностью человека, а среди природных источников этого парникового газа первое место отводят болотам. В нашей стране твежные болота занимают обширные пространства — около 70 млн. км<sup>2</sup> — и могут оказаться главным поставщиком естественного метана. Так ли это?

**Заварзин Г. А. МИКРОБНЫЙ ЦИКЛ МЕТАНА В ХОЛОДНЫХ УСЛОВИЯХ (3)**

**Паников Н. С. ТАЕЖНЫЕ БОЛОТА — ГЛОБАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК АТМОСФЕРНОГО МЕТАНА? (1)**

**Ножевикова А. Н. МУСОРНЫЕ ЗАЛЕЖИ — «МЕТАНОВЫЕ БОМБЫ» ПЛАНЕТЫ (25)**

**Гальченко В. Ф. БАКТЕРИАЛЬНЫЙ ЦИКЛ МЕТАНА В МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ (35)**

### 50 Белянова Л. П. БИОСФЕРНЫЙ ЗАПОВЕДНИК В ПОДМОСКОВЬЕ

В крошечном, окруженном промышленными городами Приокско-Террасном биосферном заповеднике сохраняются типичные для Центральной России ландшафты и островки окской флоры, ведется интенсивная работа по слежению за состоянием окружающей среды.

### 62 Симачев В. И., Боч М. С., Носков Г. А. МИР ОСТРОВОВ

Уникальная природа протянувшихся вдоль северного побережья Финского залива островов чудом уцелела в первозданном виде благодаря запретам пограничников. Необходимость сохранения этих территорий очевидна, но для всех ли?

### 68 Шилов А. Е., Штейнман А. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА

В природе метан окисляется ферментными системами высокоспециализированных микроорганизмов, но сам механизм окисления пока неизвестен. Сейчас химики пытаются моделировать этот биологический процесс.

### 79 Цидильковский И. М. БЕСЩЕЛЕВЫЕ КРИСТАЛЛЫ С ПРИМЕСЯМИ

Считалось, что существуют два типа кристаллов — металлы и полупроводники. В конце 50-х годов в эту классификацию твердых тел пришлось внести изменение: был обнаружен новый класс вещества — бесщелевые полупроводники. Они оказались объектами не только интересными для научных исследований, но и с широким спектром практического применения.

### 94 Алхимов Р. В., Дмитриев Е. В. ПРОТИВОАСТЕРОИДНАЯ ЗАЩИТА ЗЕМЛИ

Встреча Земли с крупными астероидами и кометами может привести к гибели цивилизации. В последние годы стало ясно, что человечество способно уберечь себя от космических катастроф уже при современном развитии науки и техники.

### 102 Захаров И. А. ОН ШЕЛ САМОСТОЯТЕЛЬНЫМИ ПУТЯМИ (К 150-летию со дня рождения Н. А. Гезехуса)

Исполнилось 150 лет со дня рождения Н. А. Гезехуса — русского физика, деятеля высшего образования. Среди его разнообразных экспериментальных работ были и первые в России попытки получить в лаборатории вещество шаровой молнии.

### 107 Степанов С. И. ПРИРОДА ШАРОВОЙ МОЛНИИ

### 118 Берестов А. Л. В РОССИИ СОЗДАНО ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

### 119 НОВОСТИ НАУКИ (49, 67, 106)

### 121 РЕЦЕНЗИИ Багощой С. В. МОЖНО ЛИ НОРМИРОВАТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ИЛИ «ЗАЧЕМ СОВЕТСКОМУ ЧЕЛОВЕКУ СЛОН?»

ВСТРЕЧИ С ЗАБЫТЫМ

### 124 Бронштэн В. А., Мак-Катчен Р. А. ПОРТРЕТ АНТИГЕРОЯ (Взлет и падение Тер-Оганезова)

**«Природа» благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку.**

**«Природа» благодарит фонд Дж. Сороса «Открытое общество» за существенную поддержку журнала и подписку на него библиотек России, стран СНГ и Балтии.**

## IN THIS ISSUE

### 3 THE METHANE CYCLE IN ECOSYSTEMS

*Recently founded increase of the atmospheric methane content is usually explained by human activity. Its primary natural sources are attributed to wetlands. Extremely vast boreal wetlands are one of the main sources of atmospheric methane. Is it true?*

Zavarzin G. A. MICROBIAL METHANE CYCLE AT LOW TEMPERATURES (3)

Panikov N. S. ARE BOREAL WETLANDS RESPONSIBLE FOR A GLOBAL SOURCE OF ATMOSPHERIC METHANE? (14)

Nozhevnikova A. N. LANDFILLS AS «METHANE BOMBS» OF OUR PLANET (25)

Galchenko V. F. THE BACTERIAL CYCLE OF METHANE IN AQUATIC ECOSYSTEMS (35)

### 50 Belyanova L. P. BIOSPHERE RESERVE NEAR MOSCOW

*In the tiny Prioksko-Terrasni biosphere reserve, surrounded by industrial towns, typical for the Central Russian landscapes and Steppe flora are conserved, research of ecological monitoring is carried out.*

### 62 Smachev V. I., Boch M. S., Noskov G. A. THE ISLAND WORLD

*The unique nature of the islands extended along the north coast of Gulf of Finland was saved due to the strict border prohibitory policy. The necessity to keep this territory as it is now is evident but probably not for everybody.*

### 68 Shilov A. Ye., Steinman A. A. MODELLING OF METHANE BIOLOGICAL OXIDATION

*The natural methane oxidation is provided by systems of highly specialized microorganisms, but its mechanism is still unknown. Now chemists try to model this biological process.*

### 79 Tsdirilkovsky I. M. GAPLESS CRYSTALS WITH IMPURITIES

*In the late 50-s a new class of solids was found in addition to metals and semiconductors, namely semiconductors without gaps. They occurred to be not only an object for pure science but also are widely used in technics.*

### 94 Alimov R. V., Dmitriev Ye. V. THE EARTH SHIELD AGAINST ASTEROIDS

*A collision of a big asteroid against our planet can lead to the collapse of the civilization. Now it became clear that mankind can protect itself against such cosmic accidents even at present level of science and technology development.*

### 102 Zakharov I. A. HE FOUND HIS OWN WAY (To the 150 anniversary of N. A. Hessehus)

*Among diverse experimental works of Hessehus, the well-known Russian physicist and professor, there were the first attempts to obtain a ball lightning in laboratory.*

### 107 Stepanov S. I. NATURE OF BALL LIGHTNING

*Some properties of ball lightning can be explained on an assumption that it is similar to electrochemical battery.*

### 118 Berestov A. L. FOUNDATION OF RUSSIAN OCEANOGRAPHIC SOCIETY

### 119 SCIENCE NEWS (49, 67, 106)

#### BOOK REVIEWS

### 121 Bagotski S. V. COULD POLLUTION BE NORMALIZED, OR «WHAT DO SOVIET PEOPLE NEED AN ELEPHANT FOR?»

#### MEETING THE FORGOTTEN PAST

### 124 Bronsten V. A., McCatchen R. A. A PORTRAIT OF ANTI-HERO (Ascension and downfall of Ter-Oganezov)

# КРУГОВОРОТ МЕТАНА В ЭКОСИСТЕМАХ

Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере считается причиной глобального изменения климата. Именно поэтому антропогенные и природные источники этих газов стали объектом пристального внимания широких кругов ученых и политиков. Согласно Международной конвенции по климату, принятой в 1992 г., страны-участницы обязались учитывать эмиссию парниковых газов на своей территории. В России работы по изучению круговорота углекислоты и метана — двух главных парниковых газов — ведутся в рамках научно-технической программы "Глобальные изменения природной среды и климата". О механизмах, обеспечивающих цикл метана в различных экосистемах, рассказывают участники этих исследований. Как показала аналогичная публикация, посвященная круговороту углекислоты (Природа. 1994. № 7. С. 15—51), такие работы имеют не только фундаментальное научное значение, но и чрезвычайно важны в анализе биосферных изменений, столь необходимых для экологической безопасности России в геополитическом аспекте.

## Микробный цикл метана в холодных условиях

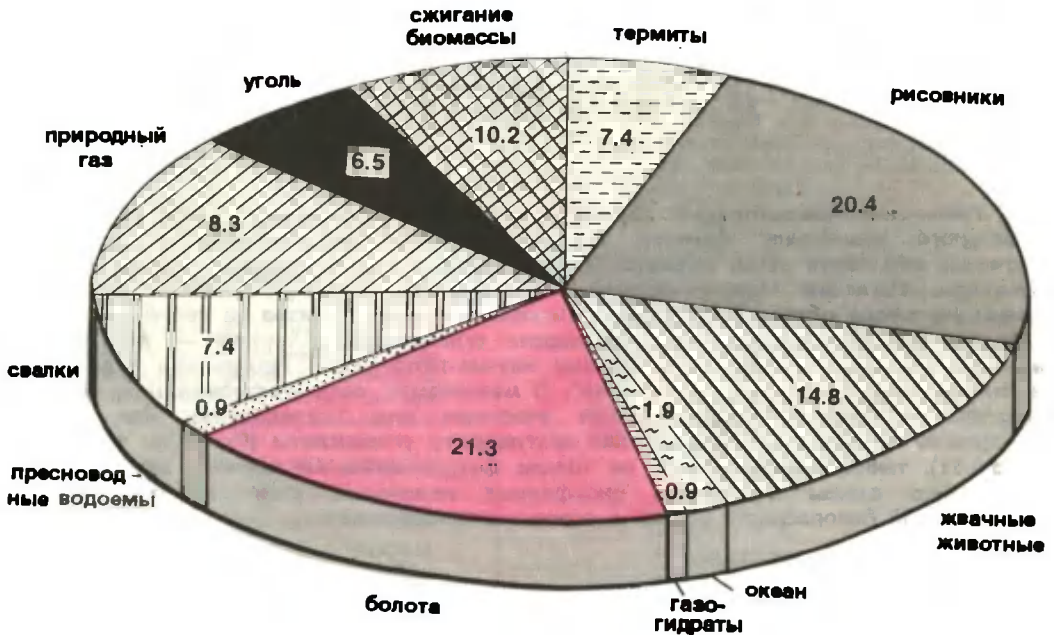
Г. А. Заварзин



*Георгий Александрович Заварзин, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией микробных сообществ Института микробиологии РАН. Основные научные интересы связаны с изучением глобальной экологии, парниковых газов и трансформации их микроорганизмами. Член редколлегии журнала «Природа». Руководитель направления «Воздействие глобальных изменений на биосферу».*

**З**А ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ содержание в атмосфере метана — второго по значению после углекислоты парникового газа — возросло до 1700 частей на миллион. Такой концентрации не отмечалось и 150 тыс. лет назад, когда, судя по ледяным кернам антарктической станции «Восток», потепление совпало с резким увеличением парниковых газов. Возрастающую концентрацию метана в атмосфере связывают с деятельностью человека: расширением посевов риса, животноводством, выделением метана со свалок. Важнейшим для нашей страны источником метана оказалась добыча угля, сопровождающаяся выбросом этого газа в атмосферу. Тем не менее, очевидно, что в эмиссии метана участвуют как антропогенные, так и естественные источники, главным из которых служат болота. Благодаря

© Заварзин Г. А. Микробный цикл метана в холодных условиях.



#### Глобальные источники атмосферного метана (в %).

своему географическому расположению Россия может быть важнейшим естественным источником болотного газа на Земле. Так ли это?

#### «ЦИКЛ ЗЕНГЕНА»

В 1905—1910 гг. голландский ученый Н. Л. Зенген, первый ученик одного из основателей общей микробиологии М. Бейеринка, опубликовал результаты своих исследований по биологическому образованию и окислению метана. Он обнаружил, что и окисление метана в аэробных условиях, и его образование в анаэробных осуществляют высокоспециализированные бактерии<sup>1</sup>. Одни из них — метаноокисляющие микроорганизмы

(аэробные метанотрофы) окисляют только этот субстрат и некоторые одноуглеродные соединения. Другие — метанообразующие (анаэробные метаногены), — как нашел Зенген, потребляют лишь водород и ацетат; позднее выяснили, что они могут использовать также некоторые соединения с метильной группой. Таким образом, Зенген установил, что существует микробный цикл метана, который по справедливости нужно бы назвать «циклом Зенгена». Анаэробные метанообразующие и аэробные метаноокисляющие бактерии не могут развиваться совместно, но они объединены в цикл транспортным процессом, который реализуется за счет переноса метана из анаэробной зоны, где он образуется, в аэробную либо диффузионным потоком, либо пузырьками.

Метаноокисляющим бактериям посвящены фундаментальные работы Р. Виттенбари, который в 1960-х годах описал почти исчерпывающе разнообразие метаноокисляющих бактерий<sup>2</sup>. Мета-

<sup>1</sup> Seöhngen N. L. Over Bakterien, welke Methan als Koolstofdael en Energiebron gebruiken // Versl. Kon. Akad. v. Wetensch. A'dam 1905. V. 14. P. 289; Seöhngen N. L. Sur le role du methane dans la vie organique // Recueil. d. Trav. chim. d. Pays Bas. 1910. V. 29. P. 238.

<sup>2</sup> Whittenbury R., Phillips K. C., Wilkinson J. F. Enrichment, Isolation and Some Properties of Methane-Utilizing Bacteria // J. Gen. Microbiol. 1970. V. 61. P. 205—218.



нотрофы были излюбленным объектом микробиологов до 1990-х, т. е. до тех пор, пока их считали перспективным источником для получения белка из одноклеточных организмов.

Прогресс в изучении метанобразующих наступил позднее, когда ими занялись Р. Вольф, М. Бриан и М. Волин. Этому прорыву способствовало широкое распространение анаэробной методики Хангейта, буквально принявшее характер эпидемии. Тогда в микробиологических лабораториях на смену чашкам Петри пришли пузырьки с резиновыми пробками, а шприцами были заменены пипетки. «Эпидемия» распространилась после работ К. Везе, когда метанобразующие бактерии были выделены в особую ветвь живого мира, в 1990-х получившую название «архей». Поскольку их не относили к строго «бактериям», то, наверное, удобнее называть их нейтральным словом метаногены. Сейчас известно более 70 видов этих организмов, но все они потребляют только три субстрата: водород, ацетат и разные соединения, содержащие метильные группы. Эти субстраты — источники метана — образуются в результате деятельности целого сообщества анаэробных организмов, причем при их тесном взаимодействии.

В 1976 г. М. Бриан описал межвидовой перенос водорода, что значительно приблизило нас к пониманию взаимодействия в анаэробном сообществе. Суть процесса заключается в том, что водородные метаногены, потребляя водород, настолько снижают его концентрацию, что другая группа микроорганизмов — синтрофные бактерии — начинают активно разлагать жирные кислоты до ацетата и водорода, что термодинамически невозможно, если  $H_2$  не удаляется из системы. Этот факт в принципе пошатнул убеждение микробиологов о возможности работы только с чистыми культурами и способствовал очень медленному пониманию важности системных взаимодействий в сообществе.

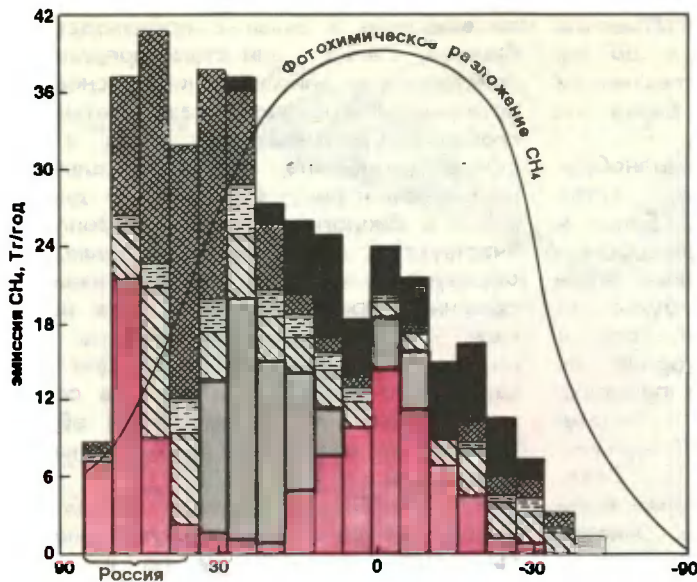
В годы энергетического кризиса метанобразующие сообщества привлек-

ли внимание в связи с производством биогаза. Сегодня они стали предметом пристального внимания как основные источники парникового газа метана в глобальном изменении состава атмосферы и климата. Метан, ускользающий в атмосферу в результате дисбаланса в биологическом цикле Зенгена, участвует в фотохимических реакциях, образующих сложную систему взаимосвязанных процессов. Их иногда называли циклом Леви, но теперь это название не употребляется. Для нас важно, что эти реакции идут на свету, т. е. сильнее в экваториальной области, чем на полюсах, и летом сильнее, чем зимой.

В 1992 г. научная проблема переместилась в политическую область. Была принята конвенция по климату, согласно которой каждой стране необходимо составить свой баланс парниковых газов, в первую очередь углекислоты, метана, закиси азота<sup>3</sup>. Цикл метана в океане замкнут: образуемый в донных отложениях, он окисляется в аэробной водной толще. Более того, геохимики обнаружили биогенное окисление метана в анаэробной зоне, но микробиологи, несмотря на все усилия, до сих пор не смогли найти организм или сообщество, ответственные за этот процесс. Задача повисла в воздухе, пока не найдя решения. В наземных условиях метан может ускользнуть в атмосферу. Одним из основных природных источников метана служат болота.

Располагаются они в Северном полушарии на территории России, Скандинавии, Канады, Аляски в увлажненном поясе умеренного и холодного климата с превышением осадков над испарением. Следовательно, чтобы решить задачу об эмиссии метана, необходимо понять, как действует цикл Зенгена в этих условиях. Для этого надо знать разнообразие метанобразующих и метанооксилирующих организмов,

<sup>3</sup> Заварзин Г. А. Международные экологические конвенции // Природа. 1992. № 12. С. 3—7.



Современное широтное распределение источников атмосферного метана. Около 57% приходится на тропические и субтропические широты (30° с. ш. — 30° ю. ш.) и около 40% на северные широты (>30° с. ш.)

способных действовать при пониженной температуре. Измерения показали, что в тундре достаточно высоки скорости образования метана и его окисления. Накопился обширный материал, доказывающий участие северных территорий в цикле метана.

Цикл метана в биосфере стал одним из главных в Международной программе глобальных изменений и соответствующей ей государственной научно-технической программе России «Глобальные изменения окружающей среды и климата», сформированной Н. П. Лаверовым. При выполнении этой программы необходимо было определить потоки метана от земной поверхности. В основном для таких измерений используют камерный метод: на поверхность почвы помещают камеру и в течение короткого времени определяют изменение концентрации газа чувствительным методом хроматографии с плазменно-ионизационным детектором. (Аналогичный метод применяют для измерения дыхания почвы — основного источника углекислоты на территории нашей страны.) Проведенные Н. С. Паниковым исследования показали, что в среднем эмиссия метана составляет  $0.51 \pm 0.99$  мг С/м<sup>2</sup>/ч, т. е. в пересчете

на углерод это означает, что с 70 млн. км<sup>2</sup> заболоченных земель Западной Сибири за 150 дней поток метана составит 1.7 Тг. Это на порядок ниже, чем значения, полученные ранее при глобальных расчетах для северных болот<sup>4</sup>. Аналогичную величину (т. е. низкую) для болот вблизи Гудзонова залива приводят и канадские ученые.

Действительно, выход метана в атмосферу из анаэробных слоев заболоченной почвы в большой степени зависит от транспорта газа: он крайне неравномерен и по площади, где имеются газовые ходы, и по времени, поскольку зависит, например, от колебаний уровня воды. По моему мнению, камерный метод дает превосходные результаты при изучении закономерностей локальных процессов, но для оценки неравномерной эмиссии метана с больших площадей необходимы интегральные методы.

Тем не менее, почему все-таки эмиссия метана из северных болот

<sup>4</sup> Слободкин А. И., Паников Н. С., Заварзин Г. А. Образование и потребление метана микроорганизмами в болотах тундры и средней тайги // Микробиология. 1992. Т. 61. С. 683—691.



оказалась низкой? Нет ли здесь какого-либо переключающего механизма? График зависимости выхода метана из болот от температуры, составленный И. Азельманом и П. Крутценом<sup>5</sup>, допускает возможность резкого перелома скорости процесса около 15°C. Ответ следует искать в особенностях микробных сообществ, участвующих в цикле метана в холодной зоне.

### ЖИВАЯ ИСТОРИЯ

Мы очень часто, а в «Природе» в особенности, обращаемся к прошлому нашей науки. Вместе с тем, и для нас, и, может быть, после нас будет интересно знать «живую историю»: что и как делается сейчас нашими современниками.

В начале 1970-х годов два аспиранта Института микробиологии — Б. Б. Намсараев и Т. Н. Жилина (сейчас они уже доктора наук), исследуя соответственно метанооксиляющее (метанотрофы) и метанобразующее (метаногены) сообщества из подмосковного болота в Абрамцево, нашли, что основные организмы — эдификаторы (как их называли бы ботаники) — тесно связаны между собой трофическими взаимоотношениями<sup>6</sup>. Метанооксиляющие бактерии образуют на поверхности воды между стеблями болотных растений красивую пленку — бактериальный нейстон. Их сопровождают бактерии-спутники, использующие продукты неполного окисления метана. Они формируют так называемый бактериальный фильтр,

преграждающий путь в атмосферу восстановленным соединениям, образующимся в анаэробной зоне. Метанобразующие бактерии ведут себя сложнее — они формируют сложные агрегаты-консорции, в которых между пористой псевдопаренхимой, образованной метаносарциной, располагаются остальные организмы анаэробного метаногенного сообщества. Впоследствии такие гранулы-консорции стали объектом специального изучения в новом поколении анаэробных очистных сооружений.

Микробиологические процессы при низкой температуре могут осуществляться двумя путями. Во-первых, сообществом истинных психрофилов (от греч. ψυχρος — холод), т. е. организмов, не растущих при температуре выше 20°C. Во-вторых, организмами с широким температурным оптимумом, так называемыми психротрофными<sup>7</sup> (этот нелепый термин, в переводе означающий «хладоеды», укоренился в американской литературе). Видимо, удобнее говорить о психроактивных организмах, т. е. организмах, сохраняющих активность при низкой температуре, хотя оптимум их роста лежит выше 20°C. Биологической активностью при пониженной температуре может обладать сообщество, в которое входят оба типа организмов.

Кстати, еще об одном словоупотреблении. Условия, в которых растут те или иные организмы, часто называют по доминирующему там типу: для соленых водоемов — галофильные, для гидротерм — термофильные и т. д. Конечно, это жаргон, но очень удобный и вполне понятный читателю.

Психроактивные сообщества не пользуются популярностью у общих микробиологов, потому что эти микробы растут очень медленно, требуя десятки дней, тогда как кишечная палочка *E. coli* вырастает в термостате при 37°C за ночь. Ясно, что аспирант-

<sup>5</sup> Aselmann I., Crutzen P. J. Global Distribution of Natural Freshwater Wetlands and Rice Paddies, Their Net Primary Productivity, Seasonality and Possible Methane Emissions // *J. Atmos. Chem.* 1989. V. 8. P. 307—358.

<sup>6</sup> Намсараев Б. Б., Заварзин Г. А. Трофические связи в культуре, окисляющей метан // *Микробиология.* 1972. Т. 41. С. 999—1006; Жилина Т. Н., Заварзин Г. А. Трофические связи между метаносарциной и ее спутниками // *Микробиология.* 1973. Т. 42. Вып. 2. С. 266—273.

<sup>7</sup> Morita R. Y. Psychrophilic Bacteria // *Bacteriol. Rev.* 1975. V. 39. P. 144—167.

скую работу (а теперь — краткосрочный грант) выполнить с такими микробами не удастся. Кроме того, для инкубирования психроактивных организмов нужны обширные помещения — во многие десятки раз большие, чем для мезофилов. Однако для понимания микробных процессов, происходящих на холодных просторах России, важны именно сообщества психроактивных организмов, для зоны тундры — настоящих психрофилов, а для бореальной зоны с ее сезонными колебаниями температуры — психротрофных.

К началу 1990-х годов о разнообразии организмов цикла Зенгена было известно, что метанотрофов (окисляющих метан), живущих при температуре выше 15°C, больше 20 видов, а метаногенов (образующих метан) — около 70 видов. При температуре ниже 15°C не было известно ни тех, ни других.

В холодную зиму 1986 г. из-под толстого льда, покрывавшего болото близ поселка Абрамцево, были отобраны пробы анаэробного осадка с высоким содержанием метана и тут же помещены в холодильник. Из них Жилина сделала посев на среды для метаногенов. Прошло еще четыре года, прежде чем работы по изучению метаногенов, начавшиеся еще в 70-х годах, завершились выделением первой чистой культуры метаносарцины (*Methanosarcina*), активно образующей метан при температуре ниже 15°C. Это означало, что существует психроактивное сообщество, вырабатывающее все необходимые для метаногенеза предшественники. Действительно, Жилина обнаружила и спутника метаносарцины — психроактивную гомоацетатную бактерию рода *Acetobacterium*, образующую ацетат<sup>8</sup>. Эти результаты стимулировали исследование психроактивного микробного сообщества, участвующего в цикле Зенгена.

В 1989 г. два аспиранта лаборато-

рии микробных сообществ О. Р. Коцюрбенко и М. В. Омельченко приступили к изучению образцов, взятых около поселка Хальмер-Ю в 100 км севернее Воркуты. Здесь расположена южная тундра, заросшая низкой ивой, с осоково-сфагновым покровом в залитых водой понижениях и торфяными буграми с ядрами вечной мерзлоты. В августе удалось измерить и выделение метана из залитых водой понижений, и его поглощение на возвышенных местах. Для исследований образцы привезли в Москву, в Институт микробиологии.

В пробе из осоково-сфагнового болота, взятой на уровне уреза воды, Омельченко обнаружила метанооксилющие бактерии<sup>9</sup>. За месяц в колбах, заполненных смесью метана (40%) и воздуха (60%), на минеральной среде Виттенбери при 6°C развивались метанотрофные организмы: появлялась равномерная муть, в газовой фазе уменьшалось содержание метана и кислорода и образовывалась углекислота.

Основным компонентом в сообществе был крупный плотный кокк, внешне напоминавший хорошо известный *Methylococcus capsulatus*. Известно, что этот организм растет при сравнительно низкой концентрации кислорода и низком значении pH среды. Для метанооксилющего организма низкая температура благотворна тем, что при этом резко повышается растворимость  $\text{CH}_4$  и  $\text{O}_2$  — основных субстратов роста.

Из наиболее активного при низкой температуре сообщества первым был выделен истинно психрофильный метанотроф *Methylobacter* Z-0021. После 45

<sup>8</sup> Жилина Т. Н., Заварзин Г. А. Образование метана при низкой температуре чистой культурой метаносарцины // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. С. 1242—1245.

<sup>9</sup> Омельченко М. В., Савельева Н. Д., Васильева Л. В., Заварзин Г. А. Психрофильное метанотрофное сообщество из почвы тундры // Микробиология. 1992. Т. 61. С. 1072—1077; Omelchenko M. V., Vasilyeva L. V., Zavarzin G. A. Psychrophilic Methanotroph from Tundra Soil // Current Microbiol. 1993. V. 27. P. 255—259.

дней инкубации на агаре он образовал колонии. Он едва рос при 20°C, а лучше всего развивался при 3.5—10°C (в этом интервале время удвоения составляло двое суток, а при 15°C — уже трое суток). В отличие от других метилококков психрофильный микроб имеет газовые везикулы: они пропадают при 3.5°C, появляются при 7°C, а при 20°C присутствуют во всех клетках. Газ в таких везикулах находится в равновесии с окружающей средой. Возможно, везикулы компенсируют понижение растворимости, когда повышается температура, увеличивая поверхность соприкосновения клетки с газом, но не снаружи, а внутри!

Род *Methylococcus* был неоднороден: он включал группы организмов с низким содержанием гуанин-цитозиновых (Г+Ц) пар в ДНК (48—55%) и высоким (59—66%); в психрофильном Z-0021 их 45%. Впоследствии организмы с низким содержанием Г+Ц были отнесены к роду *Methylobacter*, куда попал и штамм Z-0021 как *Methylobacter psychrophilus*. По составу и активности ферментов можно было думать, что это — обычный метилококк, приспособившийся к жизни при низких температурах.

Кроме кокков в культуре присутствовали и крупные палочки *Methylobacter*. Как обычно, метанотрофов сопровождали разнообразные спутники, но на сей раз — либо психрофильные, либо психроактивные. Л. В. Васильева, специалист по необычным микробам, обнаружила среди них ряд новых микроорганизмов, например, психроактивный каулобактер, закутанный, как в туп, в колоколообразную капсулу.

Итак, Омельченко удалось найти представителя метанотрофов, окисляющего метан при низкой температуре. В тундре России есть организмы, способные образовать бактериальный фильтр и не пропустить этот газ в атмосферу. Так, сотрудники Института почвоведения и фотосинтеза, работая на Колыме, на кусочках мха обнаружили и идентифицировали с помощью иммунофлуоресцентной реакции несколько видов

метанооксиляющих организмов<sup>10</sup>. Поскольку в культуру их не выделяли, то нельзя сказать, относятся ли они к психроактивным организмам.

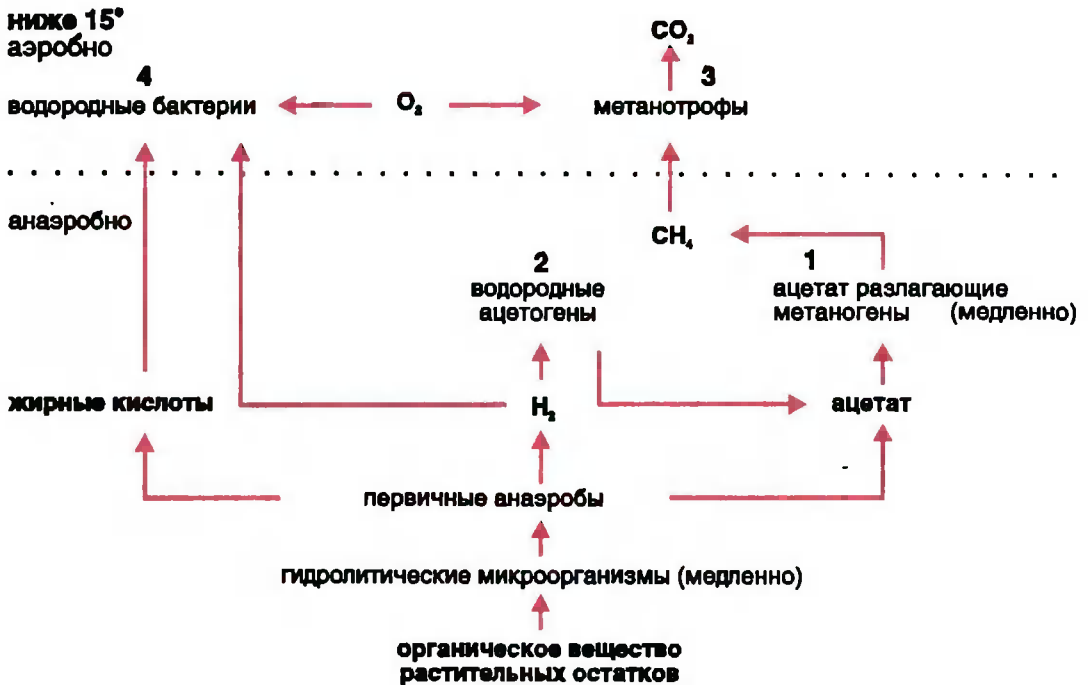
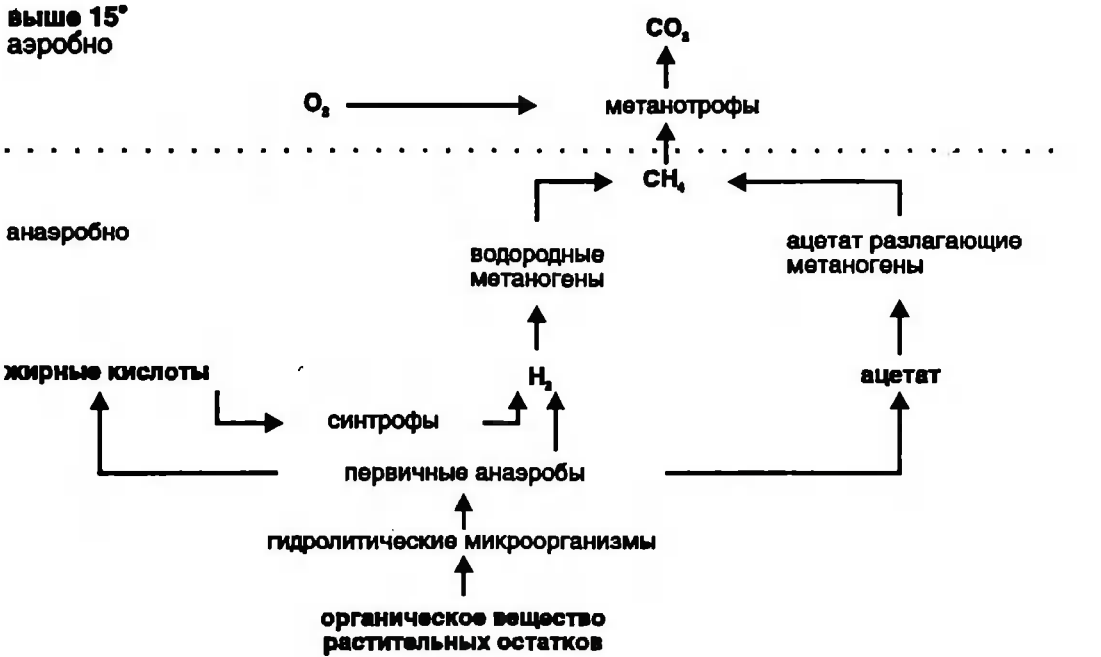
В бактериальный фильтр входят не только метанотрофные организмы, но и целый ряд других бактерий, еще ждущих своего исследования. Ждут дальнейшего изучения и психроактивные метанотрофы, которые особенно важны для бореальной зоны с ее резкими перепадами температуры. Именно в этой зоне с более длинным вегетационным периодом и большей продукцией органического вещества расположены основные естественные источники метана в обширных болотах России.

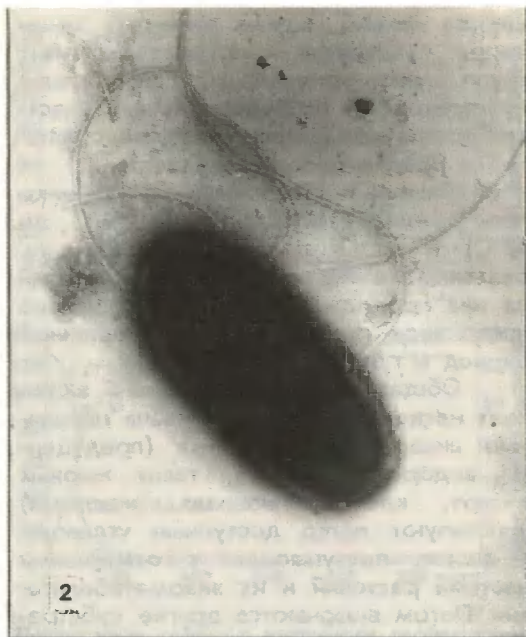
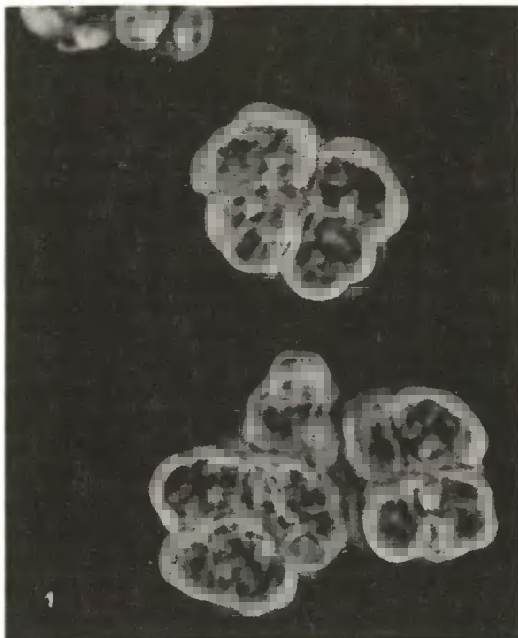
Активный психрофильный бактериальный фильтр представляет естественный барьер на пути газов в атмосферу. Если при таянии вечной мерзлоты метан будет поступать в холодные поверхностные слои почвы, то там он может быть окислен организмами подобными Z-0021. При сравнительно большой скорости роста психроактивные метанотрофы могут сформировать защитный барьер в рыхлом верхнем слое почв. Не исключено, что засев психроактивными метанотрофами будет полезен. Методика массового культивирования таких организмов досконально разработана («гаприн» на Светлогорском комбинате, Волгоград).

#### ПСИХРОФИЛЬНОЕ МЕТАНОГЕННОЕ СООБЩЕСТВО

В отличие от аэробного сообщества бактерий, в котором связи между компонентами обусловлены в первую очередь конкуренцией за кислород, в анаэробном сообществе, функционирующем как единая система, трофические связи очень прочны. Проследить за микробными процессами в таком сооб-

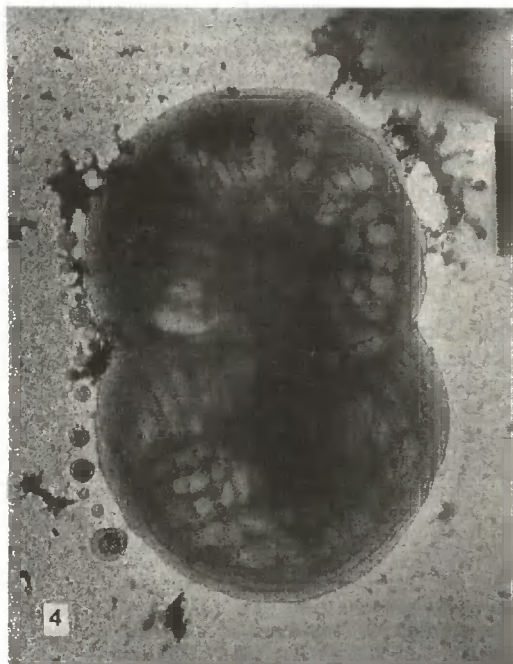
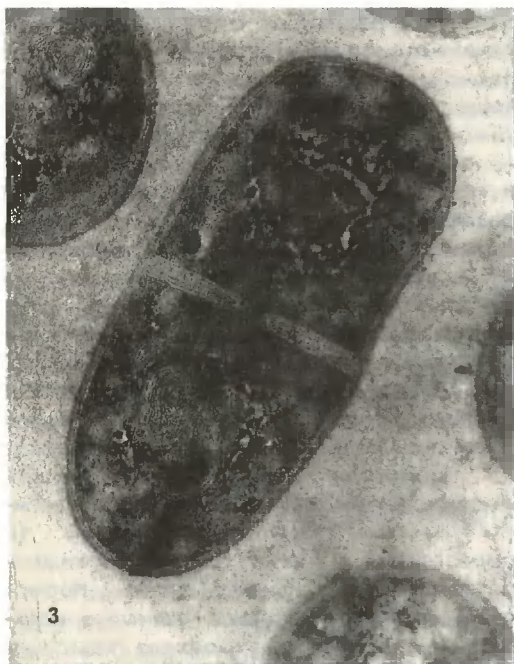
<sup>10</sup> Vecherskaya M. S., Galchenko V. F., Sokolova E. N., Samarkin V. A. Activity and Species Composition of Aerobic Methanotrophic Communities in Tundra Soil // Current Microbiol. 1993. V. 27. P. 181—184.





Температурный порог и схемы переключения потоков веществ в микробных сообществах, связанных с эмиссией парниковых газов (слева). Цифрами обозначены ключевые представители психрофильного метаногенного сообщества и аэробного бактериального фильтра с высокой активностью при температуре сезонного

слоя (выделены впервые в Институте микробиологии РАН): 1 — *Methanosarcina* sp. Z-7289 (увел. 2800), 2 — *Acetobacterium paludosum* Z-4092 (увел. 30 тыс.), 4 — *Methylobacter psychrophilus* Z-0021, ультратонкий срез (увел. 59 тыс.), 3 — *Arthrobacter crigenum* Z-0036, ультратонкий срез (увел. 72 тыс.).



щество можно, изучив динамику химических субстратов и продуктов разных групп микроорганизмов. Потребление субстратов на последовательных участках трофической цепи дает представление о работе целого сообщества.

Опыты, поставленные Коцюрбенко при разной температуре (от 6°C до 17°C) и с 17 разными субстратами, оказались очень длительными: каждый из них продолжался 300 суток, далеко превосходя по времени вегетационный период в тундре<sup>11</sup>.

Общая схема превращений включает несколько этапов. Сначала первичные анаэробы-бройдильщики (продуценты водорода, ацетата, таких жирных кислот, как пропионовая, масляная) используют легко доступные углеводы и белки, поступающие с отмершими частями растений и их экзометаболитами. Потом включаются другие субстраты — полимерные соединения (прежде всего клетчатка), которые гидролизуют бактерии. Все это поступает в общий пул продуктов первичных анаэробов. Синтрофы потребляют жирные кислоты, образуя ацетат и водород, но при этом необходимо быстрое и полное удаление водорода. В этом процессе участвуют три основные группы бактерий: сульфатовосстанавливающие, метанобразующие, гомоацетатные. Каждая из них образует свой продукт (соответственно сероводород, метан, ацетат) и имеет свою пороговую концентрацию водорода, ниже которой он не используется. Для гомоацетатных этот порог обычно выше того, при котором работают синтрофы.

В слаженной работе сообщества большое значение имеет скорость роста каждого его члена. Метанобразующие и синтрофные организмы растут очень медленно, не быстро растут и гидролитические бактерии, быстрее — психрофильные ацетогены,

а быстрее всех — психрофильные первичные анаэробы. Поэтому опыты были поставлены в двух вариантах: с разведением проб (в 10 раз) и без него. В первом пробы были разбавлены бикарбонатной средой с характерными субстратами, и, следовательно, ход процесса зависел от роста соответствующих микроорганизмов. Во втором в пробы не добавляли субстраты, и шло медленное разложение органического вещества почвы. Таким образом, в первом случае значение имел рост организмов, во втором — уже сбалансированное сообщество с определенным количественным соотношением разных групп. Наиболее наглядными были опыты с разбавлением.

Гидролиз полимеров, особенно клетчатки, идет медленно. Именно поэтому увлажненные области холодного климата служат поглотителем (стоком) углекислоты, в анаэробных условиях превращающейся в неразлагаемые растительные остатки с органическим углеродом. Здесь располагается глобальная холодная ловушка для углерода.

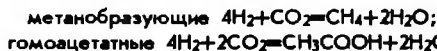
Оказалось, что легко доступные вещества, такие как углеводы, бройдильщики разлагают очень быстро: они успевают за короткий вегетационный период использовать все доступные вещества. Так же быстро при всех температурах потребляется и водород — с одинаковой скоростью и при 6°C, и при 28°C. Но образуемые продукты различны. При низкой температуре в системе накапливались жирные кислоты и ацетат, а при повышенной они довольно быстро использовались. Это указывает на то, что при низкой температуре пара «синтрофные бактерии — водородные метаногены» блокирована и в системе накапливаются пропионовая и уксусная кислоты.

Пороговой температурой между мезофильной системой (с образованием метана) и психрофильной (с образованием кислот) оказалась температура 15°C. Ниже этого порога преимущество получают активные психрофильные и психротрофные гомоацетатные бактерии, а выше него —

<sup>11</sup> Kotsyurbenko O. R., Soloviova T. I., Nozhevnikova A. N., Zavarzin G. A. *Metanogenic Degradation of Organic Matter by Anaerobic Bacteria at Low Temperature* // *Chemosphere*. 1993. V. 27. № 9. P. 1745—1761.



метанобразующие. Соответствующие реакции для обеих групп выглядят так:



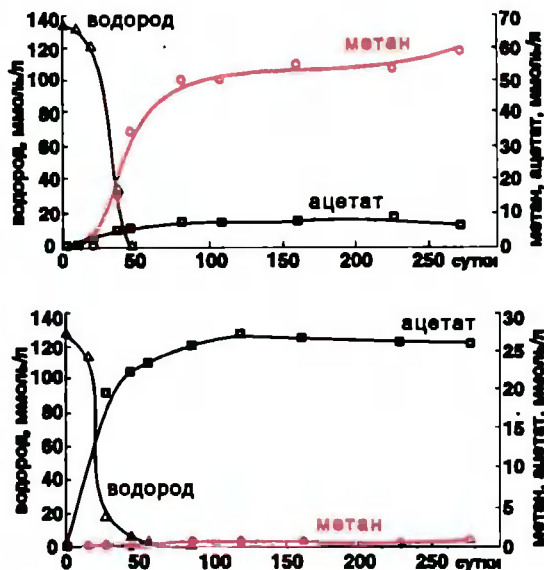
При низкой температуре гомоацетатные бактерии растут быстро, быстро потребляют водород и образуют ацетат. Ряд психроактивных гомоацетатных бактерий удалось выделить из разных мест. Они оказались довольно разнообразной группой, которая до этого не привлекала внимания экологов, относившихся к ним как к второстепенному биохимическому объекту. Однако для понимания бактериальных процессов в холодном климате психроактивные гомоацетатные бактерии становятся первоочередными объектами исследований.

В психрофильном сообществе кроме метаногенов потреблять водород могут и сульфатовосстанавливающие бактерии. Исследуя процессы деградации в холодном озере Констанц у склонов Альп, рано скончавшийся талантливый немецкий микробиолог Ф. Бак, еще будучи аспирантом, нашел, что при низкой температуре между сульфатовосстанавливающими и гомоацетатными бактериями существуют конкурентные отношения. Это заставило обратить более пристальное внимание на роль гомоацетатных бактерий в холодных условиях. Но нас интересовал прежде всего метан.

Психроактивные метаногены, использующие водород, пока не обнаружены и не выделены в культуру. Может быть, просто потому, что такая задача не казалась актуальной. Но, судя по результатам экспериментов Коцюрбенко, они явно уступают гомоацетатным бактериям. Максимальное образование метана из ацетата анаэробным сообществом тундры наблюдается при 15°C.

#### ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В ПСИХРОФИЛЬНОМ СООБЩЕСТВЕ

Итак, результаты экспериментов с растущим психроактивным метаногенным сообществом показывают, что при температуре ниже 15°C происходит



*Потребление водорода микробным сообществом тундровой почвы при 28°C (вверху) и при 15°C (внизу). В развивающемся при низкой температуре анаэробном микробном сообществе происходит изменение в потоках вещества в трофической цепи с порогом около 15°C: при температуре 15°C и ниже доминирует ацетогенез, а при температуре выше 15°C — метаногенез.*

переключение с метаногенеза на ацетогенез из-за того, что водород становится субстратом гомоацетатных бактерий<sup>12</sup>. Регуляция процессов происходит не на уровне видов организмов, а на уровне взаимодействия их в сообществе. Причем это относится к сообществу, деятельность которого имеет бесспорно глобальное значение, вплоть до влияния на климат.

Второй субстрат метаногенов — ацетат — используется только двумя их родами: *Methanosarcina* и *Methanofrix*, причем первые имеют меньшее сродство к ацетату, зато растут быстрее. Психроактивные метаносарцины не успевают за 300 дней опыта накопить достаточную биомассу,

<sup>12</sup> Заварзин Г. А., Коцюрбенко О. Р., Соловьева Т. И., Ножевикова А. Н. Температурный порог при развитии метаногенного или ацетогенного микробного сообщества из почвы тундры // Докл. РАН. 1993. Т. 329. С. 792—794.

чтобы использовать ацетат для образования метана.

Тем не менее в пробе без разбавления, т. е. без влияния процессов роста, ацетат разлагается с образованием метана. Таким образом, сбалансированное психроактивное микробное сообщество с установившимися количественными соотношениями между группами ведет себя иначе, чем развивающееся сообщество.

Из разных образцов удалось выделить культуры психроактивных метаносарцин. Они оказались очень консервативными в отношении субстратов. Так, метаносарцина, выделенная Жилиной, потребляла триметиламин и лишь при повышении температуры до 15°C и выше начинала разлагать ацетат. Метаносарцины, выделенные Коцорбенко, напротив, использовали только ацетат. Надо сказать, что из-за медленного роста этих организмов нельзя ожидать быстрых результатов: потребуются много времени, прежде чем удастся разобраться в биохимических механизмах. Сегодня приходится опираться на предварительные неполные данные (психрофильных метанотрикссов пока не удалось обнаружить).

Тем не менее, для северных районов нашей страны относительно цикла Зенгена напрашивается общий вывод. Продукция метана может оказаться значительно меньше, чем это предполагалось, по двум причинам. Во-первых, благодаря бактериальному фильтру из психроактивных метанооксилирующих бактерий, который предотвращает выброс метана в атмосферу. Такой фильтр особенно важен для областей вечной мерзлоты, где возможно выделение погребенного метана. Во-вторых, вследствие переключения анаэробной деградации органического вещества с метаногенеза на ацетогенез при понижении температуры. Сказанное отнюдь не исключает биогенного метаногенеза при низкой температуре. Однако он, видимо, идет в результате накопления активной массы метаногенов и синтрофов, как медленно растущих, так и медленно отмирающих при низкой температуре.

В целом полученные данные дают представление о микробном механизме, который обуславливает сравнительно низкую биологическую эмиссию метана природными экосистемами на территории России.

## Таяжные болота — глобальный источник атмосферного метана?

Н. С. Паников

**С**НАЧАЛА «метанового бума», охватившего с 1980-х годов научное сообщество в связи с обнаружением глобальных изменений климата, северные болота оказались объектом самого пристального внимания. Им приписывалась главная роль в пополне-

нии атмосферного метана, участвующего в парниковом эффекте<sup>1</sup>.

В пользу такого предположения

<sup>1</sup> Matthews E., Fung I. Methane Emission from Natural Wetlands: Global Distribution, Area, and Environmental Characteristics of Sources // *Global Biogeochemical Cycles*. 1987. V. 1. P. 61—86; Cicerone R. J., Oremland R. S. Biogeochemical Aspects of Atmospheric Methane // *Global Biogeochemical Cycles*. 1988. V. 2. P. 299—327.



*Николай Сергеевич Паников, доктор биологических наук, заведующий лабораторией почвенной микробиологии и заместитель директора Института микробиологии РАН. Область научных интересов — экология, физиология и кинетика роста микроорганизмов. Автор более 200 научных трудов, в том числе шести монографий.*

говорит прежде всего широтное распределение метана в атмосфере Земли: максимум его суммарной концентрации, а также содержания легкого «биогенного» изотопа  $^{12}\text{CH}_4$  приходится именно на высокие широты<sup>2</sup>. Из всех известных источников метана в северных широтах главными можно считать лишь болота, озера и нефтегазовые месторождения. Отсюда следует, что болота и озера — основной естественный производитель по крайней мере «молодого» биогенного метана, который образуется в современный геологический период.

Однако в последние годы столь значительное участие северных болот в глобальной эмиссии метана было поставлено под сомнение. Так, прямые измерения потоков  $\text{CH}_4$  на болотах США и Канады, выполненные с использованием современной техники, выявили довольно низкие интенсивности его потоков<sup>3</sup>. Экстраполяция локальных и региональных измерений на Земной шар в целом дала диапазон значений всего лишь 10—35 Тг/год, т. е. на порядок ниже прежних оценок: 100—200 Тг/год<sup>4</sup>.

#### НАЧАЛО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для разрешения противоречия необходимы более надежные количественные данные об источниках и стоках метана в других (помимо США и Канады) регионах. Особенно велика потребность в обследовании территории России и, в частности, наиболее обширных бореальных болот Земли, расположенных в Западной Сибири. До сих пор там не проводились прямые измерения эмиссии метана и в глобальных расчетах довольствовались весьма приблизительными экспертными оценками, основанными на корреляциях потоков  $\text{CH}_4$  с климатическими параметрами<sup>5</sup>.

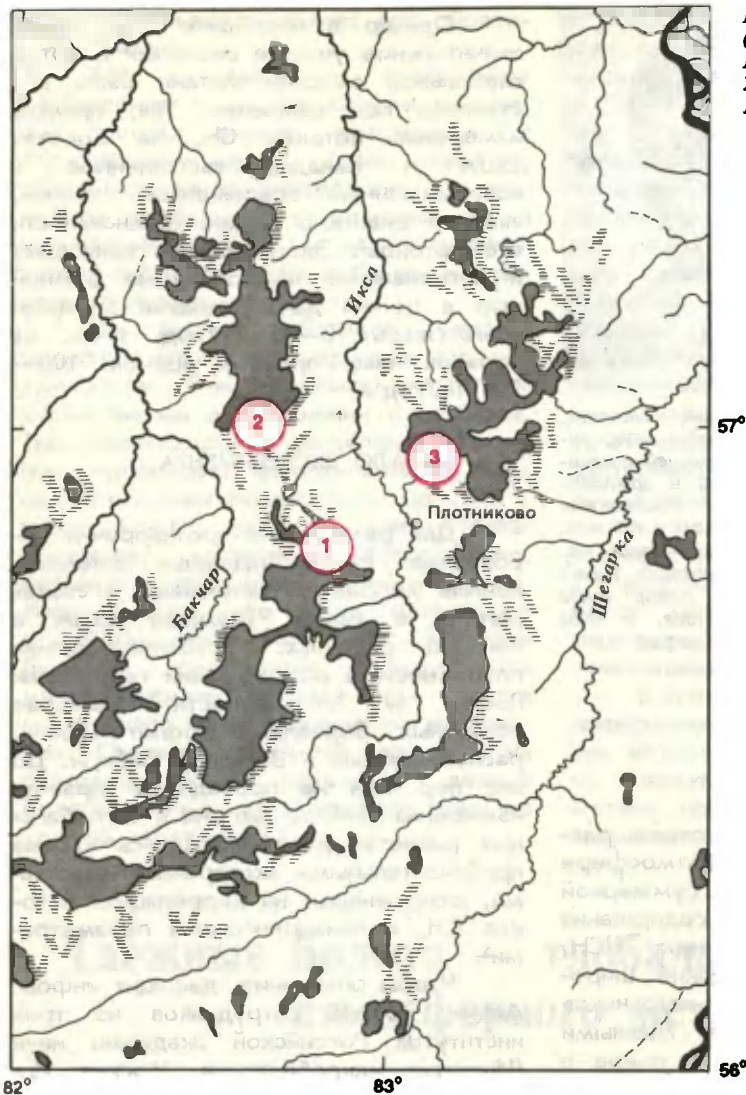
Чтобы восполнить дефицит информации, группа сотрудников из трех институтов Российской академии наук (Институт микробиологии, Москва; Институт почвоведения и агрохимии, Новосибирск; Институт химической кинетики и горения, Новосибирск) в течение трех лет (1992—1994) проводи-

<sup>2</sup> Fung I., John J., Lerner J. et al. Three-Dimensional Model Synthesis of the Global Methane Cycle // J. Geophys. Res. 1991. V. 960. P. 13033—13065; Quay P. D., King S. L., Lansdown J. M., Wilbur D. O. Isotopic Composition of Methane Released from Wetlands: Implications for the Increase in Atmospheric Methane // Global Biogeochemical Cycles. 1988. V. 2. P. 385—397.

<sup>3</sup> Roulet N. T., Ash R., Moor T. R. Low Boreal Wetlands as a Source of Atmospheric Methane // J. Geophys. Res. 1992. V. 97D. P. 3739—3749.

<sup>4</sup> IPCC. Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge, 1992.

<sup>5</sup> Harris R., Bartlett K., Frohling S., Crill P. Methane Emissions from Northern High-Latitude Wetlands // Biogeochemistry of Global Change: Radiatively Active Trace Gases. New York, 1993. P. 449—486;



*Районы исследования болот (показаны серым) в Васюганье: 1 — Бакчарское, 2 — Гавриловское, 3 — Карагайское.*

ла полевые работы по оценке потоков двух парниковых газов — метана и диоксида углерода — на целом ряде болот, которые характерны для всей бореальной зоны Западно-Сибирской низменности<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> В полевых исследованиях принимали участие сотрудники Института микробиологии РАН А. М. Семенов, И. К. Кравченко, В. С. Вшивцев и А. Г. Дорофеев, а также сотрудники Института окружающей среды (Тсукуба, Япония) Г. Иноуэ и Ш. Ш. Максютов. Авторы выражают признательность всем участникам экспедиции, а также

В первый год наших сил хватило для обследования нескольких относительно небольших болот Томского стационара Института леса СО РАН, расположенного в 30 км от областного центра (56° с. ш., 85° в. д.). Болота

доктору биологических наук С. П. Ефремову, профессорам Н. М. Бажину и А. А. Титляновой за помощь в организации полевых исследований. Очень полезны были консультации по статистической обработке результатов, оказанные М. В. Глаголевым.

локализованы в междуречье Оби и Томи и принадлежат периферии основного болотного массива (Кеть-Чулымская торфяная область, Южное Приваюганье). В 1993—1994 гг. мы перенесли исследования в глубь заболоченных территорий, входящих в состав Васюганской торфяно-болотной области. Предметом нашего внимания стал полевой стационар Плотниково Института почвоведения и агрохимии (57° с. ш., 82° в. д.), где находятся аналитическая лаборатория и основной лагерь экспедиции. Отсюда начинались пешие и автомобильные маршруты на окружающие болота — в пойме р. Иксы, а также на верховые Бакчарское, Гавриловское и Карагайское болота.

Несколько слов о том, что представляют собой изученные таежные болота. В отличие от своих европейских аналогов и болот Томского стационара их размеры колоссальны: протяженность вдоль плоских водоразделов составляет десятки и сотни километров при небольшой мощности торфа (1—2 м). Периферия болота, как правило, покрыта разреженным и угнетенным лесом из сибирской ели и березы, ближе к центру преобладают безлесные участки, представленные олиготрофными и мезотрофными избыточно увлажненными комплексами. Самое распространенное растение — сфагновый мох, образующий почти сплошной покров. Пятнами растут кустарнички (касандра, подбел, багульник) и травянистые растения — пушица, осока, вахта, иногда тростник и папоротник. Пожалуй, для нас наибольший интерес представляют куртинки пушицы. Именно эти болотные растения ускоряют газообмен между атмосферой и анаэробными слоями болота: кислород движется по корням растений сверху вниз, а метан и диоксид углерода — в противоположном направлении, снизу вверх.

Методы измерения эмиссии газов были очень просты. На поверхности болота устанавливали газовые ловушки — камеры, состоящие из двух частей: основания из нержавеющей стали



*Место полевых измерений на Бакчарском болоте. Досчатые мостки предохраняют болото от выталтывания и искусственного выдавливания болотных газов. На заднем плане — микрометеорологическая установка.*

в форме квадратной рамы (40×40 см<sup>2</sup>) и съемного колпака из зачехленного органического стекла. Основание врезали в грунт на глубину 10 см не позднее чем за 0.5 ч до начала измерения, чтобы гарантировать стабилизацию нарушенного газообмена, а затем через гидрозатвор сочленили с ним колпак на 15—30 мин. (Топтать болото вокруг камеры нельзя, так как при этом из торфяного слоя выдавливаются газовые пузыри, что завышает действительную интенсивность эмиссии. Поэтому мы использовали легкие мостки и длинные газозаборные шланги.) Через каждые 5 мин из камеры отбирали пробы воздуха, которые доставляли в лабораторию на газовый анализ. Концентрацию метана определяли на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором, а концентрацию CO<sub>2</sub> измеряли на ИК-анализаторе INFRALYT-4 (Германия) или



*Мачта для непрерывной регистрации эмиссии газов микрометеорологическим методом (собрана совместно с японскими исследователями под руководством Г. Иноуэ). На ее вершине укреплен ультразвуковой анемометр (измеряет мгновенные значения скорости ветра) и газозаборное устройство; ниже — датчики температуры, влажности и обычные анемометры. Под пленкой расположены электронные блоки управления, ПЭВМ и коллектор проб воздуха.*

LICOR (США). Минимальные детектируемые потоки  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  составили соответственно 0.2 и 10  $\text{мг С/м}^2/\text{сут.}$

Летом 1994 г. методика была существенно усовершенствована благодаря привлечению к совместной работе двух новых партнеров — специалистов из японского Национального института исследований окружающей среды (Тсукуба) и летающей лаборатории ИЛ-18

из Центральной аэрологической лаборатории (Росгидромет, г. Долгопрудный, Московская обл.). Эмиссию метана и  $\text{CO}_2$  на Бакчарских болотах измеряли в течение июля — августа 1994 г. тремя методами: камерным; микрометеорологическим башенным (параллельная непрерывная регистрация мгновенных концентраций  $\text{CH}_4$  в воздухе над болотом и скорости ветра в сочетании с другими метеорологическими показателями; газовые потоки рассчитываются по математической модели турбулентного массопереноса с теми или иными упрощающими допущениями) и самолетным зондированием (измерение профильного распределения концентрации газов в тропосфере от 100 до 3000 м в утренние часы до начала перемешивания инверсионного слоя; эмиссию за ночной период рассчитывают по количеству накопленного газа сверх фоновой концентрации).

Сосредоточим свое внимание на результатах, полученных самым простым и прямым способом — камерным. Два других метода имеют то преимущество, что дают интегральную оценку потоков метана с больших площадей — от нескольких до сотен квадратных километров. (Итоги этих измерений составляют предмет специальной публикации, которая увидит свет в конце этого года.) Важно, что все три метода дали вполне сопоставимые результаты, что свидетельствует об их высокой надежности.

#### ЭМИССИЯ ГАЗОВ ИЗ БОЛОТ РАЗНЫХ ТИПОВ

На основе индивидуальных измерений газовых потоков мы получили средние по группам интенсивности эмиссии метана. Они варьировали от отрицательных значений (нетто-потребление атмосферного метана почвой в пойме Иксы) до нескольких десятков миллиграммов в час с квадратного метра на Бакчарском болоте. На пониженных элементах микрорельефа (например, микропонижения, мочажины) усиливалась эмиссия, хотя иногда



Таблица 1

Варьирование величин эмиссии  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ 

Участок измерения	Растительность	Эмиссия газов, мг $\text{C}/\text{м}^2/\text{ч}$		Температура почвы	Уровень воды от поверхности, см	pH	$E_h$ , МВ
		$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$				
Пойма р. Иксы							
Надпойменная терраса	Луговое разнотравье	213	-0.03	21.0	402	—	—
		318	0.01	21.5	292	—	—
Незатопленная часть поймы		200	-0.03	20.0	194	—	—
		275	-0.02	19.3	153	—	—
Берег		1.0	3.1	18.1	2.6	6.8	0.5— 199
Затопленная часть поймы		198	3.8	16.8	-4	7.2	—
		147	6.1	18.4	-5	7.2	-193
Бакчарское болото							
Микропонижение	Пушица, сфагнум,	73	9.2	18.8	9	3.6	-165
Микроповышение	кустарнички	68	11.6	20.4	22	3.7	-102
Гавриловское болото							
Микропонижение	Осока, сфагнум, вахта	145	8.4	18.7	11	4.2	-141
Микроповышение	Пушица, сфагнум, ериик	144	3.2	19.6	27	4.1	-153
Карагайское болото							
Микропонижение	Сфагнум, осока, кассандра	102	4.1	18.9	16	3.5	-253
Кочки	Пушица, сфагнум, клюква	161	5.3	23.2	31	3.6	-186

Примечание. Приведены средние значения эмиссии газов.

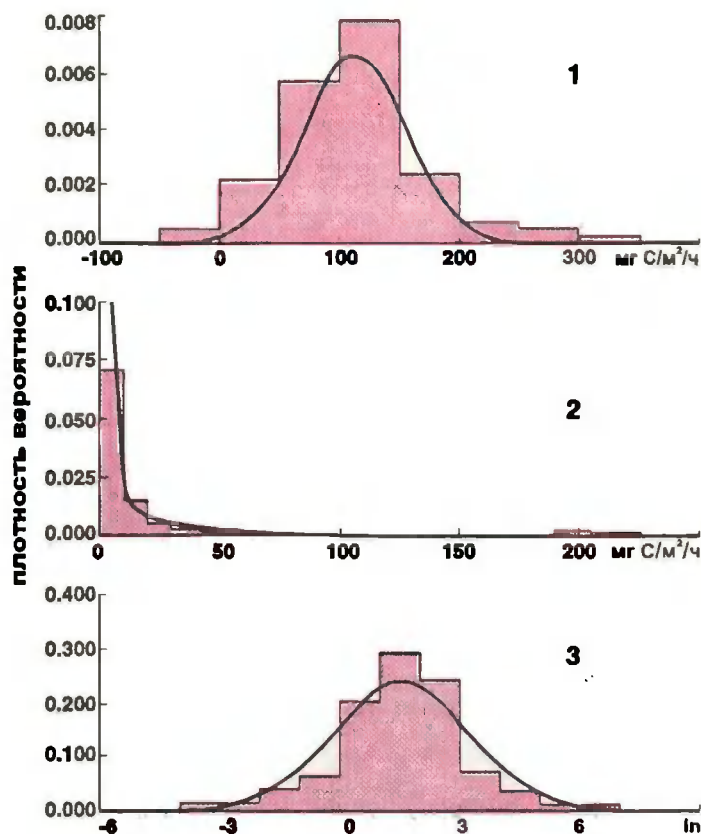
наблюдалась обратная картина — поток метана на микроповышениях, например, на куртинах пушицы, возрастал. Наиболее отчетливо эмиссия метана усиливалась при переходе от повышенных к пониженным элементам рельефа в пойме Иксы: в почве на надпойменной террасе господствовали аэробные условия с высокими значениями окислительно-восстановительного потенциала ( $E_h$ ) и глубоким залеганием грунтовых вод, что способствовало развитию метанотрофных бактерий и интенсивному потреблению метана из атмосферы; в затопленной части поймы с низким  $E_h$  образование и выделение метана было довольно сильным (табл. 1).

Потоки  $\text{CH}_4$  в низинных и верховых болотах в пределах Томского стационара мало отличались друг от друга. Связь эмиссии с характером растительности была довольно размытой. Как правило, наибольшей интенсивностью эмиссии отличались безлесные участки верховых болот. В целом на болотах и заболоченных лесах в

окрестностях Плотникова эмиссия метана была на порядок выше, чем в аналогичных болотных экосистемах Томского стационара. Так, за два летних экспедиционных периода потоки  $\text{CH}_4$  в среднем составили для Томского стационара  $0.9 \text{ мг C}/\text{м}^2/\text{ч}$  ( $n=70$ ,  $\sigma=1.3$ ) и для болот Васюганья —  $21.3 \text{ мг C}/\text{м}^2/\text{ч}$  ( $n=79$ ,  $\sigma=82.7$ ).

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ КОЛЕБАНИЕ ГАЗОВЫХ ЭМИССИЙ

В ходе полевых измерений мы смогли оценить влияние места и времени на потоки  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ . По данным всех однократных замеров эмиссии, сделанных почти в одно и то же время года и суток (с середины июля по середину августа, около полудня), построены выборочные кривые распределения потоков  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  раздельно для двух стационаров (Плотниково и Томский). Они оказались различными не только в количественном, но и в качественном отношении. Объединенная выборка 79 измерений



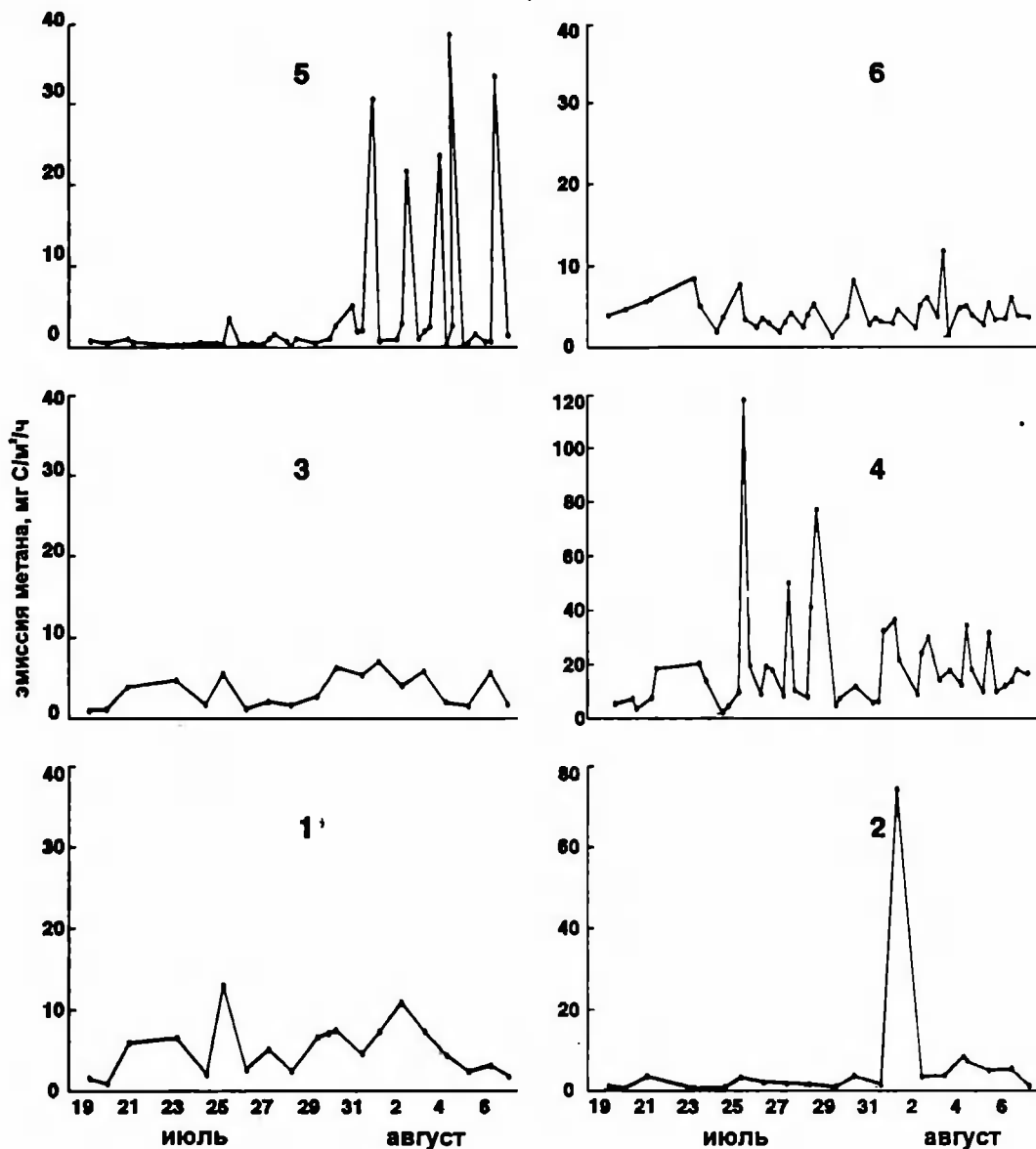
Распределение потоков CO<sub>2</sub> (1), метана (2, 3) из Бакчарского болота (n=79). Кривые 1 и 3 рассчитаны по уравнению нормального распределения, а кривая 2 — по уравнению лог-нормального распределения.

CH<sub>4</sub>-потоков в Плотникове дала логарифмически нормальное распределение, потоки CO<sub>2</sub> в той же выборке были распределены нормально. Для болот Томского стационара разброс 70 выполненных измерений оказался существенно ниже, а распределения величин эмиссий как CO<sub>2</sub>, так и CH<sub>4</sub> были симметричными и близкими к нормальному.

Напомним некоторые важные свойства лог-нормального распределения. Оно возникает тогда, когда факторы, определяющие разброс измерений, вызывают эффекты, пропорциональные самой измеряемой величине (т. е. когда устойчивы не абсолютные, а относительные ошибки измерения). С практической точки зрения наиболее существенно, что величины ниже среднего встречаются чаще, чем

величины выше среднего. Иными словами, наиболее вероятное значение потока метана всегда ниже генерального среднего (которое характеризует болото в целом) из-за относительно редких участков интенсивной эмиссии (на Бакчарском болоте они достигали 23 г CH<sub>4</sub>/м<sup>2</sup>/сут).

Такая особенность распределения метана предъявляет особо жесткие требования к объему выборки: для получения достоверного среднего нужно значительно больше замеров, чем при нормальном распределении. Так, обычная практика полевых измерений камерами-изоляторами предполагает 5—10 повторных замеров. Если бы мы ограничились таким объемом выборки, то для болот Плотникова 0.95-доверительный интервал средней эмиссии оказался бы чрезвычайно



Динамика эмиссии метана из Бакчарского болота. Цифрами обозначены камеры, расположенные друг от друга на расстоянии 2—6 м. Стохастический характер ежедневной динамики особенно показателен на примере пятой камеры: в первую половину срока наблюдения потоки были относительно равномерными и малоинтенсивными, затем скорость эмиссии  $\text{CH}_4$  резко возросла и стала хаотично меняться от нулевых до очень высоких значений.

широким — 5—60 мг  $\text{C}/\text{м}^2/\text{ч}$ . Поскольку распределение имеет положительную асимметрию, то при малой выборке наиболее вероятно занижение действительной оценки. Наша выборка (79 измерений) гарантирует существенно более узкий доверительный интервал — 11—26 мг  $\text{C}/\text{м}^2/\text{ч}$ .

Для нескольких точек болота была измерена эмиссия газов в динамике: ежедневно в одно и то же

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между эмиссией метана и факторами среды

Болота	Эмиссия		Температура		Уровень воды
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	воздуха	почвы	
Томского стационара, 1992 (n=23)	1.0 (0.0)	-0.088 (0.69)	0.507 (0.01)	0.075 (0.74)	-0.607 (0.01)
Томского стационара, 1992—1993 (n=36)	1.0 (0.0)	0.434 (0.02)	0.066 (0.71)	0.085 (0.96)	-0.194 (0.26)
Бакчарское, 1993 (n=24)	1.0 (0.0)	0.392 (0.06)	-0.393 (0.1)	0.212 (0.33)	-0.163 (0.48)
Гавриловское, 1993 (n=16)	1.0 (0.0)	0.535 (0.03)	0.284 (0.29)	-0.45 (0.11)	-0.411 (0.11)
Карагайское, 1993 (n=16)	1.0 (0.0)	0.736 (0.0)	0.206 (0.44)	-0.059 (0.83)	-0.493 (0.05)
В стационаре Плотниково, 1993 (n=56)	1.0 (0.0)	0.186 (0.17)	0.332 (0.02)	0.045 (0.75)	-0.288 (0.04)

Примечание. В скобках приведен уровень значимости, который равен вероятности того, что при данном объеме выборки отсутствует связь между случайными величинами; n — объем выборки.

время суток (около 14 ч) и в разные часы суток. Вычисление критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова показало, что и нормальный, и лог-нормальный, и иные законы, традиционно используемые в статистике, плохо применимы для полученных выборок. Можно предположить, что это связано с неслучайным характером временной динамики. Так, в эмиссии CO<sub>2</sub> наблюдались закономерные внутрисуточные (циркадные) ритмы с максимумами около полудня, причем подъемы и спады дыхательной активности почвы происходили почти синхронно в разных камерах, удаленных друг от друга на расстояния от 2 до 20 м. Механизм возникновения этих ритмов, детально изученный ранее, сводится к следующим основным положениям<sup>7</sup>. Во-первых, темновой газообмен CO<sub>2</sub> обусловлен главным образом дыхательной активностью микроорганизмов. Во-вторых, основными субстратами дыхания служат прижизненные корневые экссудаты растений. В-третьих, интенсивность корневого экзоос-

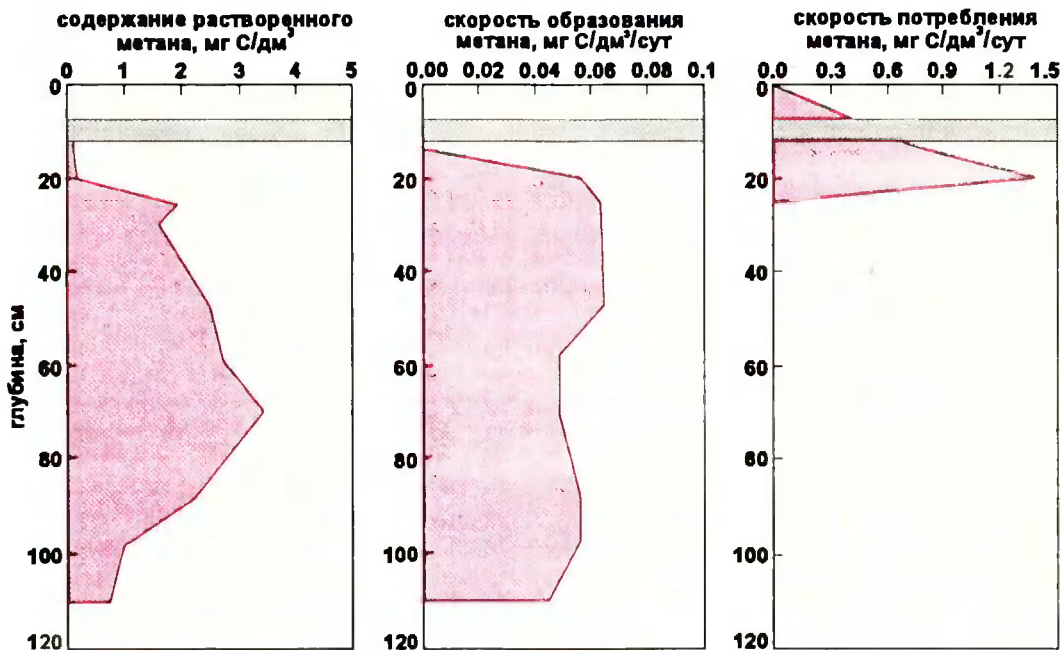
моса связана с фотосинтетической активностью растений и потому максимальна в дневные часы.

Временная динамика потока CH<sub>4</sub> менее регулярна, а внутрисуточная даже хаотична, прослеживается лишь усиление эмиссии в середине дня.

Оказалось, что эмиссия метана наиболее тесно связана с дыханием почвы и уровнем стояния грунтовых вод. Достоверная положительная связь установлена между потоком метана и величиной pH болотной воды. Однако в целом соответствующие коэффициенты корреляции (r) были довольно низкими (их значения варьировали для разных выборок от 0.2 до 0.7). Еще менее связана эмиссия метана с температурой почвы или воздуха. Более того, в разных выборках не совпадало не только численное значение коэффициента корреляции, но и его знак (табл. 2).

Таким образом, нам не удалось найти надежных индикаторов эмиссии метана среди общедоступных климатических или почвенно-экологических показателей. Наиболее вероятными причинами служат: нелинейность связей в природных системах, запаздывание отклика эмиссии на действие конкретного фактора среды и относительная простота цикла болотного метана, которая

<sup>7</sup> Panikov N. S., Gorbenko A. Ju. The Dynamics of Gas Exchange Between Soil and Atmosphere in Relation to Plant-Microbe Interactions: Fluxes Measuring and Modelling // Ecological Bulletins. 1992. V. 42. P. 53—61.



*Распределение растворенного метана, метано-генной и метанотрофной активности в Бакчарском болоте. Серой штриховкой показан уровень зеркала воды.*

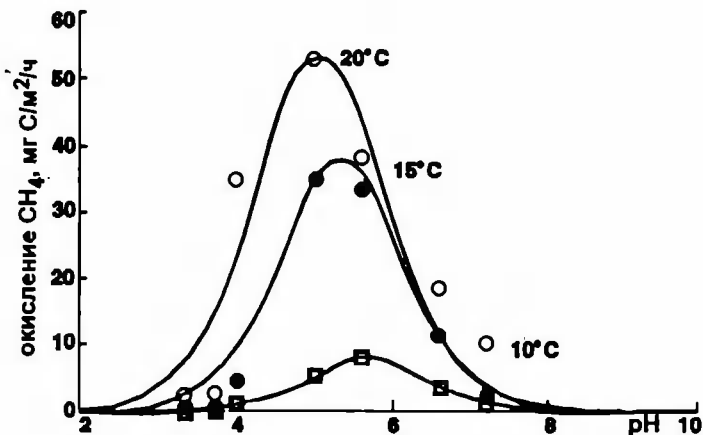
слагается всего лишь из двух, но противоположно направленных процессов (генерации  $\text{CH}_4$  в анаэробной зоне торфа и его окисления в аэробной зоне). Такие факторы среды, как температура, pH, концентрации биогенных элементов и др. действуют почти одинаково на оба «элементарные» процесса. Нам остается пояснить сказанное конкретными итогами лабораторных исследований.

#### ОСОБЕННОСТИ ЦИКЛА МЕТАНА В ТАЕЖНЫХ БОЛОТАХ

Олиготрофные и мезотрофные сфагновые болота являются весьма своеобразными средами для микробных процессов. Они отличаются очень низким содержанием минеральных биогенных веществ (следствие преимущественно атмосферного источника поступления влаги), высокой кислотностью реакций (из-за выделения органических

кислот мхами) и низкими температурами. Изолировать из болотных почв микроорганизмы, способные образовывать и окислять метан в таких экстремальных условиях, до сих пор не удавалось. Лишь в последнее время в данном направлении наметились некоторые успехи: в лаборатории Г. А. Заварзина выделены психроактивные агенты метанового цикла, а в нашей лаборатории — изолированы ацидотолерантные метанотрофные бактерии, приспособленные к ультрапресным средам. Однако большая часть данных по метаболизму микробного сообщества болотной почвы получена на интактных образцах торфа без выделения чистых или накопительных культур.

Чтобы получить профильное распределение метаногенной и метанотрофной активности в Бакчарском болоте, мы в лаборатории исследовали свежееотобранные образцы торфа. Их инкубировали соответственно в аэробных условиях с метаном в газовой фазе или анаэробно с субстратами метаногенеза ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  или ацетат). При расчете скорости потребления или генерации метана вносились поправки с



*Влияние pH на скорость окисления метана в верховом болоте при разных температурах. Экспериментальные данные получены для ультрараспресного кислого болота (pH 3.5).*

учетом реальных условий *in situ*: концентрации субстратов и кислорода (по уравнению Михаэлиса-Ментен), и температуры (по уравнению Аррениуса). Результаты опытов показали, что метанотрофные микроорганизмы локализованы в верхней части профиля, где преобладают аэробные условия (аноксия устанавливается лишь временно). Метаногенные бактерии имеют несколько максимумов, один из которых всегда приходится на торфяной слой непосредственно под уровнем стояния воды (расположение других слоев с повышенной метаногенной активностью колеблется в разных точках пространства).

Интересно, что потенциальная (измеренная при оптимальных условиях) и актуальная (рассчитанная с учетом реальных условий) метанотрофная активности зачастую близки друг другу. Это говорит о том, что бактериальный фильтр болота работает почти на пределе своих возможностей, без запаса активности, который гарантировал бы ее мгновенное увеличение при повышении интенсивности генерации метана в анаэробных слоях. В результате часть болотного метана всегда поступает в атмосферу.

В болотах Васюганья при более интенсивной эмиссии накапливается зна-

чительно меньше метана, чем в аналогичных болотах Европейской части России<sup>6</sup>. Скорее всего это объясняется особенностями растительного покрова, в частности, широким распространением на болотах Васюганья пушицы, корни которой служат своеобразным газопроводом для метана.

Изучение зависимости метанотрофной активности от важнейших экотопических факторов (pH и температуры) показало, что ее оптимум лежит в слабокислой области и умеренно высоких температурах (20°C). Формально pH-зависимость можно описать уравнением, заимствованным из кинетики ферментативных реакций. Важно, что прогноз поведения микроорганизмов в зависимости от pH должен учитывать буферную емкость среды: когда она невелика, клетки метанотрофов способны регулировать pH внутри и около клеток за счет собственной метаболической активности, в сильно забуференной среде метаболическая адаптация такого рода оказывается слишком слабой. Именно поэтому, вероятно, обнаруживается тесная сцепленность двух признаков, характерных для метанотрофов сфагновых болот, — кислотолерантность и резко выраженная чувствительность к

<sup>6</sup> Panikov N. S., Semenov A. M., Tarasov A. L. et al. Methane Production and Uptake in

Soils of the European Part of the USSR // J. of Ecological Chemistry. 1993. V. 1. P. 7—18.



наличию любых минеральных соединений в среде.

В заключение обратимся к сопоставлению наших локальных оценок с литературными данными по северным болотам США и Канады. Наши результаты по Томскому стационару (29—42 мг  $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$ ) близки к величинам эмиссии метана из болот Хадсон Бэй в Канаде (6—28 мг  $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$ ). Потоки  $\text{CH}_4$  из Васюганских болот многократно превышают эти данные (350—830 мг  $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$ ), тем не менее они перекрываются с колебаниями таковых для болот Миннесоты (93—402 мг  $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{сут}$ ). Столь существенные и статистически достоверные различия средних показателей в болотах, близких по другим своим характеристикам (растительность, запасы торфа, гидро-термические характеристики), очень поучительны, ибо еще раз напоминают об опасности получения ложной информации на основании корреляционных зависимостей. Возможно, что эти различия связаны с более широким распространением в Сибирских почвах растений с газопроводной функцией. Однако такая гипотеза нуждается в тщательной количественной проверке.

Наконец, воспользуемся данными наших измерений, чтобы провести ориентировочную экстраполяцию на регион в целом. Излишне подчеркивать, что такая оценка может быть только весьма и весьма условной, и мы не можем считать ее достоверной. Примем, что площадь болот Западной Сибири составляет 70 млн. км<sup>2</sup> и половина этих площадей выбрасывает метан так же интенсивно, как Васюганские болота, а половина — как болота Томского стационара. Продолжительность активного периода эмиссии примем равной 110 дням в году. Тогда годовая эмиссия  $\text{CH}_4$  из почв Западной Сибири в атмосферу должна составить 22.2 Тг. Величина эта составляет не менее 4% от вероятностного глобального потока  $\text{CH}_4$  из всех источников — около 500 Тг/год. Таким образом, естественные болота Западной Сибири могут претендовать на роль одного из глобальных источников атмосферного метана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской ГНП 18 «Глобальные изменения природной среды и климата», а также Международного научного фонда Дж. Сороса, грант № RBM 000.

## Мусорные залежи — «метановые бомбы» планеты

А. Н. Ножевникова

**ИЗ ОБЩЕГО** количества метана, ежегодно поступающего в атмосферу (310—990 млн. т), 40—70% образуются благодаря антропогенной деятельности, причем более 20% из них приходится на объекты захоронения

твердых бытовых отходов (ТБО) и осадки сточных вод<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Rotmans J., Elsen M. G. J. den, Rol M. S., Swart R. J., Woerd H. J. van der. Stabilizing Atmospheric Concentrations: Towards International Methane Control // AMBIO. 1992. V. 21. № 6. P. 404—413; Khalil M. A. K., Rasmussen R. A. Constraints on the Global Sources of Methane and an Analysis of Recent Budgets // Tellus. 1989. V. 42b. P. 229—236.



*Алла Николаевна Позжевникова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробных сообществ Института микробиологии РАН. Основной круг научных интересов — экология и роль микроорганизмов в защите окружающей среды. Занимается фундаментальными микробиологическими исследованиями в области обработки органических отходов, очистки сточных вод, биоремедиацией загрязненных территорий, самоочищением пресноводных водоемов.*

Подсчитано, что снижение эмиссии метана в атмосферу на 10% может стабилизировать концентрацию этого газа и значительно сократить парниковый эффект. Решить такую задачу легче всего, уменьшив антропогенные выбросы метана. С этой точки зрения объекты захоронения городских отходов становятся предметом самого пристального внимания исследователей. Ведь в отличие от природных и большинства других антропогенных источников метана технология их организации и эксплуатации может совершенствоваться.

### МИЛЛИОНЫ ТОНН ОТХОДОВ

Ежегодно в городах мира образуется около 500 млн. т твердых бытовых отходов и такое же количество осадков сточных вод<sup>2</sup> (табл. 1, 2).

Основную часть городского бытового мусора утилизируют путем захоронения на специально организованных полигонах (часто это карьеры, овраги и другие понижения рельефа) и на стихийных свалках, что характерно для бедных стран. В некоторых развитых странах, особенно с небольшой территорией и высокой технологией (Швейцария, Япония и др.), мусор и даже осадки сточных вод сжигают.

Подготовка современного полигона ТБО включает уплотнение и гидроизоляцию дна, устройство дренажной системы для отвода фильтрационных вод, прокладку труб для сбора образующегося биогаза. Однако такая практика появилась лишь в последние десятилетия. Захораниваемый мусор пересыпают слоями песка или глины; при закрытии полигона толщина запирающего слоя грунта обычно составляет около 0,5 м. В большинстве развитых стран осадки сточных вод после предварительного обезвреживания утилизируют вместе с ТБО.

В свалочных отложениях спонтанно формируется анаэробное микробное

Таблица 1

Продукция и количество ТБО в разных частях света

Часть света	Продукция ТБО, кг/чел./сут	Количество ТБО, Тг	
		свалки	всего
Африка	0.4	38	80
Азия	0.6	175	363
Европа, в том числе бывш. СССР	1.1	165	224
Сев. Америка	1.75	216	301
Юж. Америка	0.8	47	64
Океания	0.6	12	14

<sup>2</sup> Bingemer H. G., Crutzen P. G. The Production of Methane from Solid Wastes // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 2181—2187.; OECD/IEA (Organization for Economic Cooperation and Development/International Energy Agency); Environmental Data Compendium 1989. Paris, 1989; World Resources 1990—1991. Washington, 1991.

Таблица 2

## Продукция, состав и количество городских отходов в различных регионах и странах

Страна	Продукция ТБО (кг/чел./сут)	Содержание органических веществ, %	Количество ТБО на полигонах, %
США	1.5—2.09	21	62—85
Канада	1.4—1.73	22	93—96
Австралия	0.59—1.9	22	60—98
Австрия	0.63	не определялось	57—64
Бельгия	0.9	0.86	50
Дания	1.2	17	18—31
Финляндия	1.12	не определялось	87
Франция	0.7—1.8	16	39—48
Германия	0.87	не определялось	69—74
Греция	0.71	не определялось	100
Ирландия	0.9—1.06	не определялось	100
Италия	0.68—0.72	15	35—83
Люксембург	1.0	не определялось	27
Нидерланды	1.23—1.6	40	45—55
Норвегия	1.3	24	53—78
Португалия	0.61	не определялось	16—24
Испания	0.75—0.9	не определялось	76—81
Швеция	0.82—1.0	20	35—42
Швейцария	1.06	19	15—18
Великобритания	0.85—1.0	19—20	88
Япония	0.8—0.94	19	19—28
СНГ, ВОСТОЧНАЯ			
ЕВРОПА	0.6	17.5	85
Россия	0.7	20	97
Венгрия	0.72	15	86
Колумбия	0.54	8.8	80
Египет	0.3	15	74
Индия	0.38	53	75
Индонезия	0.57	13	не определялось
Пакистан	0.5	9.8	не определялось
Сингапур	0.85	21	не определялось
Шри-Ланка	0.4	не определялось	не определялось

Примечание. Цифры в скобках указывают среднее значение.

сообщество, которое разлагает органическое вещество до биогаза, состоящего из метана (до 60%), углекислоты (до 40%), и большого числа других газообразных и летучих компонентов<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Willumsen H. C., Barian-Housen P., Jensen P. E. Toxic Components in Biogas Extracted from Landfills. Proc. of the 5th Int. Symp. on Anaerobic Digestion // Pergamon Press. 1988. P. 507—512; Минько О. И., Исидоров В. А., Измайлов А. Е. О составе летучих органических веществ свалочных газов // Докл. АН СССР. 1990. Т. 31. С. 134—197.

Активное газообразование начинается после закрытия объекта (или его части), обычно через несколько лет, когда сформировался сбалансированный метаногенез, и продолжается на протяжении 20—30 лет, постепенно затухая<sup>4</sup>.

Измерение и прогноз масштабов образования метана на объектах захоронения бытовых отходов — задача непростая. Согласно существующим

<sup>4</sup> Горбатюк О. В., Минько О. И., Лифшиц А. Б. Ферментеры геологического масштаба // Природа. 1989. № 9. С. 71—79.

оценкам, выход метана из отходов колеблется от 0.00034 до 0.068 м<sup>3</sup> на килограмм сухой массы, в то время как на основе расчетных данных<sup>5</sup> эта величина должна составлять 0.13. Эмиссию метана с поверхности свалки обычно рассчитывают, исходя из количества и состава погребенных отходов. Окисление метана в верхнем, аэрируемом слое свалочного грунта учитывают лишь в отдельных случаях<sup>6</sup>.

Тем не менее, даже исходя из таких оценок, важность объектов захоронения бытовых отходов как источника атмосферного метана очевидна (табл. 3).

Таблица 3

## Глобальная продукция метана из отходов

Источник	Количество CH <sub>4</sub> , Тг/год
Полигоны ТБО	22
Сточные воды	25
Навоз	25

Помимо загрязнения атмосферы эти объекты имеют и другие отрицательные стороны: они загрязняют приземный воздух, грунтовые воды и почвы, создают пожаро- и взрывоопасные ситуации. Кроме того, под свалки и полигоны изымаются значительные территории, рекультивация которых представляет чрезвычайно серьезную проблему. И, наконец, огромное количество сконцентрированных трудноразлагаемых веществ (полностью разлагается не более 30% органики), часто не свойственных природе, остается потом-

кам. Существенно ухудшает ситуацию совместное захоронение бытовых и промышленных отходов, используемое до последнего времени. Все это позволяет классифицировать объекты захоронения городских отходов как «химические бомбы замедленного действия».

В городах стран бывшего СССР ежегодно скапливается более 40 млн. т твердых бытовых отходов, крупные полигоны которых занимают более 140 тыс. га; для России эти цифры примерно вдвое ниже<sup>7</sup>. Помимо того, что отечественные полигоны ТБО довольно примитивны, значительная часть бытовых, строительных и промышленных отходов часто оказывается на несанкционированных свалках, причем в непосредственной близости от городов или даже внутри них (в Москве около 100 таких объектов). Только в последние годы при организации новых полигонов стали применять интенсивное уплотнение грунта дна, хотя дренажные системы для отвода фильтративных вод до сих пор нет и сбор биогаза не производится.

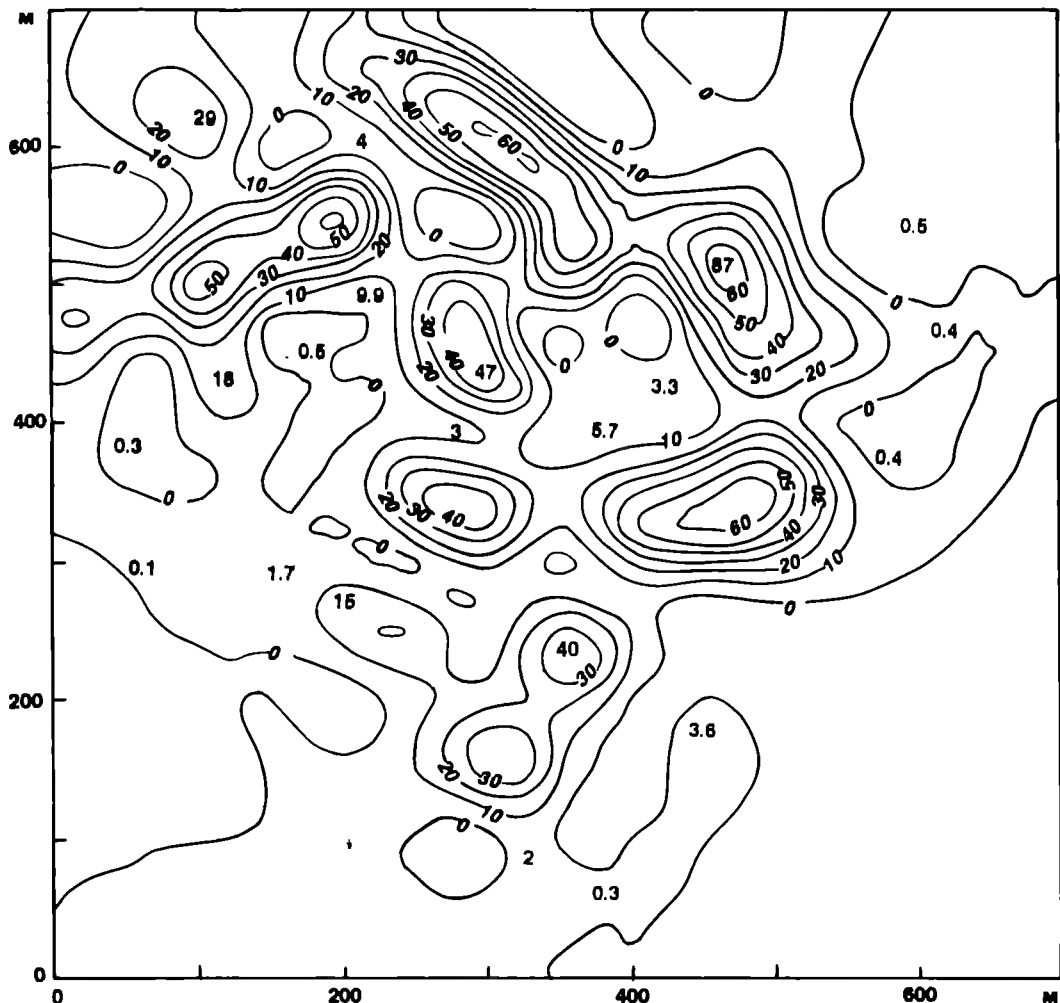
Потенциальными источниками атмосферного метана служат также иловые площадки, куда сливаются осадки городских сточных вод (в России за год их собирается более 20 млн. т), в которых много органики (до 55% от сухого вещества) и микробной биомассы. После предварительной обработки в метантенках осадки обогащаются анаэробными метаногенами и сливаются в чеки площадью 1—2 га и глубиной несколько метров. Метановое брожение в них происходит при пониженной температуре и продолжается десятилетиями. Только в Москве и Московской области иловые площадки занимают более 600 га. По мере подсыхания осадки частично вывозят на полигоны ТБО.

Итак, практика складирования от-

<sup>5</sup> Barlaz M. A., Ham R. K., Schaefer D. M. Methane Production from Municipal Refuse: a Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics // *Critical Rev. Environ. Control*. 1990. V. 19. Is. 6. P. 557—584.

<sup>6</sup> Mancillally R. L., McKay C. P. Methane-Oxidizing Bacteria in Sanitary Landfill // *Proc. First Symp. on Biotechnological Advances in Processing Municipal Wastes for Fuel and Chemicals*. August 1984, Minneapolis, Minnesota. 1985. P. 137—450; Whallen S. C., Reeburg W. S., Sanbeck K. A. Rapid Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil // *Appl. Environ. Microbiol.* 1990. V. 56. P. 3405—3411.

<sup>7</sup> Коцюрбенко О. Р., Ножевникова А. Н., Заварзин Г. А. Анаэробное разложение органического вещества психрофильными микроорганизмами // *Журн. общ. биологии*. 1992. Т. 53. № 2. С. 159—175.



**Концентрация метана (%) в почвенном воздухе на экспериментальной площадке (1200 м<sup>2</sup>) полигона «Кучино» на глубине 70–75 см.**

ходов определяет их гетерогенность, что в свою очередь обуславливает неравномерность распределения очагов генерации биогаза, мозаичную картину его миграции и выделения в атмосферу<sup>8</sup>. В толще свалочных отложений преобладают анаэробные микробиологические процессы, а микробиологичес-

кое окисление происходит лишь в самом верхнем аэрируемом слое грунта. Мощность аэробной зоны зависит от глубины проникновения кислорода воздуха в свалочный грунт (обычно она не более 1 м). Образовавшиеся в анаэробной зоне мощные потоки биогаза могут препятствовать диффузии кислорода.

#### ОБРАЗОВАНИЕ МЕТАНА В АНАЭРОБНОЙ ЗОНЕ

Мы (Институт микробиологии РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт ядерной геологии и геодезии, при участии фирмы «Гео-

<sup>8</sup> Минько О. И., Лифшиц А. Б. Экологические и геохимические характеристики свалок твердых бытовых отходов // Экология. 1992. № 2. С. 37–47.

полис») изучали образование и окисление метана на нескольких объектах захоронения отходов: на крупном полигоне ТБО «Кучино», небольшой несанкционированной свалке «Раменки», на иловых площадках люблинских полей фильтрации (табл. 4). Для крупных

Таблица 4

Характеристики объектов захоронения бытовых отходов и состав генерируемого биогаза

Параметр	Объект			
	Кучино	Раменки	Митино	Люблино
Площадь, га	60	6	50	50
Мощность отложений, м	8—20	2—5	10—20	4
Содержание Сорг, %	5—12	3—5	10—15	25—55
Состав биогаза, %:				
CH <sub>4</sub>	65—69	62—64	55—60	60
CO <sub>2</sub>	21—34	34—37	22—27	40
Максимальная скорость генерации метана, моль CH <sub>4</sub> /кг/сут	2.2	0.23		2.05
Максимальные потоки газов с поверхности, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> /ч:				
CH <sub>4</sub>	2×10 <sup>-3</sup>	следи	3×10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>
CO <sub>2</sub>	46×10 <sup>-4</sup>	6×10 <sup>-4</sup>		7×10 <sup>-4</sup>

Примечание. Максимальная скорость генерации метана приведена к 1 кг абсолютно сухого вещества.

полигонов ТБО характерна повышенная температура в анаэробной зоне: обычно она колеблется от 25 до 35°C, достигая иногда на приповерхностных участках 50—55°C. На полигоне «Кучино» максимальная активность метаногенеза в образцах грунта, взятых с глубин от 0.5 до 20 м, наблюдалась при 35—40°C, из чего следует, что метаногенное сообщество грунта здесь представлено мезофильной микрофлорой: метаносарцина, метанотрикс и водородные метаногены рода *Methanobacterium* и *Methanobrevibacterium*?

На свалке «Раменки» метаноген-

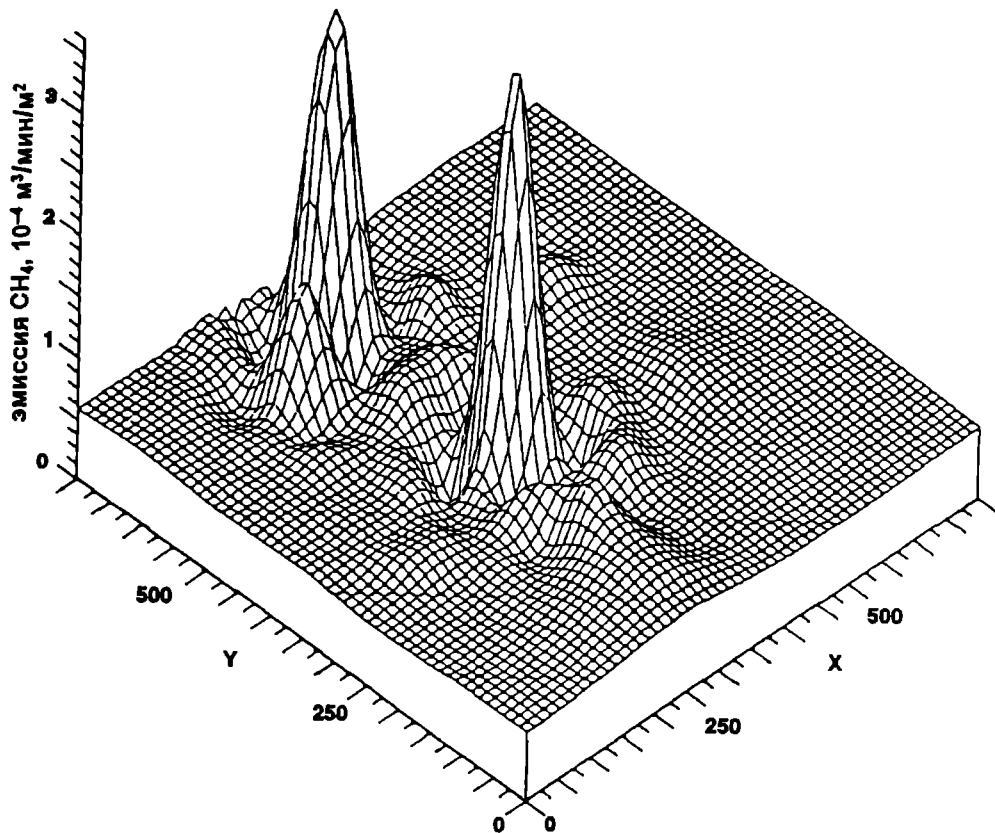
ная активность грунтов была в среднем на порядок ниже, чем на полигоне «Кучино»<sup>10</sup>. Это объясняется прежде всего низким содержанием органического вещества в захоронении свалки, а также более низкой температурой в толще свалочного тела. Мы зафиксировали образование метана в пробах грунта даже при 5—6°C.

Активный метаногенез при пониженной температуре отмечен на иловых площадках. Вследствие высокой влажности и относительно небольшой толщины слоя осадков в чеках температура в них сильно зависит от температуры воздуха, которая в наших условиях редко превышает 20°C. Скорость образования метана в отложениях иловых чеков возрастала с глубиной, достигая максимума на глубине ниже 60 см. Активный метаногенез при самосбраживании проб ила из чеков наблюдался при пониженной температуре, хотя ее повышение резко стимулировало этот процесс. Через два месяца в пробах ила метан, образовавшийся при 5°C, составлял 50% от количества, возникающего при 25°C. Процесс, безусловно, имеет биологический характер, так как добавление субстратов — предшественников метана (ацетата, метанола, водород-углекислотной смеси) — увеличивало скорость его образования при низкой температуре. Существование сбалансированного метаногенного сообщества, адаптированного к низкой температуре,

<sup>9</sup> Ножевникова А. Н., Елютина Н. Ю., Некрасова В. К., Труфанова Е. П. Образование метана микрофлорой грунта полигона твердых бытовых отходов // *Микробиология*. 1989. Т. 58. С. 859—863; Ножевникова А. Н., Лебедев В. С., Заварзин Г. А. и др. Образование, окисление и эмиссия биогаза на объектах захоронения бытовых отходов // *Журн. общ. биологии*. 1993.-Т. 4. С. 168—183; Zavarzin G. A., Nozhevnikova A. N. Landfills and Waste Deposits Producing Greenhouse Gases // *Current Opinion in Biotechnology*. 1993. V. 4, № 3. P. 356—362.

<sup>10</sup> Лебедев В. С., Горбатюк О. В., Иванов Д. В. и др. Биогеохимические процессы образования и окисления биогаза на свалках бытовых отходов // *Экология*. 1993. № 4. P. 323—334.





Потоки метана с поверхности полигона «Кучино». X, Y — расстояние, м.

подтверждается высокой скоростью синтеза метана при 5—10°C из целлюлозы, добавленной в качестве субстрата.

Эти результаты соответствуют данным, полученным нами ранее при изучении низкотемпературного метаногенеза в ряде природных и антропогенных экосистем. Активные психрофильные метаногенные микробные сообщества найдены и в тундровом болоте, осадках загрязненного северного водоема, осадках глубоководных озер, а при низкой температуре и в отходах животноводства<sup>11</sup>.

Таким образом, в местах захоронения городских бытовых отходов метан образуется активно даже в холодное время года. Однако, чтобы ответить на вопрос о количественной эмиссии метана и углекислоты с поверхности этих объектов, необходимо исследовать процессы, протекающие в верхних аэрируемых зонах

Коцюрбенко О. Р., Ножевникова А. Н., Калюжный С. В., Заварзин Г. А. Метановое сбраживание навоза крупного рогатого скота в психрофильных условиях // Микробиология. 1993. Т. 62. С. 615—627; Паршина С. Н., Ножевникова А. Н., Калюжный С. В. Разложение белковых субстратов микрофлорой свиного навоза при низкой температуре // Микробиология. 1993. Т. 62. С. 169—179; Nozhevnikova A. N., Kotsyurbenko O. R. Anaerobic digestion under psychrophilic conditions // Proc. 7th Int. Symp. on Anaerobic Digestion. January 1994, Cape Town. P. 90—101.

<sup>11</sup> Kotsyurbenko O. R., Nozhevnikova A. N., Zavarzin G. A. Methanogenic Degradation of Organic Matter at Low Temperature // Chemosphere. 1993. V. 27. № 9. P. 1745—1761;

объектов захоронения ТБО и осадков сточных вод.

### ОКИСЛЕНИЕ ГАЗОВ В ВЕРХНЕМ АЭРИРУЕМОМ СЛОЕ ОТЛОЖЕНИЙ

При изучении состава биогаза и потоков метана на разных глубинах и на поверхности полигонов ТБО обнаружено, что внутри свалочного грунта величина потоков значительно больше, чем с поверхности. Это происходит благодаря тому, что в верхнем аэрируемом слое свалочного грунта метан и другие восстановленные газы интенсивно окисляются микроорганизмами. При этом меняется изотопный состав углерода: метан обогащается тяжелым, а уголекислота легким изотопами. Зная изотопный состав глубинного и приповерхностного биогаза, можно определить степень его окисленности. Обычно кислород проникает в грунт не более, чем на 1 м. На границе анаэробной и аэробной зон свалочного тела формируется переходный слой, месторасположение и толщина которого зависят от интенсивности газовых потоков из анаэробной зоны.

Концентрация основных газов (метана, уголекислоты и азота) на глубине 70 см колеблется от 0 до максимума в зависимости от интенсивности окисления или от мощности глубинных потоков биогаза. В одних и тех же образцах грунта, взятых на глубине 50—90 см, присутствуют как метанообразующие, так и метаноокисляющие бактерии, количественное соотношение которых обусловлено окислительно-восстановительными условиями среды. Вверх по разрезу грунта на глубине 80—10 см концентрация метана резко уменьшается за счет его окисления. Характер изменения концентрации этого газа, его изотопный состав и активность метаноокисляющей микрофлоры хорошо совпадают.

В пробах иловых отложений по мере углубления содержание метана и уголекислоты увеличивалось, а кислорода уменьшалось (до полного исчезновения на глубине 60—70 см). Метаноокисляющая активность в пробах

из разных чеков и с разных глубин (при 25°C) менялась от 0.02—0.8 мМ метана/г абсолютно сухой массы в сутки. Однако температура верхних слоев грунта полигонов и свалок, так же как и иловых отложений, зависит от температуры окружающей среды. При понижении температуры до 5—6°C в образцах грунта аэробной зоны газоокисляющая активность была в 3—4 раза ниже, чем при 25°C, оставаясь, однако, достаточно высокой. Это говорит о том, что метан окисляется при пониженных температурах и в естественных условиях. Скорость его окисления микрофлорой иловых площадок при 10°C всего в два раза ниже, чем при 25°C.

В аэрируемой зоне свалочного тела присутствует множество метаноокисляющих бактерий (до  $10^{11}$  кл./г сырой массы), среди которых иммунологическим методом мы идентифицировали 11 видов, причем шесть из них росли при 6°C (табл. 5).

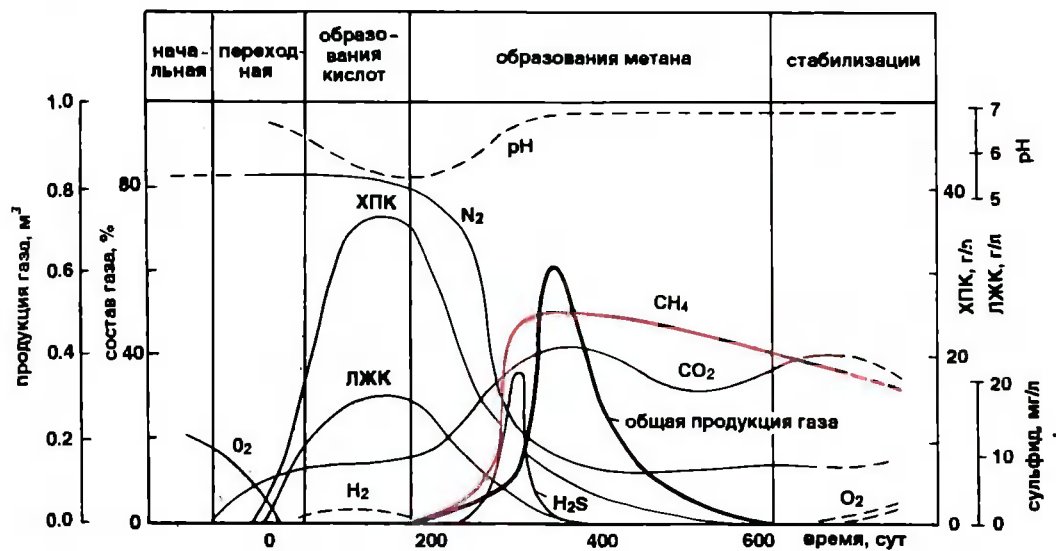
Таблица 5

Виды метанотрофных бактерий в накопительных культурах из грунта верхнего слоя полигона ТБО

Вид	Частота присутствия, %	Рост при 6°C, клетки
<i>Methylococcus capsulatus</i>	30	нет
<i>Methylovinas albus</i>	90	20—50
<i>Methylobacter bovis</i>	90	50—100
<i>Mtb. chroococcum</i>	100	более 200
<i>Mtb. capsulatus</i>	30	нет
<i>Methylosinus sporium</i>	60	5—20
<i>Ms. thrichosporium</i>	30	нет
<i>Methylocystis parvus</i>	100	50—100
<i>Mcs. minimus</i>	30	5—20
<i>Mcs. pyriformis</i>	40	нет
<i>Mcs. echinoides</i>	70	1—2

Примечания. Частота присутствия соответствует количеству образцов грунта, в которых вид был обнаружен. Рост при 6°C отражает количество бактериальных клеток в поле зрения микроскопа.

Таким образом, в верхнем аэрируемом слое свалочного грунта и в аэрируемой зоне иловых отложений активно развивается микрофлора, кото-



*Фазы процессов, происходящих в свалочном теле. ХПК — химическое потребление кислорода, ЛЖК — летучие жирные кислоты; состав газа указан в объемных процентах.*

рая формирует бактериальный фильтр, уменьшающий эмиссию метана и других восстановленных газов в атмосферу. На свалке «Раменки» и на иловых площадках летом весь образующийся в анаэробной зоне метан полностью окисляется до углекислоты, а на полигоне «Кучино» — около 50%.

#### ЭМИССИЯ ГАЗОВ С ПОВЕРХНОСТИ СВАЛОК В АТМОСФЕРУ

Итак, все изученные объекты захоронения бытовых отходов формируют над своей поверхностью газовые аномалии. Количество выделяемых газов зависит от концентрации и степени преобразования органического вещества грунтов, а также от активности микробного окисляющего фильтра. Потоки метана с поверхности «зрелого» полигона «Кучино» были почти на два порядка выше, чем с «молодого» полигона «Митино». На свалке «Раменки» метан в атмосферу почти не выделялся, поступала в основном углекислота, обогащенная легким изотопом

углерода. В приземном воздухе над иловыми площадками летом также отсутствовал метан, а содержание CO<sub>2</sub> составляло 0.08—0.12% при варьировании потоков последнего от 0 до 70 см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>/ч. Интенсивность газовых потоков на этих объектах распределялась по их поверхности крайне неравномерно.

На небольших свалках и иловых площадках, по крайней мере летом, аэробный микробный фильтр окисляет почти весь метан, образующийся в анаэробной зоне. Этим можно объяснить также гораздо меньшую эмиссию метана с небольших открытых свалок, многочисленных в развивающихся странах. Сегодня ничего не известно о сезонных колебаниях газовых потоков с поверхности объектов захоронения бытовых отходов. Весьма вероятно, что метан образуется в холодное время года даже подо льдом и снегом, в то время как его окисление подавлено. Это справедливо и для такого важнейшего природного источника метана, как болота.

По нашим оценкам, с учетом городского населения страны, а значит и количества отходов, скоростей образования и окисления метана в аэрируемой зоне и т. д., ежегодная эмиссия метана с объектов захоронения ТБО

Таблица 6

Эмиссия метана с полигонов ТБО различных регионов бывшего СССР

Регион	Количество метана, объем млрд. м <sup>3</sup> /год	Масса, Тг/год
Европейская часть России	1.10	0.79
Сибирь	0.27	0.19
Прибалтийские страны	0.07	0.05
Украина и Молдавия	0.52	0.37
Средняя Азия	0.32	0.23
Кавказ	0.12	0.09

Примечание. Расчет сделан А. Б. Лифшицем.

стран бывшего СССР составляет приблизительно 0.9—1.7 Тг метана (табл. 6).

#### БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ БОРЬБЫ СО СВАЛОЧНЫМИ ГАЗАМИ

Мусорные залежи планеты — один из важных источников атмосферного метана. Но поскольку объекты захоронения отходов — сооружения антропогенные, их можно контролировать, а значит, и активно вмешиваться в естественные (микробиологические) процессы, происходящие в них. И таких способов сегодня немало. Так, в Нидерландах планируют, что к 2000 г. совершенствование технологии захоронения отходов и уменьшение их количества снизит эмиссию метана на этих объектах более чем в два раза.

Самый эффективный способ сократить поток метана с существующих полигонов ТБО — это его откачка и использование. В ряде развитых стран ведется промышленная добыча свалочного биогаза. Уже к началу 90-х годов в мире работало более 150 коммерческих промышленных установок, из них 80 — в США. До недавнего времени в России работала лишь одна опытная установка по откачке биогаза на подмосковном полигоне «Кучино». Сейчас по совместному Российско-Нидерландскому проекту строится еще несколько таких станций. Разработан

метод определения газового потенциала и продуктивных зон закрытых объектов захоронения отходов с помощью скважинной шпуровой и приповерхностной газосъемки. Однако опыт показывает, что рациональнее создавать газоотводящие системы на вновь организуемых полигонах, а на старых закрытых это целесообразно только при очень больших запасах газа и в случае острой необходимости.

Весьма перспективно создание (или активация) на закрытых полигонах газоокислительного микробного био-фильтра. Неглубокий дренаж увеличивает объем аэрируемого слоя грунта и в конечном итоге благодаря интенсивному развитию метанотрофных бактерий уменьшает выделение метана в атмосферу. На небольших свалках лучше всего активировать аэробные окислительные процессы в верхнем слое с помощью насыпного рыхлого грунта, посадки травянистой или кустарниковой растительности с мощной корневой системой, закладки дренажных канав и т. д. Эффективен и так называемый биоремедиационный метод, когда в пересыпающие и загнивающие слои грунта вносят препараты газоокисляющих бактерий. Этот метод перспективен для рекультивации иловых площадок. Опыт работы на люблинских полях фильтрации показал, что тщательное соблюдение технологических норм рекультивации исключает локальное накопление метана.

Природа в ответ на деятельность человека, приведшую к образованию грандиозных скоплений органики, ответила развитием естественных микробиологических процессов. Активируя их, мы можем существенно сократить количество атмосферного метана и тем самым реально повлиять на возможные изменения климата планеты.

# Бактериальный цикл метана в морских экосистемах

В. Ф. Гальченко



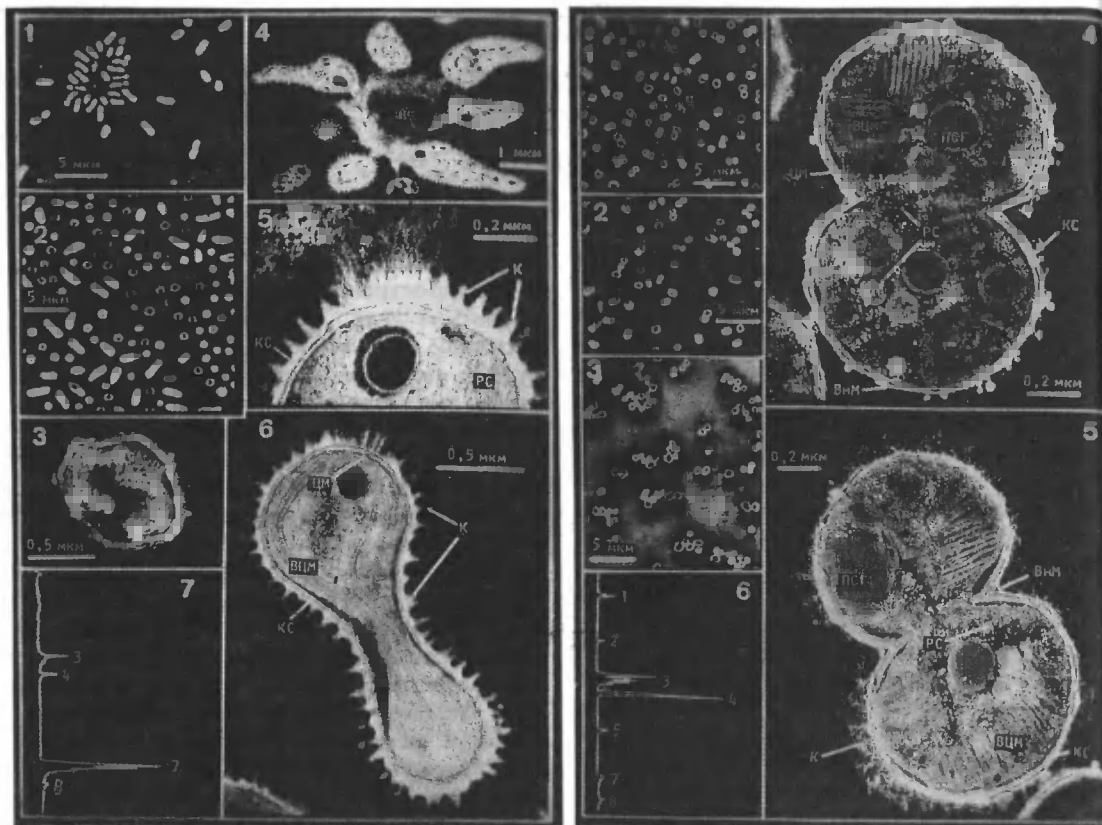
*Валерий Федорович Гальченко, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробной биогеохимии и биогеотехнологии Института микробиологии РАН. Участвовал в 12 экспедициях. Область научных интересов — биогеохимия цикла углерода и серы, бактериальные процессы метанокисления и хемосинтеза в экстремальных экосистемах глубоководных гидротерм рифтовых зон океана, антарктических озер, тундровых болот.*

**П**ОСКОЛЬКУ метан — наиболее распространенный на Земле органический газ, то окисляющие его бактерии — метанотрофы — встречаются в природе повсеместно. Метанотрофы составляют физиологически обособленную группу микроорганизмов семейства Methylococcaceae, включающего пять родов (*Methylococcus*, *Methylomonas*, *Methylobacter*, *Methylosinus*, *Methylocystis*) и около 20 видов. Все они — грамотрицательные палочки, вибриониды или кокки, многие подвижны, образуют покоящиеся формы, имеют сложную систему внутриклеточных мембран, строгие аэробы, используют только метан и (или) метанол в качестве источников углерода и энергии. Сегодня наиболее достоверная и обширная информация получена только об аэробных облигатных метанотрофах, не способных развиваться за счет сложных органических соединений<sup>1</sup>.

В подавляющем большинстве морских экосистем численность метанотрофов значительно ниже, чем в пресных водоемах. В донных отложениях Берингова, Охотского, Норвежского, Саргасова и других морей они не превышают нескольких тысяч клеток в 1 см<sup>3</sup> сырого ила. В первую очередь это связано с незначительным количеством метана. Однако в Черном море в верхних сантиметрах осадков шельфа

© Гальченко В. Ф. Бактериальный цикл метана в морских экосистемах.

<sup>1</sup> Galchenko V. F. Ecology of Methanotrophic Bacteria in Aquatic Ecosystems // Sov. Sci. Rev. F. Physiol. Gem. Biol. 1994. V. 6. P. 1—98; Galchenko V. F., Lein A. Yu., Ivanov M. V. Biological Sinks of Methane // Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. Dahlem Konferenzen. 1989. P. 59—71.



**Метанотрофные бактерии.** Слева — *Methylobacterium trichosporium*: фазово-контрастная (1, 2) и электронная микроскопия (3–6); 1, 4 — скопления клеток в виде розеток; 2, 3 — покоящиеся формы. Справа — *Methylococcus capsulatus*: фазово-контрастная (1–3) и электронная микроскопия (4, 5). ВЦМ — вакуолярная мембрана, КС — клеточная стенка, К — капсула, РС — рибосомы, ПСГ — полисахаридные гранулы, ВМ — внешняя мембрана. 6, 7 — хроматограммы эфиров жирных кислот, используемые для определения видов и родов метанотрофных бактерий.

их уже насчитывается до 0.5 млн./см<sup>3</sup>, на глубине 25 см — 1.3 млн./см<sup>3</sup>, в воде — не менее 10 тыс./см<sup>3</sup>. При этом метанотрофы в воде и осадках порой составляют до 10–20% от общей бактериальной численности, что весьма существенно для одной физиологической группы микроорганизмов.

Воды ближайшего окружения гидротермальных источников («черных ку-

рильщиков») в рифтовых зонах океана по своим микробиологическим характеристикам резко отличаются от обычной морской воды. В зонах смешения гидротермальных флюидов (растворов минеральных солей и газов, в основном сероводорода и метана) с океанической водой количество хемолитотрофных бактерий существенно больше по сравнению с фоновым. В пробах, отобранных нами вблизи от гидротерм в Тихом и Атлантическом океанах, общая численность бактерий часто достигала 10<sup>6</sup> кл./см<sup>3</sup> (в фоновых — не превышала нескольких тысяч).

В водной толще Черного и Охотского морей, непосредственно в районах просачивания метана и других углеводородов через осадки (в районах метановых сипов), количество метанотрофов на 1–2 порядка выше, чем в фоновых пробах, и составляет до трети от общей бактериальной численности.

Больше всего метанотрофов в сипе Охотского моря в 200—400 м от дна, т. е. в зоне наибольшего влияния метановых выбросов («факелов»).

### ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ

Поскольку цикл метана складывается из его образования и окисления, то чтобы оценить участие океана в глобальной эмиссии метана, необходимо знать соотношение этих бактериальных процессов. Наиболее точно определить активность микроорганизмов можно с помощью радиоактивных изотопов. Мы использовали меченые по углероду ( $^{14}\text{C}$ ) углекислоту, метанол, ацетат и метиламины для измерения интенсивностей метаногенеза и метан ( $^{14}\text{CH}_4$ ) для метаноокисления.

Хотя количественные значения этих двух противоположных процессов варьируют в широких пределах, при одновременном измерении их интенсивностей можно оценить разницу и рассчитать долю окисленного метана от новообразованного. В осадки и водную толщу помимо новообразуемого может поступать и захороненный метан, например, из газогидратных залежей и углеводородных сипов. Обычно в морских донных отложениях (мы исследовали Берингово, Охотское, Каспийское, Норвежское моря, разные районы Тихого и Атлантического океанов) интенсивности этих процессов наивысшие в верхних горизонтах осадков шельфов и склонов. Однако в Беринговом море как образование, так и окисление активнее в осадках глубоководной абиссальной зоны, причем доля окисленного метана от новообразованного здесь наименьшая. Полученные нами суммарные значения окисления и образования метана указывают на их тесное экологическое сопряжение (табл. 1).

Согласно нашим измерениям, в водную толщу может поступать до 98% новообразованного метана. Однако, несмотря на обычно более низкую интенсивность его окисления в воде по сравнению с осадками, за счет

Таблица 1

Образование и окисление метана в донных осадках Черного и Берингова морей

Донные осадки	Интенсивность, $\text{мкгС}/\text{м}^2/\text{сут}$		Доля окисленного метана от новообразованного, %
	образования	окисления	
<b>ЧЕРНОЕ МОРЕ</b>			
Шельф (0—200 м)	6—82	3—50	50—61
Склон (200—500 м)	10—66	1—60	10—91
Абиссаль (>500 м)	5—45	4—11	24—80.
<b>БЕРИНГОВО МОРЕ</b>			
Шельф (0—100 м)	4—14	1—4	20—29
Склон (100—500 м)	18—28	1—5	6—18
Абиссаль (>500 м)	116—302	3—11	2—4

огромной мощности водной толщи и, следовательно, бактериального фильтра метана, метанотрофы потребляют почти весь метан, и он не поступает в атмосферу из морских экосистем<sup>2</sup>.

### ОКИСЛЕНИЕ БЕЗ КИСЛОРОДА

В Черном море причинно-следственные связи в цикле метана оказались весьма сложными по сравнению с большинством морских водоемов. Его окисление обнаружено в воде и донных осадках как аэробной (шельф и часть склона), так и сероводородной (склон и абиссаль) зонах. Больше всего аэробных метанотрофов и соответственно выше интенсивность аэробного окисления метана в верхних 150—170 м. В поверхностных же слоях водной толщи количество метана и интенсивность его окисления не превышают фоновых значений, характерных для морей и океанов. В бескислородной глубоководной зоне Черного моря и донных осадках мы выявили анаэробное окисление этого газа, интенсивность которого соразмерима с таковой аэробного процесса.

<sup>2</sup> Заварзин Г. А. Бактерии и состав атмосферы. М., 1964.



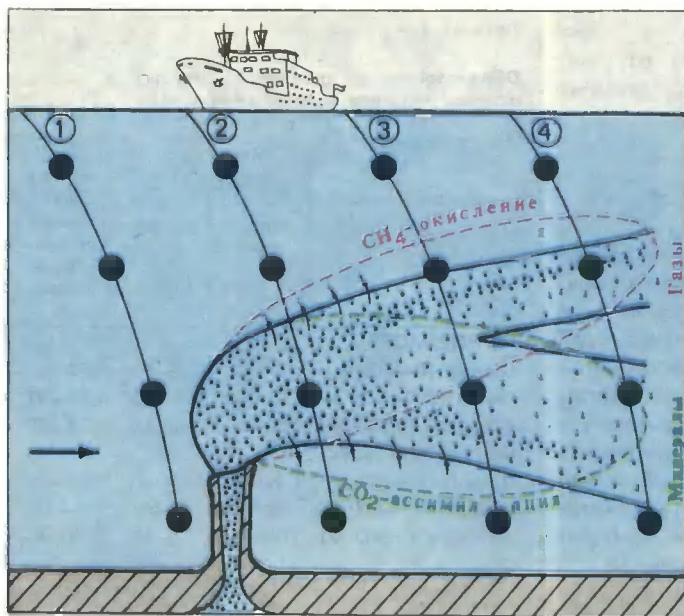
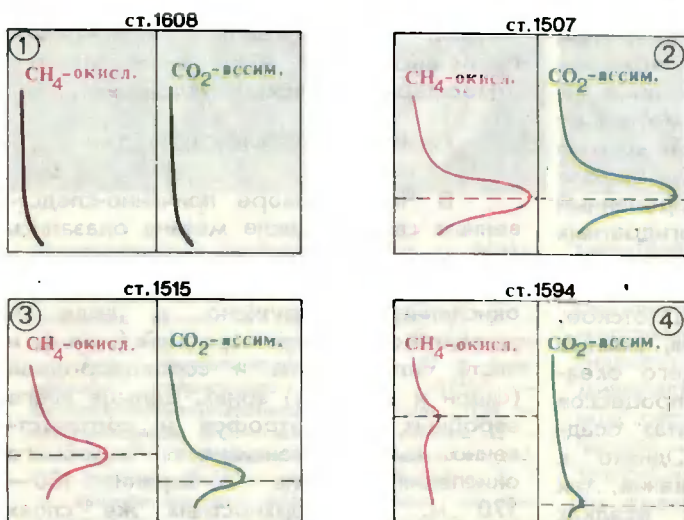


Схема дифференциации гидротермального шлейфа. По мере удаления от источника гидротермальный шлейф разделяется на «газовый» и «минеральный» потоки, что существенно отражается на их гидрохимических и биогеохимических (микробиологических) характеристиках. По результатам серийного зондирования (вверху: цифры в кружках — батиметрические серии; сплошные кружки — горизонты отбора проб воды) и определения интенсивностей бактериальных процессов окисления  $CH_4$  и ассимиляции  $CO_2$  (внизу) можно обнаружить и даже картировать участки с активными «черными курильщиками».



В последнее время микробиологи и геохимики активно обсуждают возможность окисления метана без участия молекулярного кислорода (обсуждают и химики: см., например, в этом номере статью «Моделирование биологического окисления метана», с. 60). Эксперименты с радиоактивными и стабильными изотопами однозначно доказали существование такого процесса, но химическая природа окислителя и

соответствующая группа микроорганизмов не известны до сих пор. Профили распределения сульфатов и метана в осадках позволяют предположить, что за его анаэробное окисление ответственны сульфатредуцирующие бактерии. Однако подтверждений этому пока нет. Напротив, полагают, что сульфатредукторы не могут участвовать в этом процессе, поскольку выход энергии при реакции сульфата с метаном не

обеспечивает биосинтез АТФ. Не подтвердились и отдельные сообщения об его анаэробном окислении денитрифицирующими и метанообразующими бактериями.

В поисках анаэробных окислителей мы провели эксперименты по изучению влияния различных соединений на образование и окисление метана, а также сульфатредукцию в анаэробных черноморских илах. Ингибитор аэробного метаноокисления — имидазол — несколько стимулировал его анаэробное окисление. Четыреххлористый углерод и бромэтансульфоновая кислота (ингибиторы метаногенеза) снижали интенсивность всех исследуемых процессов. Ингибитор сульфатредукции — молибдат натрия — несколько подавлял окисление метана (на 15%), хотя не столь значительно по сравнению с сульфатредукцией (на 62%). Молибдат, воздух, сульфат и ацетат стимулировали образование метана, тогда как восстановление сульфата до сероводорода активировалось серой, сульфатом и формиадом.

Большинство же испытанных соединений почти не меняло интенсивность анаэробного окисления метана до  $\text{CO}_2$ , но значительно подавляло включение его углерода в бактериальные клетки и экзометаболиты (внеклеточные продукты), в противоположность метанолу и формиаду, которые стимулировали такое включение. Глутаральдегид и нагревание ( $121^\circ\text{C}$  при 1 атм.) полностью подавляли исследуемые процессы, что свидетельствует об их бактериальной природе. Тем не менее, проведенные исследования не позволяют пока однозначно установить природу этого процесса. Аналогичные эксперименты других исследователей также не прояснили картину. По всей видимости, ни метаногены, ни сульфатредуцирующие бактерии в отдельности и напрямую не ответственны за анаэробное метаноокисление.

#### МЕТАНОВЫЙ ЭДЕМ

При высоком давлении и низкой температуре углеводородные газы об-

разуют так называемые газогидраты (клатраты) — снегоподобные структуры, в которых молекулы газа заключены в «кристаллическую решетку» воды (в  $1 \text{ м}^3$  идеального метанового газогидрата может находиться до  $170 \text{ м}^3$  газа). Морские газогидраты содержат около  $1.1 \times 10^{13}$  т углерода. Районы метановых силосов с газогидратами найдены в Мексиканском заливе, Тихом океане, Черном и Охотском морях. В последнем метановый сип расположен на глубине 800 м между о-вами Атласова и Парамушир Курильской дуги. На эхограммах компактные выходы метана прорисовываются в виде «факелов» высотой 250—300 м. Сейсмическим зондированием показано, что впадина, где обнаружены факелы, покрыта мощным слоем осадков (до 1.5 км). Газовая составляющая газогидратов, выявленных на глубине осадков около 2 м, на 95% представлена метаном. Наличие газогидратов, разгружающихся в донных осадках и водной толще благодаря вулканическому теплу (рядом расположен вулкан Алайд), создает в этом районе условия, благоприятные для развития метанотрофной микрофлоры.

В осадках сипа метан окисляется интенсивнее, чем в обычных, например, черноморских и беринговоморских донных отложениях. При этом интенсивности его образования и окисления в сипе Охотского моря соизмеримы. Но в некоторых случаях второй процесс преобладает над первым (табл. 2). Более того, наблюдается корреляция между долей окисленного метана и удаленностью донных отложений от выходов газовых факелов. Так, в газогидратсодержащих осадках, отобранных нами в непосредственной близости от «факела», интенсивность окисления метана превышала его образование (не путать с интенсивностью выхода захороненного метана газогидратов!) более чем в 4 раза.

Не менее активное окисление метана наблюдается и в водной толще над сипом. В пробах воды, взятых у «факелов» пробоотборниками подводных аппаратов «Гайсис» или придонным

Таблица 2

Образование и окисление метана в осадках и воде метанового сипа в Охотском море

Станция	Интенсивность, мкг/м <sup>2</sup> /сут		Доля окисленного метана от новообразованного, %
	образования	окисления	
ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ			
1391	251	60	24
1395	212	878	415
1404	746	386	52
ВОДНАЯ ТОЛЩА			
1392 "Rozeff"	—	67332	—

Примечания. Интенсивность рассчитана на мощность осадков 2 м или 800 м водной толщи; на станции 1395 осадки с газогидратами.

батометром с эхолотаторным наведением, на глубине 200—400 м от дна его окисление на 1—2 порядка превышало фоновые значения. Поэтому в результате активности метанотрофного «бактериального фильтра» концентрация метана в районе сипа, доходящая до нескольких миллилитров в литре придонной воды, в поверхностных горизонтах незначительна и близка фоновым величинам.

На свале глубин северо-западной части Черного моря также обнаружены метановые сипы с многочисленными карбонатными постройками. Здесь, как и в сипе Охотского моря, интенсивности метаноокисления выше, чем вне зоны влияния метановых выходов. Однако профили концентраций метана и интенсивностей его окисления в районе черноморского сипа не столь выражены, что говорит о более равномерном и широком распределении по площади небольших выходов этого газа.

Об активности метанотрофов в сипах свидетельствует также чрезвычайно легкий изотопный состав углерода карбонатных конкреций и корок ( $\delta^{13}\text{C} = -49\text{‰}$ ; величина  $\delta^{13}\text{C}$  употребляется для характеристики изотопного состава углерода и показывает (в ‰) разницу в содержании изотопа  $^{13}\text{C}$  в анализируемом образце и в стандарте), обнаруженных в газогидратных осадках Охотского моря<sup>3</sup>. Метановое

происхождение этих карбонатов не вызывает сомнений, поскольку изотопный состав их углерода близок таковому метана ( $\delta^{13}\text{C} = -54.6\text{‰}$ ). Метановые строматолиты (постройки) в районе черноморских сипов состояли из арагонита с  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-33$  до  $-40\text{‰}$ , в то время как  $\delta^{13}\text{C}$  карбоната морской воды колебалась от  $-7$  до  $-12\text{‰}$ . Органическое вещество слизистых обрастаний (бактериальных матов) строматолитов, в составе которых найдены метаноокисляющие бактерии родов *Methylomonas* и *Methylobacter* и, вероятно, метанообразующие микроорганизмы рода *Methanotrix*, отличалось крайне легким изотопным составом углерода:  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-76$  до  $-84\text{‰}$ .

На основании наших наблюдений можно полагать, что образование карбонатных построек непосредственно связано с бактериальными матами. Сначала на поверхности донных осадков, через которые просачивается глубинный метан, из метанотрофных и сопутствующих бактерий формируется бактериальная пленка обрастания (мат). Большая часть метана окисляется до  $\text{CO}_2$ , который в морской воде осаждается в виде карбонатных включений («карбонатных жемчужин») в бактериальном мате.

По мере роста бактериальный мат утолщается, карбонатные включения увеличиваются и в конце концов сливаются, образуя сплошную корку. Со временем на месте карбонатных корок формируются довольно мощные плиты (диаметром 1—3 м), перекрывающие выход метана из осадков. Эти плиты могут погружаться в осадки или вымываться из них придонными течениями. В центре многих плит остается единственный канал, через который просачивается метан и на месте которого образуются карбонатные структуры, иногда причудливой формы.

<sup>3</sup> Леин А. Ю., Гальченко В. Ф., Покровский Б. Г. и др. Морские карбонатные конкреции как результат процессов микробного окисления газогидратного метана в Охотском море // Геохимия. 1989. Т. 10. С. 1396—1406.

Таблица 3

Численность бактерий, интенсивности окисления  $\text{CH}_4$  и ассимиляции  $\text{CO}_2$  в воде гидротермальных районов Гуаймас и Хуан-де-Фука

Место отбора проб	Концентрация $\text{CH}_4$ , мкл/л	Интенсивность, мг С/л/сут		Численность бактерий, кл./мл			
		окисления $\text{CH}_4$	ассимиляции $\text{CO}_2$	метано-трофных	тионовых	нитрифицирующих	общая
Более 100 м от гидротермы							
У дна	1.8	2.7	19	$2 \cdot 10^3$	0	0	$8 \cdot 10^4$
— " —	1.9	1.6	12	$6 \cdot 10^3$	$10^2$	$10^2$	$3 \cdot 10^4$
160 м над дном	0.2	1.9	14	$2 \cdot 10^3$	$10^2$	$10^2$	$3 \cdot 10^4$
Менее 10 м от гидротермы							
Гидротерма, 100°C	166	31	10431	$2 \cdot 10^4$	$10^5$	$10^4$	$5 \cdot 10^5$
— " — 10°C	6222	68404	12069	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$2 \cdot 10^5$
— " — 3°C	8462	54138	3553	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$3 \cdot 10^5$

Процесс этот весьма длительный: возраст исследованной нами карбонатной постройки составляет не менее 5 тыс. лет<sup>4</sup>.

#### МЕТАНОТРОФЫ У «ЧЕРНЫХ КУРИЛЬЩИКОВ»

Через гидротермы («черные курильщики») в океан поступает значительное количество соединений серы (главным образом сероводород), железа, марганца, азота, а также метана, водорода и оксида углерода. Попадая в кислородсодержащую океаническую воду, эти соединения создают благоприятные условия для аэробных хемоавтотрофных и метанотрофных бактерий, которые служат основным источником питания животных гидротермальных экосистем.

В 1986—1990 гг. в экспедициях научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» с подводными обитаемыми аппаратами «Пайсис» и «Мир» мы обследовали районы гидротермальной активности спрединговых зон Тихого (Хуан-де-Фука, Гуаймас,

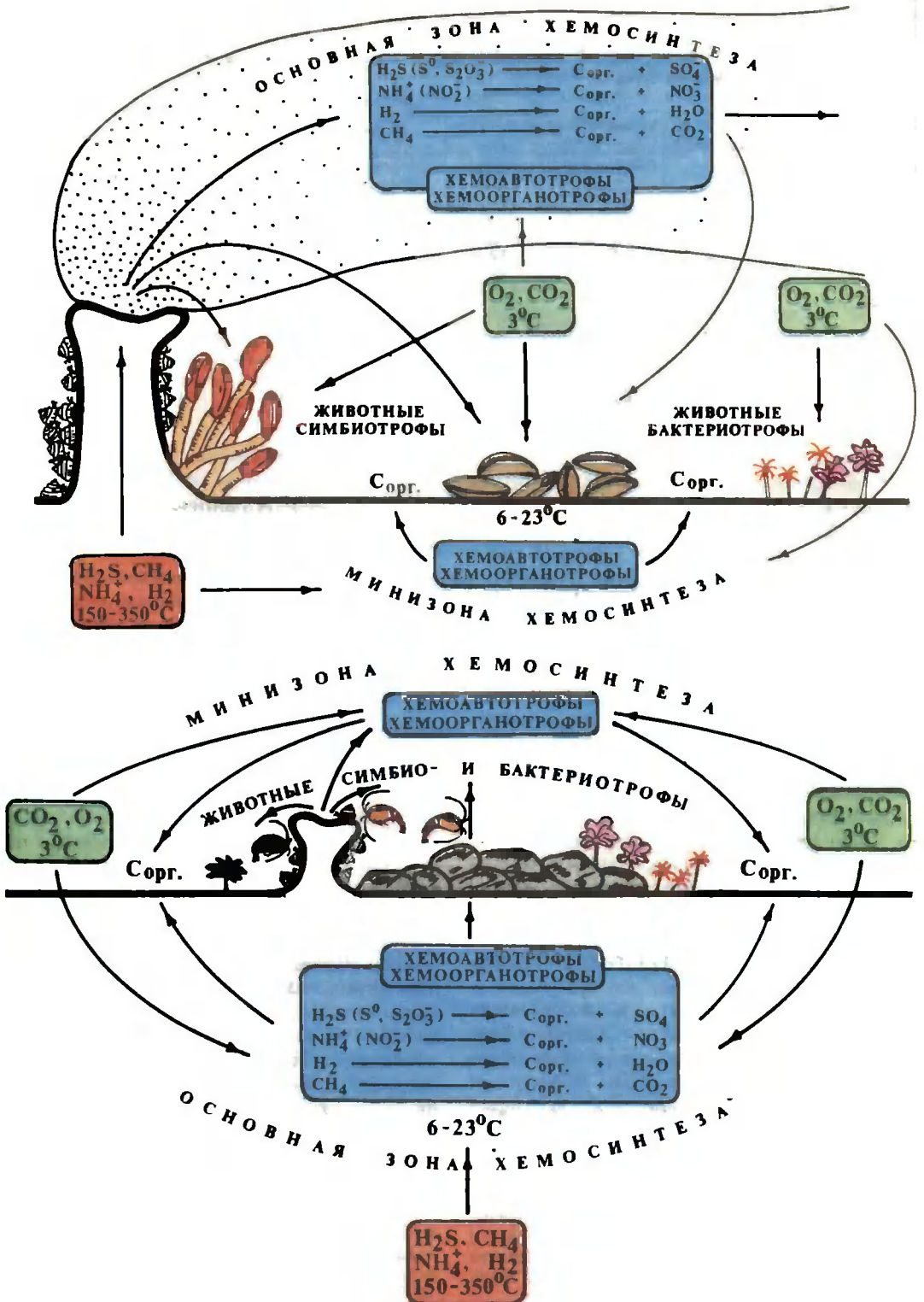
Манус, Лау) и Атлантического (Трансатлантический геотраверс — ТАГ, Кейн, Снэйк Пит) океанов.

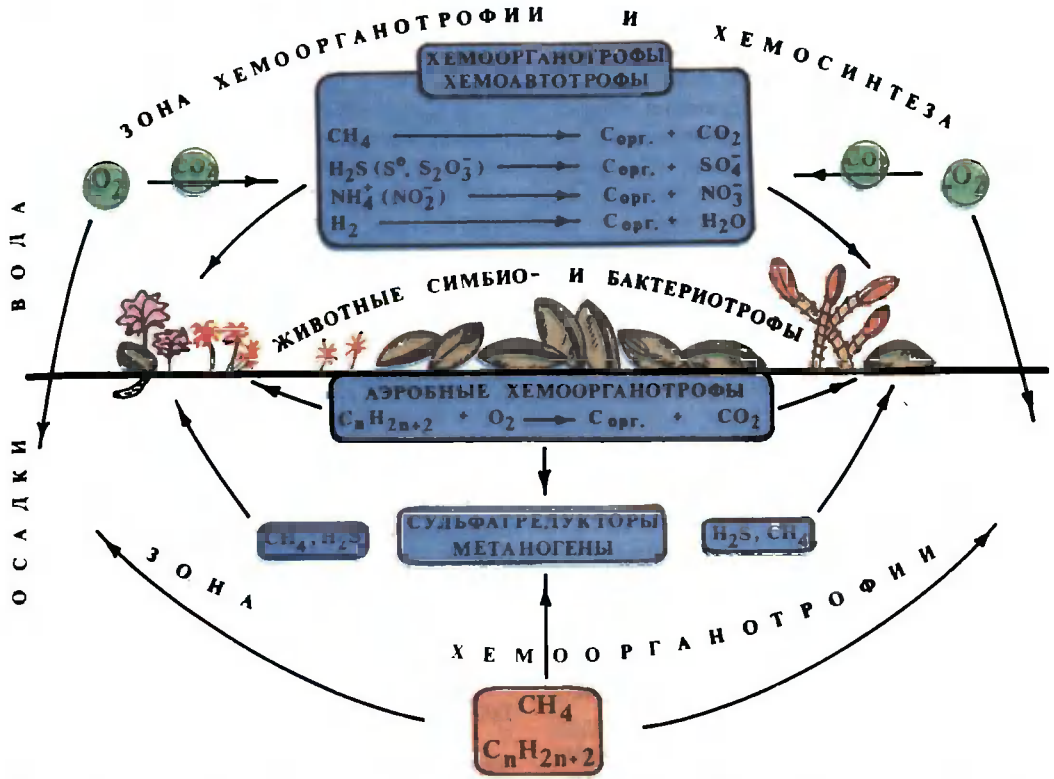
По микробиологическим характеристикам воды из гидротерм и ближайшего их окружения резко отличаются от обычной океанической воды. Численность метанотрофных и хемолитотрофных бактерий в пробах, отобранных на расстоянии более чем 100 м от гидротерм, не превышает  $10^2$ — $10^3$  кл./мл, а в непосредственной близости от них достигает  $10^6$ . Интенсивности бактериальных процессов в этой зоне также на 2—3 порядка выше, по сравнению с фоновыми (табл. 3).

В большинстве гидротермальных районов мы обнаружили аномалии численности микроорганизмов и их биогеохимической активности<sup>5</sup>. Наиболее четко это проявляется в ближайших окрестностях гидротерм, где в пределах 5—10 м по вертикали отмечается множество метанотрофных, тионовых и нитрифицирующих бактерий и соответственно интенсивная ассимиляция  $\text{CO}_2$  и окисление  $\text{CH}_4$ . По мере удаления от зоны влияния гидротерм максимумы

<sup>4</sup> Иванов М. В., Поликарпов Г. Г., Леин А. Ю. и др. Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовыделений Черного моря // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 5. С. 1235—1240.

<sup>5</sup> Гальченко В. Ф., Леин А. Ю., Иванов М. В. Микробиологические и биогеохимические процессы в водной толще океана как показатели активности подводных гидротерм // Геохимия. 1989. Т. 8. С. 1075—1088.





Биогеоценозы гидротермальных экосистем (слева сверху — «горячие» гидротермы, слева внизу — «теплые» гидротермы) и метановых источников (справа). Несмотря на различные физико-химические параметры, гидротермальные «оазисы» и метановые источники объединяет единая энерготрофическая стратегия существующих здесь биогеоценозов — хемоавтометанотрофия. В рамках приведены реакции микробиологических процессов, осуществляемых хемоавтотрофными и метанотрофными бактериями, биогеохимическая роль которых однозначно установлена в исследованных районах океана.

этих процессов зафиксированы в разных горизонтах водной толщи.

Влияние гидротермальных флюидов не ограничивается только придонными водами — аналогичная ситуация прослеживается в десятках и сотнях метров от гидротерм. Высота и расстояние, на которые перемещается шлейф газов и взвешенных частиц, зависят от скорости истечения горячих растворов и придонных течений в районе гидротерм. В условиях субгоризонтального перемещения газовые и минеральные компоненты гидротер-

мального шлейфа ведут себя по-разному. Ионы металлов, мелкодисперсные сульфиды и сероводород взаимодействуют с компонентами морской воды и кислородом. При этом образуются различные нерастворимые соединения, такие как элементарная сера, сульфиды и оксиды металлов, которые выпадают из шлейфа и оседают на дно. Гидротермальные растворы опреснены и более насыщены газами, что приводит к их вертикальному перемещению. По мере удаления от гидротермы шлейф распадается на два потока — «газовый» и «минеральный».

Различный гидрохимический состав и экологическая обстановка в этих потоках сказываются на распределении физиологических групп микроорганизмов по вертикали: в «минеральном» потоке больше хемоавтотрофов — тионовых, нитрифицирующих, железозамещающих и марганецоксилирующих бактерий; в «газовом» — метанотрофных. Поскольку сероводород и метан — основные компоненты гидротермальных раство-

ров, то в этой зоне преобладают микробиологические и биогеохимические процессы, связанные с их окислением. В результате разделения гидротермального шлейфа сероводород и метан, а вместе с ними и процессы ассимиляции  $\text{CO}_2$  и окисления  $\text{CH}_4$  оказываются в разных потоках.

Очевидно, что предложенная модель не свободна от упрощений. Гидротермы часто располагаются довольно близко друг к другу, а шлейфы могут распространяться на значительные расстояния и смешиваться. Скорее всего на гидрохимическую и экологическую обстановку влияют несколько гидротерм, а не одиночные «черные курильщики».

### СИМБИОТРОФНЫЙ ЗАПОВЕДНИК

Сенсацией 80-х годов стало обнаружение бактерий в трофосомах (специальный орган питания) гигантских вестиментифер и жабрах двустворчатых моллюсков, обитающих вблизи гидротермальных построек, и открытие нового типа трофических связей, основанного исключительно на продуктах бактериального хемосинтеза. Наличие ключевых ферментов автотрофной ассимиляции  $\text{CO}_2$  и окисления серных соединений, эксперименты с радиоизотопами однозначно доказывают существование тесных симбиотических связей тионовых бактерий с некоторыми беспозвоночными гидротермальных районов.

Поскольку во флюидах гидротерм наряду с сероводородом присутствует и заметное количество метана, предполагали, что метанотрофные бактерии играют определенную роль в питании животных гидротермальных экосистем<sup>6</sup>. Такое предположение подтверждается также стабильноизотопным составом углерода тканей гидротермальных животных, поскольку низкие величины  $\delta^{13}\text{C}$

логичнее всего объяснить включением в ткани животных изотопнолегкого (по сравнению с  $\text{CO}_2$ ) углерода метана.

Симбиотические связи выявлены между метанотрофами и двустворчатыми моллюсками из Мексиканского залива — обитателями метановых сипов, и погонофорами *Siboglinum roseidoni* из пролива Скагеррак, живущими в донных осадках с восстановительной средой. У обитателей гидротерм метанотрофные бактерии мы нашли пока только в жабрах гастропод Марианской срединной зоны.

В экспедициях (1986—1990 гг.) в районы метанового сипа в Охотском море и гидротерм Хуан-де-Фука, Гуаймас, Манус и ТАГ мы исследовали различных беспозвоночных животных на предмет симбиотрофных связей с метанооксиляющими и хемоавтотрофными бактериями (табл. 4). Ассимиляция

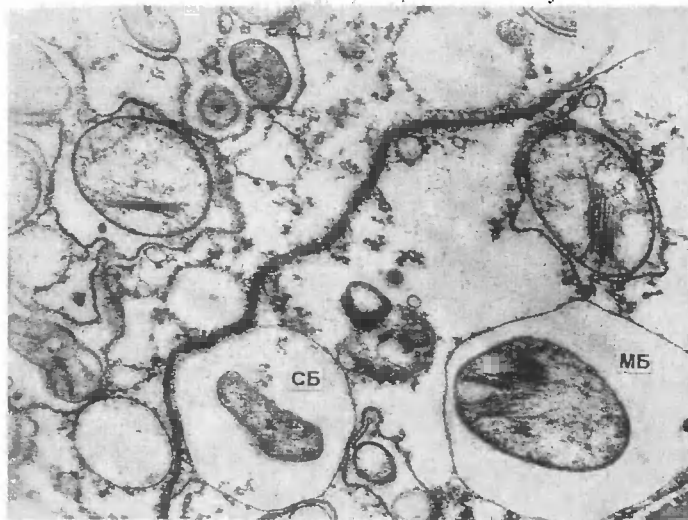
Таблица 4

Интенсивности ассимиляции  $\text{CO}_2$  и окисления  $\text{CH}_4$  в органах некоторых гидротермальных животных

Станция (район)	Образец	Интенсивность, мкгС/г белка/ч	
		ассимиляции $\text{CO}_2$	окисления $\text{CH}_4$
1619 (Гуаймас)	<i>Sonchocele</i> sp.		
	Жабры	9	24
	Мантия	2	4
	Желудок	4	8
1506 (Хуан-де-Фука)	<i>Calyplogena</i> sp.		
	Жабры	16	24
	Мантия	5	4
	Желудок	1	2
	Нога	2	1
1522 (Гуаймас)	<i>Riftia pachyptila</i>		
	Трофосома	21	—
	Жабры	5	—
	Трубка	3	—
1902 (ТАГ)	<i>Rimicaris exoculata</i>		
	I (Жаброножка)	4	—
	II (Жабры, мышца, желудок)	80	—
2255 (Манус)	<i>Oligaconcha tufari</i>		
	Жабры	119	118

<sup>6</sup> Lonsdale P. F. Clustering of suspension-feeding macrobenthos near Abyssal hydrothermal Vents at Oceanic Spreading Centers // Deep-Sea Researches. 1977. V. 24. P. 857—863.





Ультратонкий срез жаберной ткани брюхоногого моллюска (гастропода) *Oligaconcha tufari* с бактериями-симбионтами. В жабрах гастропод обнаружены два типа бактериальных симбионтов: со стенками внутриклеточных мембран (метабоксилирующие бактерии, МБ) и без сложных мембранных структур (вероятно, тионовые бактерии, окисляющие сероводород, СБ). Бактерии, окруженные мембраной животной клетки, формируют так называемые «бактериоциты» — «фабрики» бактериальной органики, используемой животным для питания. Моллюск же в свою очередь поставляет из окружающей среды метанотрофам метан, тионовым бактериям — сероводород и  $\text{CO}_2$ , а обоим типам бактерий — кислород.

$\text{CO}_2$  обнаружена в трофосомах вестиментифер, жабрах гастропод и двустворчатых моллюсков, а также в одном из образцов креветок. Метанокисление установлено только в жабрах двустворчатых моллюсков и гастропод, при этом доля углерода, включенного в жабры, достигала 54% от углерода всего окисленного метана.

Двустворчатые моллюски Охотского моря обитают на поверхности осадков, содержащих газогидраты, т. е. насыщенных метаном. Сходные моллюски из гидротермальных районов также приурочены к осадкам, где интенсивность метаногенеза и сульфатредукции значительна. Очевидно, что моллюски находятся в тесном симбиозе и с метанотрофными, и тионовыми бактериями.

Поскольку ключевые ферменты окисления  $\text{CH}_4$  (метанмонооксигеназа) и ассимиляции  $\text{CO}_2$  (рибулозодифосфаткарбоксилаза) выявлены только у бактерий (за исключением последнего фермента у растений), то в тканях животных эти процессы могут осуществляться только (!) благодаря функционированию бактерий. При электронной микроскопии ультратонких срезов жабр двустворчатых моллюсков и трофосом

Таблица 5

Изотопный состав углерода тканей гидротермальных животных

Станция	Образец	Величина $\delta^{13}\text{C}$ (‰/о)
1506	<i>Ridgeia piscesae</i>	
Хуан-де-Фука	Трофосома	-14,4
	Трубка	-14,7
	Весь организм	-14,6
1522	<i>Riftia pachyptila</i>	
Гуаймас	Трофосома	-13,3 (-15,9)
	Трубка	-13,8 (-16,2)
	Жабры	-14,6
	Кровь	-14,0
1902	<i>Rimicaris exoculata</i>	
ТАГ	Весь организм	-11,5 (-11,5)
1524	<i>Calyptogenia</i> sp.	
Гуаймас	Нога	-36,9 (-35,7)
	Внутренности	-33,8 (-36,1)
	Мантия	-35,2
	Жабры	-36,6
2255	<i>Oligaconcha tufari</i>	
Манус	Нога	-40,6 (-40,6)
	Гонады	-38,6 (-38,3)
	Мантия	-38,3 (-35,1)
	Жабры	-38,8 (-39,1)

Примечание. В скобках приведены результаты повторных измерений, выполненных на образцах других экземпляров животных.



вестиментифер найдены многочисленные бактериальные клетки. Из жабр двустворчатых моллюсков выделены как тионовые, так и метанотрофные микроорганизмы, тогда как из трофосом вестиментифер — только тионовые. В жабрах гастроподы *Olgasconcha tufarí* на электронных микрофотографиях одновременно выявляются метанотрофные (имеют внутриклеточные мембраны) и тионовые бактерии.

Анализ изотопного состава показал, что значение  $\delta^{13}\text{C}$  в тканях вестиментифер и креветок варьирует от  $-11$  до  $-17\text{‰}$  (табл. 5). Органический углерод моллюсков более обле-

чен: у двустворчатых значение  $\delta^{13}\text{C}$  колеблется от  $-31.7$  до  $-36.2\text{‰}$ , а у брюхоногих (гастропод) — от  $-35.1$  до  $-40.6\text{‰}$ . Обнаруженное нами окисление метана в жабрах тех и других моллюсков говорит о синтезе основной части органических веществ животных из производных метана при его бактериальном (симбиотрофном в том числе) окислении. Моллюски наследуют изотопный состав окисляемого метана,  $\delta^{13}\text{C}$  которого в районе Гуаймас составляет  $-45\text{‰}$ . Некоторое утяжеление изотопного состава углерода тканей моллюсков по сравнению с метаном можно объяснить вовлечением

*Голубые бактериальные маты и брюхоногие моллюски (гастроподы) у основания «теплой» гидротермы с просачивающимися гидротермальными флюидами.*



*Черные (метанотрофные) и коричневые (автотрофные) гастроподы на поверхности «теплой» гидротермальной постройки.*

*Фотографии сделаны экипажем подводного обитаемого аппарата «Мир» во время экспедиции научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» в гидротермальном районе Манус Тихого океана, 1990 г.*

в метаболизм беспозвоночных более тяжелого изотопа углерода углекислоты.

В пространственной структуре гидротермальных экосистем четко выделяются две фаунистические ассоциации, различающиеся по своему составу и местоположению относительно гидротерм. Первая ассоциация, обитающая в 2—5 м от источника, характеризуется массовым развитием вестиментифер и связанной с ними фауны. С этой ассоциацией сходно сообщество креветок в районе ТАГ и брюхоногих моллюсков у «черных курильщиков» в районе Манус. На некотором удалении

от гидротерм располагается другая ассоциация, ведущую роль в которой играют двустворчатые моллюски. Для обоих сообществ характерно преобладание (80% и более) симбиотрофных животных.

Несмотря на различный видовой состав фауны и биотопическую обстановку гидротермальных районов, распределение животных и экологическая структура в этих ассоциациях в целом сходны, что позволяет рассматривать их как конвергентные сообщества. Что касается моллюсков, то они часто встречаются не в непосредственной близости от гидротерм, а на поверх-

ности осадков со значительным количеством метана и восстановленных соединений серы, как образуемых здесь, так и поступающих с просачивающимися гидротермальными растворами в районах теплых гидротерм. Аналогичная ситуация наблюдается и в ассоциациях двусторчатых моллюсков метановых сипов. Все эти сообщества входят в состав биогеоценозов, основанных на бактериальном хемосинтезе и (или) метаноокислении (биогеоценозы горячих гидротерм, теплых гидротерм и метановых сипов), где возможно существование нескольких трофических стратегий и подстратегий — «тиобиос», «метанобиос» и «метанотиобиос».

#### МЕТАНОТРОФЫ В ГЛОБАЛЬНОМ ЦИКЛЕ МЕТАНА

Центральное место в цикле метана занимает процесс бактериального метанобразования. В восстановленной среде морских донных осадков, а в некоторых случаях и водной толще (яркий тому пример — Черное море), микробиологически образуется огромное количество метана. Не менее мощными источниками являются метановые газогидраты в морских осадках, морские метановые сипы, «черные курильщики» в рифтовых зонах океана. Тем не менее только часть метана поступает в атмосферу, поскольку значительное его количество окисляется микробиологически в осадках и водной толще морей и океанов.

Несомненно метаноокисление — ключевой биогеохимический процесс, регулирующий поток метана. В свете последних данных становится очевидным, что популяции метанотрофных бактерий образуют мощный биофильтр на пути метана в атмосферу. Значительная доля новообразованного метана окисляется непосредственно в донных отложениях. И все же большую его часть метанотрофы окисляют в воде морей и океанов — в первую очередь благодаря огромным мощностям водной толщи и, следовательно, обширной по биомассе популяции аэробных ме-

таноокисляющих бактерий, даже если интенсивности метаноокисления в воде на порядки меньше, чем в осадках.

Пока трудно точно оценить масштаб метановых потоков в водную толщу морей, однако несомненно, что они весьма существенны. И тем не менее, судя по профилям концентрации, количества метана в приповерхностных горизонтах морей чрезвычайно малы по сравнению с местами их образования или захоронения. Мы попытались проанализировать полученные данные и оценить участие метанообразования и метаноокисления, а также потоков захороненного метана в общей эмиссии этого газа из морских экосистем. На основании данных, полученных для конкретных водоемов, рассчитаны вероятностные метановые потоки в атмосферу со всего зеркала океанов. Оказалось, что они колеблются в пределах 2—11 Тг/год. Однако необходимо отметить, что эти расчеты отражают не истинный поток метана из морских водоемов, а лишь возможные его значения. Для сравнения: рассчитанный специалистами глобальный поток метана в атмосферу Земли составляет 500—800 Тг/год.

Таким образом, комплекс проведенных нами исследований однозначно свидетельствует, что в настоящее время Мировой океан не является существенным поставщиком метана в атмосферу Земли. Следует особо подчеркнуть, что это обусловлено не маломощностью метаногенеза, который, как показывают исследования, весьма существен в соответствующих морских экотопах. Однако в современных морских экосистемах практически весь поступающий в гидросферу или образующийся в ней метан окисляется аэробными и анаэробными популяциями метанотрофов, которые представляют собой мощный бактериальный фильтр на пути метана в атмосферу из мест его образования или захоронения.

## Климатология

### Торфяники и климат

Л. Клингер (L. Klinger; Национальный центр атмосферных исследований США, Боулдер, штат Колорадо) считает, что важнейшую роль в климатических изменениях на планете играют не влажные тропические леса, а торфяники и болота, которые представляют собой крупнейшие естественные хранилища углерода. Они содержат от 500 до 1 тыс. Гт углерода, что превышает его количество во всей древесной массе мира и примерно совпадает с количеством углерода в земной атмосфере, оцениваемым в 700 Гт.

Торфяные болота, раскинувшиеся от тундры до тропиков, занимают около 5 млн. км<sup>2</sup>. На о-вах Суматра и Калимантан в Индонезии такие болота, например, накопили за 8 тыс. лет существования 20-метровый слой торфа; 1 га их содержит в себе в 100 раз больше углерода, чем окружающий тропический лес равной площади.

Согласно принятой теории, все растительные сообщества развиваются естественным образом по пути постепенного превращения в стабильную форму — лес, а торфяники представляют собой лишь промежуточный случайный этап этого процесса. Однако, по данным Клингера, в действительнос-

ти «конечным пунктом» такой эволюции в большинстве случаев является торфяное болото. Его исследования на юго-востоке Аляски, где в течение последних столетий быстро отступают ледники, показали, что травянистые сообщества замещаются лесом, который постепенно становится чахлым и низкорослым и в конце концов уступает место мхусфагнуму (частое зрелище здесь — огромные пни, захороненные во мху). Такой же процесс автор наблюдал и в северо-восточной Канаде, вокруг Гудзонова залива, а по данным других авторов подобное происходит повсеместно от севера Великобритании до Сибири, а также в Новой Зеландии.

Возникнув, болотные сообщества оказываются стабильными и исчезают лишь под влиянием сильных внешних воздействий, как антропогенная активность, постоянное подтопление, пожары, изменение климата и т. д.

По заключению Клингера, наиболее развитые растительные сообщества должны состоять из самых примитивных видов — в торфяниках прослеживается переход от покрытосеменных растений ко мхам.

Автор этой гипотезы подчеркивает, что торфяные болота могли служить биологическим механизмом, приведшим планету в состояние оледенения, а затем выведшим из него. Изме-

нения в занимаемых болотами площадях должны вызывать колебания в содержании атмосферного углерода (СО<sub>2</sub>), достигающие 20%. Глобальные похолодания ведут к разрастанию торфяников за счет песков. В течение тысячелетий торфяные болота изымают из атмосферы углерод и накапливают его, снижая уровень естественного парникового эффекта и способствуя понижению температуры. Однако за этим следует рост оледенения, в том числе и на месте болот. Так происходят циклические колебания климата.

Новую гипотезу поддерживает ведущий английский специалист по экологии увлажненных территорий Р. Климо (R. Clymo; Вестфилдский колледж им. Королевы Мэри, Лондон). Он указывает, что на дне торфяников в Пеннинских горах (Великобритания) можно найти остатки березового леса, произраставшего 5 тыс. лет назад и впоследствии перекрытого мхами.

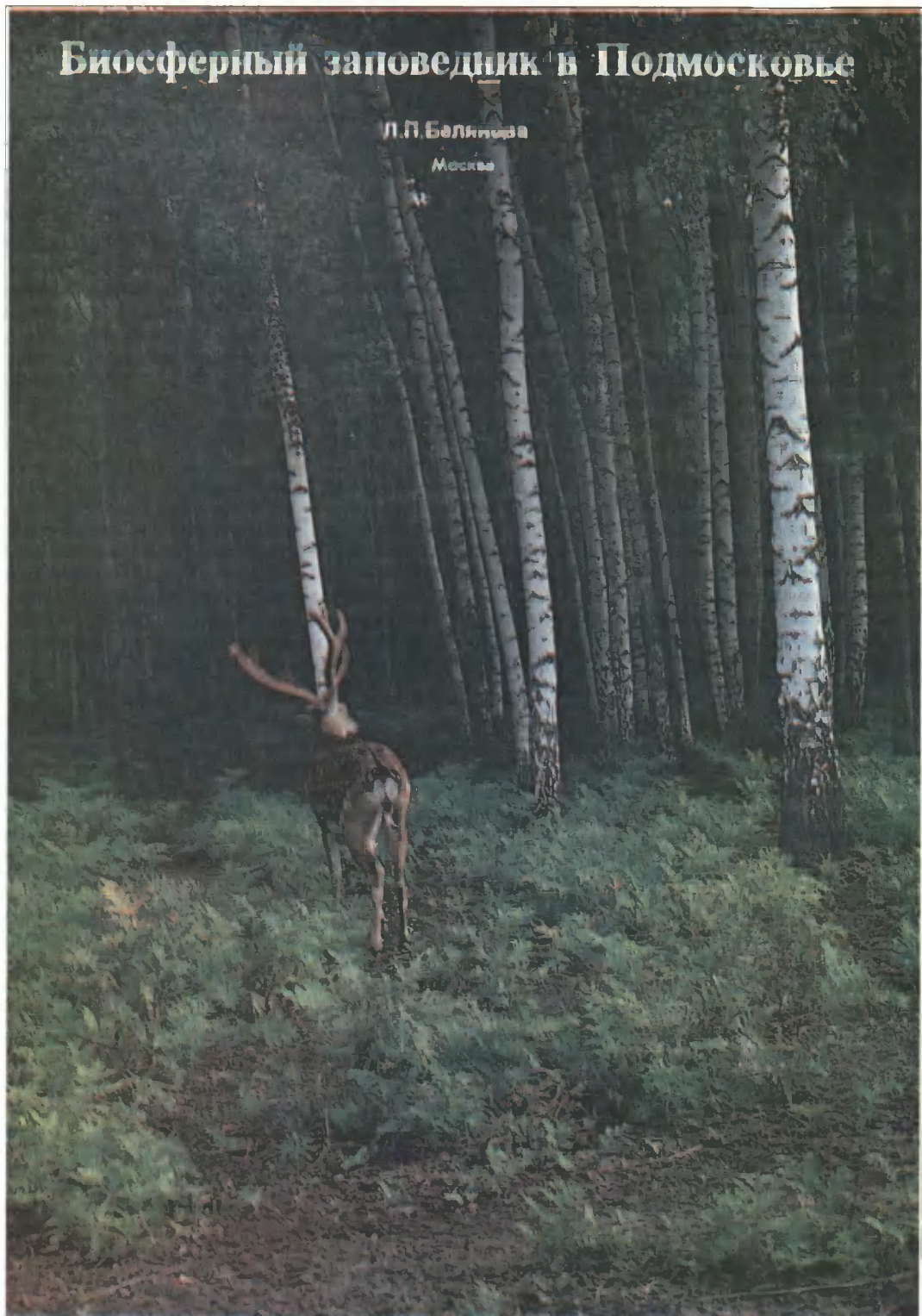
New Scientist. 1994. V. 142. № 1024. P. 16 (Великобритания).



# Биосферный заповедник в Подмоскowie

Л. П. Белкина

Москва



**М**ногие, видимо, знают, что "под боком" у Москвы, на юге области находится Приокско-Тerrasный биосферный заповедник. Его владения располагаются в 12 км восточнее Серпухова, на левом берегу Оки. Путь туда из Москвы — электричкой, потом автобусом. Техногенный пейзаж сопровождает всю дорогу до Серпухова, и только километрах в трех от этого промышленного города глаз может отдохнуть — начинаются лесные массивы.

За пос. Данки находится центральная усадьба заповедника: несколько старых жилых домов, контора, музей, компьютерная изба (!), теплый гараж и другие хозяйственные постройки. И что поражает в теперешнее время — новое двухэтажное каменное здание лабораторного корпуса, правда, пока без оборудования, но научные сотрудники начинают уже переезжать.

Центральная усадьба занимает северо-западный угол заповедника; всю его территорию наискосок пересекает шоссейная дорога. Проложенная здесь с незапамятных времен ("дозаповедных") и бывшая тогда грунтовой, она ведет к пос. Турово — центру прежнего Туровского совхоза. Несколько других лесных дорог соединяют усадьбу с некоторыми кордонами, где живут лесники (по-новому их именуют государственными инспекторами). На двух кордонах есть еще и по гостинице, они для тех, кого приглашают работать из научных учреждений — по теме, необходимой

*Ящерица обыкновенная. Ее можно встретить повсюду.*

*Фото Б.К.Машкова*

*Орешниковая соя, обычное животное широколиственных лесов.*

*Фото В.Н.Чижова*





заповеднику, и по контракту. Не знаю, практикуется ли сейчас такой способ научных исследований где-нибудь еще, кроме Приокско-Террасного. В прежние времена и в других заповедниках (сотрудники говорят — здесь тоже) было по-иному. Если у кого-то из ботаников, зоологов или других специалистов возникала необходимость изучить что-либо, имеющееся на той или иной охраняемой территории, "списывались" с дирекцией, получали разрешение (или направление?) от соответствующего ведомства и преспокойно работали. Всегда ли их результаты шли в копилку данных заповедника? Отнюдь. Из прошлого своего опыта знаю, что бывало и совсем не так: столичные исследователи ехали в заповедник даже не изучать объекты (какие-то виды животных, растений) собственного научного интереса, а

просто собирать их. Собрали и увезли. А теперь в Приокско-Террасном — приглашения и контракты. Разве плохо?

Его историю, пожалуй, можно начать с прошлого века. В 1861 г. известный русский ботаник Николай Николаевич Кауфман (1834—1870), изучая флору Московской губернии, совершил экскурсию на территорию нынешнего заповедника и обратил внимание на интересную особенность окской поймы к востоку от Серпухова. Здесь небольшие участки были покрыты степными растениями (Кауфман обнаружил около 50 видов), свойственными более южным степным районам<sup>1</sup>. Так стала достоянием ботанической науки "окская флора", возникновение которой пытались объяснить многие. Сам Кауфман большое значение в ее формировании придавал заносу семян речными водами из южных ле-

стопей. Другой русский ботаник — Дмитрий Иванович Литвинов (1854—1929) считал, что окская флора представляет собой реликт, сохранившийся с доледниковых времен<sup>2</sup>. И до сего времени существуют разногласия по поводу происхождения этого вполне изолированного флористического очага. Но независимо от точек зрения, эти островки весьма ценны как природные объекты.

Участки окской флоры с окружающими территориями на левобережье Оки и вошли в состав Московского государственного заповедника, образованного по постанов-

<sup>1</sup> Кауфман Н. Н. Московская флора, или Описание высших растений и ботанико-географический обзор Московской губернии. М., 1886; 1889.

<sup>2</sup> Литвинов Д. И. Геоботанические заметки о флоре Европейской России. М., 1891.



*Зубрица с теленком. Из архива заповедника.*



*Животные отдыхают. Из архива заповедника.*



лению Совета Народных Комиссаров от 10 июня 1945 г. Правда, этот заповедник состоял из пяти участков, но в апреле 1948 г. четыре из них были упразднены, а пятый стал самостоятельным Приокско-Террасным заповедником. В 1979 г., когда формировалась мировая сеть биосферных заповедников, он оказался в их числе. Как эталон биосферы, как типичная естественная территория, строго охраняемая, исключенная из сферы хозяйственной деятельности.

Что же это за типичная естественная территория?

Ландшафты, где расположен заповедник (исходя из статуса биосферного — это "ядро"), представляют собой склон левого берега Оки, пологу спускающийся к пойме в виде ступеней-террас. От них и название заповедника. За-

метны и другие возвышения рельефа — песчаные холмы, валы, бугры. В южной части громадными, в 2–3 км длиной, дугами тянутся Пониковский и Турецкий валы.

Распространены также карстовые явления — воронки, которых здесь насчитывается несколько сотен, самые крупные достигают 9 м в глубину и 25 м в диаметре.

В некоторых местах имеются плоские понижения, почти со всех сторон окруженные песчаными валами. Это доли, изумительной красоты природные образования, затопляемые в половодье.

В заповеднике довольно много ключей, особенно изобилует ими одна поляна — Родниковая. Две небольшие речки, Таденка и Пониковка, пересекают его территорию с севера на юг. Первая, начавшись за его пределами, 9-километровой

лентой проходит через восточную часть и впадает в Оку. Истоки второй находятся в центре заповедника; 5 км бежит Пониковка по поверхности и исчезает (поникает) на пойме Оки в карстовом озерке.

Мелкие ручьи и временные водотоки стекают в понижения между песчаными валами и образуют два лесных озера — Протокское и Сионское. В жаркое лето эти озера почти полностью высыхают.

В ядре биосферного заповедника около 92% площади занимают леса, в основном — смешанные, богатые и разнообразные (более 50 типов). Главная порода в них — сосна обыкновенная; растет она в разных почвенно-климатических условиях. Чистых сосняков, т.е. боров, мало, а на прилегающих к заповеднику лесных террито-



*Сосновый бор.**Фото Е. В. Арбузова**Небольшое болото.**Фото Е. В. Арбузова**Чистая и узкая просека, одна из многих в заповеднике.**Фото Е. В. Арбузова*

риях не осталось совсем. Боры эти необыкновенно красивы. В ясную погоду свет мягко льется сквозь ажурные кроны сосен и даже в пасмурные дни из-за красно-оранжевых в верхней части стволов создается впечатление, будто лес пронизан светом. В одном таком бору 160-летние сосны высоко вздымают свои кроны над ковром из зеленых мхов. Здесь пропадает обычная суетность, недаром говорят: в сосновом бору — молиться...

Второе место после сосны принадлежит березе. Она образует нередкие в заповеднике чистые насаждения и входит в состав второго яруса (вместе с дубом и осинкой) сосновых и еловых лесов. Нынешние чистые 40-летние березняки выросли на месте спелых хвойных лесов, вырубленных во время войны

для оборонных целей. А так как сразу после ее окончания территория стала заповедной, то восстановление леса не проводилось. Но теперь под пологом молодых лиственных пород появился еловый подрост. Иными словами, идет нормальная сукцессия, естественное восстановление. Ель "наступает" по всей территории заповедника, и, по прогнозам специалистов, не понадобится даже века, чтобы она стала преобладающей среди других древесных пород — ведь это коренной вид здешних мест.

Дубравы сохранились лишь островками в юго-восточной части заповедника, но дубы, обычно вместе с липой, входят в состав всех типов сосновых и еловых лесов. На месте распадающихся дубрав и на старых вырубках растут чистые осинники,

их возраст не более 60 лет. Дольше деревья не живут: из-за низкой прочности, вызванной стволовой гнилью, их ломают, вырывают с корнем сильные ветры.

Из числа чистых насаждений можно упомянуть еще липняки, обычно молодые. Здесь они являют собой переходную стадию сукцессии. Растет также черная ольха — по сырым местам, попадают вяз, ива, клен. Одним словом, древесная растительность — типичная для северной границы подзоны широколиственных лесов.

Зато многие травы здесь экзотичны, как упоминалось, — обычные компоненты травянистого покрова более южных степей. Это окская флора, жемчужина заповедника. Сосредоточена она главным образом в долах. Самый крупный из них, пло-



щадью около 36 га, — это заповедник в заповеднике. Для сохранности всего комплекса растений он обнесен сеткой, чтобы за нее не проникали не только окрестные любители грибов-ягод, но и крупные копытные.

Помимо обычных лесных и луговых трав здесь растут около 100 степных видов, основной ареал которых начинается в 300–400 км к югу. В долах это ковыль перистый, типчак, степная тимофеевка, степная вишня, козелец пурпурный, зопник, полынь австрийская, рябчик русский и многие другие. В составе степных растительных сообществ есть и горные виды, например, борец-волкобойник, крупка сибирская, осока притупленная, бурачок Гмелина, астра дикая. Типчак и ковыльные ассоциации встречаются в основном на верхней пойме и первой надпойменной террасе. Степные виды — вероника седая, пазник крапчатый, герань кроваво-красная, ракичник русский, дрок красильный и другие — растут в сосняках на нижних террасах.

Ничто не сравнится с красотой цветущих растений, образуют ли они заросли, или по одному, несколько штук яркими пятнами выделяются на зеленом ковре.

Рябчик русский (*Fritillaria ruthenica*) — вид окской флоры — цветет ранней весной, в апреле–мае: к тонкому, голому в верхней части стеблю подвешены крупные изящные колокольцы красно-коричневого цвета. В ассоциациях перистого ковыля рябчика бывает так много, что он образует цветовой аспект (как говорят ботаники), причем такой интенсивности аспект не встретишь в похожих сообществах более южных областей. В июле уже ничто не напоминает о рябчике, надземная часть отмерла, остались лишь луковички в земле.

Ковыль перистый (*Stipa pennata*) растет на небольших участках. Во время цветения, которое приходится на май–июнь, от его зарослей

не оторвешь взгляда: даже под легким ветерком колыхаются тонкие длинные ости, усеянные множеством серебристых волосков, и кажется, что по траве пробегают шелковые волны.

В долах же растет и степная вишня (*Cerasus fruticosa*). Иногда она образует невысокие заросли на нескольких десятках квадратных метров, но чаще ее кусты обрамляют боры, а случается, заходят и под полог леса. Весной вся вишня усыпана белыми ароматными цветками.

Не обойдешь вниманием и здешние ирисы, особенно привлекателен ирис сибирский. Его много в сырых местах, попадаете также и на остепненных лугах, среди кустарников. Фиолетово-синие соцветия из двух–трех крупных цветков заметны издалика.

Во флоре средней полосы России вряд ли найдется растения красивее венериного башмачка (*Cypripedium calceolus*). Четыре красновато-бурые листочка околоцветника по краям околнотые, а два боковые, слегка закрученные спиралью, обрамляют желтую вздутую губу, напоминающую изящный башмачок. Даже в заповеднике эта орхидея редка, и не удивительно: развивается она, как, впрочем, и другие орхидеи, из мельчайшего семени и только при том, если оно заражено симбиотическим грибом. Три года проросток живет под землей, а выйдя на поверхность, зацветает на 15–17 году жизни. Кроме венериного башмачка есть еще несколько видов орхидей: два дремлика (широколиственный и болотный), кокушник рогатый, любки (двулистная и зеленоцветная), неоттианта клубочковая, пальчатокоренник Фукса, тайник яйцевидный. У всех у них, как и положено орхидным, цветки причудливы и формой, и узором. Но мелкие, собранные в соцветия.

Всего во флоре заповедника насчитывается более 900 видов высших растений и

около 150 видов мохообразных.

Фауна не столь богата, но для такой небольшой территории и не бедна: 54 вида млекопитающих (в том числе 11 видов летучих мышей), около 130 видов птиц (36 — оседлых), 10 — земноводных и 5 — пресмыкающихся. Как и для всей Центральной России, для заповедника характерно смешение видов животных. Одни из них — типичные обитатели широколиственных лесов (например, лесной, или черной, хорь, орешниковая соя, европейская рыжая полевка, желтогорлая мышь, зеленый дятел, хохлатая синица), другие — выходцы из таежной зоны (заяц-беляк, глухарь, рябчик, крапивник). Любители открытых пространств — заяц-русак, обыкновенная полевка, коростель, чекан-каменка — заселяют лесные поляны.

Водных птиц мало, поскольку водоемов — всего два озера да три речки (кроме упомянутых есть еще Сушка). На озерах гнездятся утки, в речках добывает себе пищу неутомимый рыболов — зимородок, птица необычайной яркости наряда. В приозерных зарослях гнездится множество насекомоядных пернатых.

В долах — островках степной флоры — встречаются степные же виды насекомых.

Фауна смешанных лесов — самая богатая. Каждый ярус леса населен собственными видами: филин устраивает гнезда прямо на земле (кстати, сов в заповеднике восемь видов, больше всего обыкновенной неясыти); в подлеске или во втором ярусе древесотая живут насекомоядные птицы, а крупные дневные хищники устраивают гнезда в вершинах самых высоких деревьев, т.е. в первом ярусе.

Разнообразие типов леса обуславливает и обилие видов беспозвоночных животных. Только с сосной связано 24 семейства (117 видов) жесткокрылых, т.е. жуков.

Из млекопитающих особю стоит упомянуть копыт-

ных, так как именно они создают основную нагрузку на ландшафты. Крупных животных, искони населяющих наши леса, в заповеднике два вида — лось и благородный олень. Есть еще и чужестранец — завезенный с Дальнего Востока (в порядке "широкой акклиматизации" в Европейской части СССР) пятнистый олень. Вообще-то это вид (шесть подвидов) из фауны Восточного Китая, Корейского п-ова, Японии, о-ва Тайвань и Вьетнама; небольшая аборигенная популяция обитает в Южном Приморье. В заповеднике не радуются этому животному.

В разреженных лесах встречается косуля, но не европейский подвид, а сибирский: аборигенная косуля исчезла, и в 50-х годах была завезена сибирская.

Конечно, есть и кабан. Его не надо было завозить, он пришел сам из-за бескормицы в многоснежную зиму 1960/61 г. из соседнего охотничьего хозяйства. В заповедник, видимо, привлекли животных подкормка и безопасность.

Надо сказать, что Приокско-Террасный заповедник до конца 80-х годов слыл заповедником "придворным". Здесь была "царская охота"; на кордонах стояли шикарно оборудованные вышки (даже с баром), а на расстоянии выстрела — кормушки и лампы для подсвета. Сюда ездили поохотиться именитые правительственные чиновники (не самого высокого ранга), с лицензией, конечно. Если случалось подстрелить не обозначенного в ней животного, шофер привозил другую лицензию. К счастью, все в прошлом.

Охранный режим всегда привлекал окрестных зверей, особенно в охотничий сезон, когда в окружающих лесах залпами гремели выстрелы. Численность росла и за счет пришельцев, и за счет приплода и, естественно, колебалась по годам. Например, в первые 20 лет после создания заповедника самым многочисленным оказался лось,

его поголовье уже в 1954 г. достигло 134 особей и было снижено регулировочным отстрелом. Но сдерживаемый этим способом уровень оставался таким недолго: из-за снижения интенсивности отстрела и перекочевки лося из соседних угодий в 1965 г. в заповеднике было уже 227 зимующих животных. В последующие четыре года их количество резко сократилось, и в 70-е годы насчитывалось 50—80 особей, а в 80-е стало еще меньше (10—20), в 1990 г. их поголовье исчислялось 25 особями, зимой 1994/95 г. осталось восемь.

Поголовье косули, завезенной в 1950 г., достигло максимума — 66 голов — через 11 лет, а потом стабилизировалось на более низком уровне. Увеличение численности наблюдалось еще дважды: в 1966 и 1973—1974 гг. С тех пор количество этого вида не превышает 10—12 особей, так как почти из всех благоприятных угодий косулю вытеснили олени.

Численность благородного и пятнистого оленей была наибольшей (114 голов) в 1976 г., а потом оставалась примерно постоянной: от 80 до 100 животных. Пять лет назад их было 170, по последнему зимнему учету — 60.

Влияние перечисленных животных на растительность заповедника сказалось очень сильно, особенно пострадал подрост сосны. Лось за годы высокой численности почти полностью уничтожил его на некоторых участках леса, так как плотность зимующей популяции в 6—10 раз превышала оптимальную (4—6 особи на 1000 га). Даже при относительно низкой плотности поголовья лося угнетение растительности продолжалось, поскольку молодыми побегами кормились косуля и олени. В результате в заповеднике сильно уменьшилось количество подроста сосны, а также можжевельника и крушины. Лось, косуля и олени кормятся и другим подростом — березы, рябины. Но их побег хорошо возобновляются порослью, и

потому в некоторых кварталах заповедника эти породы замещают собой сосну в подлеске. Иными словами, под влиянием копытных меняется структура экосистем.

Кабан, буквально перепахивавший заповедные земли, сейчас почти исчез, его погубила свиная чума, и теперь в заповеднике всего пять особей (в 1990 г. было 120).

Из числа завезенных животных осталось упомянуть бобра. В 1948 г. всего две пары этих крупных грызунов были доставлены из Воронежского и Березинского заповедников и выпущены на Таденке. Благородная акция закончилась успешно — местной природе возвращен ее вид. Бобры в малых реках России водились во все времена, пока не уничтожили животных или не исчезли сами реки. Сейчас бобрам приволье, они заселили речки заповедника и проникли за его пределы, образовав южнomoсковскую популяцию.

Всемирно известная достопримечательность Приокско-Террасного заповедника — Центральный зубровый питомник. Организован он в 1948 г. на площади 200 га как один из мировых центров по восстановлению, вернее сказать, по возрождению зубра, которого к 1927 г. во всем мире насчитывалось лишь 48 голов. Первые семь зубров были привезены в заповедник из Польши, в дальнейшем племенное стадо пополнялось местным молодняком и животными, привозимыми из той же Польши, Голландии, Швеции и ФРГ, где тоже имелись питомники или группы животных в зоопарках.

С начала организации питомника разведением зубров многие годы занимались М.А. и Л.В.Заблоцкие. Теперь зубровым питомником командует И.П.Белоусова, начавшая работу с зубрами еще при Заблоцких. Сейчас она занимается выяснением родословных своих подопечных, и не напрасно.

Благодаря упорному труду специалистов по разведе-



*Дневной пернатый хищник —  
лустельга.*

*Фото Б.К.Машкова*

*Длиннохвостая синица.*

*Фото Б.К.Машкова*



дению этих животных в некоторых европейских странах и в СССР зубр официально признан восстановленным видом мировой фауны: в 1990 г. вся его популяция насчитывала 3600 голов (в России сейчас 465). Казалось бы, уже нет необходимости в интенсивном увеличении поголовья в питомниках, численность будет поддерживаться за счет размножения животных в вольных стадах. Но похоже, "зуброведам" еще предстоит потрудиться, чтобы разнообразить генофонд популяции. Сегодня он оставляет желать лучшего — ведь нынешние зубры произошли от 17 предков-основателей, а самцов-производителей, от которых пошло все потомство, лишь два! Так что анализ родословных очень нужен<sup>3</sup>.

Сколько возможна эта работа у нас в России, сказать трудно, ибо нужны деньги, деньги. Для "обновления крови" необходимо покупать зубров в других странах, много стоит и перевозка. Сейчас в питомнике содержится 31 зубр, живут они в обширных загонах, летом разбредаются, а зимой держатся возле кормушек.

Чтобы не допустить перевыпаса, кроме обитаемых загонных должны быть еще и запасные, куда можно было бы переводить зубров. Прежний загон отдохнул бы, а, кроме того, за время "отдыха" освободился бы от яиц и личинок гельминтов, которыми заражены сейчас многие животные. Но: территория заповедника уж очень невелика, а питомник и так занимает 200 га из 5000; зубры болеют гельминтозами, а лечение (от которого и

<sup>3</sup> О генетических аспектах изучения зубра предполагается публикация в "Природе" г.



*Луговые травы в цвету: золотик клубненосный (вверху), змееголовник Рюша (в середине), кульбаба шершавая.*

*Фото Е.В.Арбузова*



проку-то немного, если за-  
ражен загон) требует денег.

Питомник сейчас финансируется Министерством охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ, но с задержками: в феврале, например, министерство задолжало за декабрь предыдущего года. А нужно приобретать комбикорм, овощи и те же лекарства от гельминтозов.

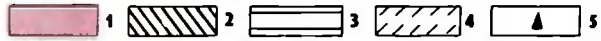
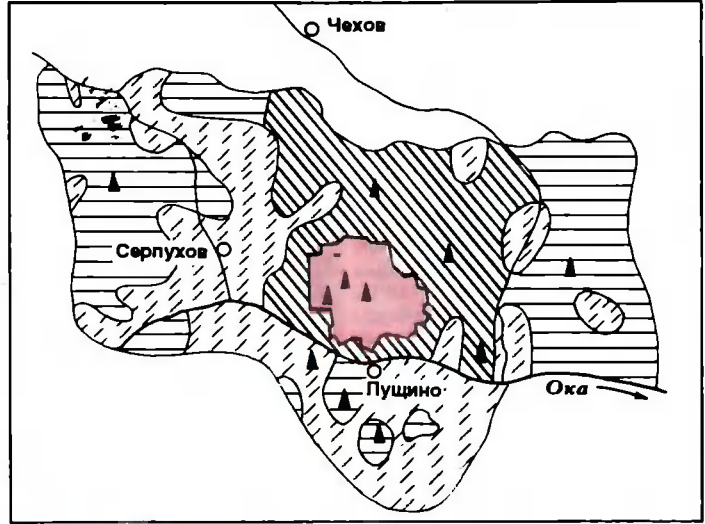
Питомник по праву считается научно-методическим центром по разведению, содержанию и изучению зубра. Цель разведения в питомниках, как упоминалось, увеличить численность вида и создать вольные стада, которые могли бы стать обычным элементом фауны. Такие стада живут и дают приплод на многих территориях бывшего СССР. Сейчас расселять животных — большая проблема. Приходится буквально упрашивать сотрудников охотничьих хозяйств, чтобы они приняли зверей и делали все для процветания вольной группы. А вывоз — за счет заповедника.

Напомню, Приокско-Террасный заповедник — биосферный, и повторяюсь — эталон биосферы, типичная естественная территория, строго охраняемая, исключенная из сферы хозяйственной деятельности. По статусу, биосферный заповедник



должен иметь три зоны: заповедную (ядро), буферную (или охранную) и зону типичного хозяйственного использования. Все это необходимо, чтобы выполнять основные функции, утвержденные международными организациями. В бывшем СССР идею зонирования за счет заповедной территории специалисты не поддержали, так как в число первых биосферных заповедников, куда вошел и Приокско-Террасный, были включены заповедники с устойчивым строгим режимом охраны, и менять его, расплывая территорию на зоны, было бы просто преступлением<sup>4</sup>. Наши биосферные заповедники фактически представляют собой ядро, строго охраняемую зону, и выполняют лишь функцию охраны и фонового мониторинга. Другие зоны, обозначаемые на картах и в документах, обычно "организованы" за счет прилегающих угодий, которые принадлежат разным землепользователям. В нынешнее время при вольном понимании земельной собственности есть все основания опасаться, что и частные лица, и сельскохозяйственные организации найдут способы проникнуть в нетронутые еще, а потому и весьма привлекательные заповедные территории.

Это отступление по поводу биосферности, скорее всего знакомое читателям, сделано не напрасно. Биосферные заповедники зонированы. В небольшом проспекте "Приокско-Террасный биосферный заповедник. Биосферная станция "Пушино" (1981, ответственный за выпуск А.С.Керженцев) приведена схема заповедника, на которой фигурируют не три, а даже четыре зоны. На деле оказалось иначе: до 1984 г. биосферный заповедник ос-



Индекс	Зона биосферного заповедника	Землепользователи	Площадь, тыс. га
1	Заповедная (ядро)	Государственный заповедник	5
2	Буферная	Государственное лесное хозяйство	25
3	Восстановления естественных систем	То же	40
4	Хозяйственного использования	Сельскохозяйственные и городские земли	30
5	Пикеты мониторинга	В любой зоне	

Общая площадь

100

*Схема Приокско-Террасного биосферного заповедника (по Керженцеву А.С. и др., 1981). Пикеты мониторинга обозначены треугольниками.*

тавался в границах государственного, а затем серпуховской администрации выделила под охранную зону полосу леса (2-километровой ширины), окаймляющую ядро. В то время это были владения Государственного лесного хозяйства, теперь — акционерного общества "Русский лес". Самому заповеднику по-прежнему принадлежат всего 5000 га, т.е. территория ядра.

Одна из главных задач биосферных заповедников — экологический мониторинг, иначе говоря, система комплексных наблюдений, оцен-

ки и прогноза всех изменений природы под влиянием естественных и антропогенных факторов. В Приокско-Террасном заповеднике, как и в других, ежегодно составляется "Летопись природы", которая содержит результаты метеорологических, микроклиматических, гидрологических наблюдений, в ней регистрируются фенологические явления, продукция различных растительных сообществ, численность животных и многие другие сведения. Отмечаются также засухи, суровые зимы, высокие паводки, ливни, бури, лесные пожары. "Летопись приро-

<sup>4</sup> Соколов В. Е., Пузаченко Ю. Г., Гукин П. Д., Зыков К. Д. Биосферные заповедники: цели и проблемы // Природа. 1988. № 1. С. 34-46.



ды" отечественных заповедников — ценнейшая многолетняя информация, какой нет ни в одном заграничном заповеднике. Ее унификация и обработка дали бы массу сведений об изменениях экосистем на громадной части земной суши.

Что касается фонового мониторинга, то в заповеднике очень много сил и внимания уделяется определению химического состава воздуха, осадков, почвы. Для этого стремятся использовать новые методы и приборы. Мечта администрации и сотрудников лаборатории фонового мониторинга — автоматические приборы непрерывного действия для контроля за состоянием окружающей среды. Именно в этом заповеднике стали измерять кислотность дождей по мере их выпадения, а не в усредненной пробе — только так и удается определить, сколько бывает кислых осадков<sup>5</sup>.

О том, какими видятся необходимые для мониторинга приборы не только для своего заповедника — для всех подобных станций, директор мог бы многое написать и посоветовать. Кстати, он считает, и вполне резонно, что мониторинг должен

быть и комплексным, и избыточным, а сейчас он недостаточен по всем характеристикам природной среды, разве что за исключением данных о температуре и количестве осадков. А, кроме того, должен быть опережающим: сейчас ведь далеко не всегда и не о любой характеристике можно сказать, что она будет крайне необходима через какое-то время. Поэтому и покупают для заповедника озонометр (дорогой, по нашим меркам, а денег никто не выделял) — прибор для будущего. Уже есть намеки на необходимость озонометра: почти во всей Западной Европе концентрация приземного озона в летнее время увеличилась примерно в 10 раз по сравнению с предыдущим десятилетием. Более того, рассказывает Литкенс, в Германии на территории Шварцвальда (в среднегорье) именно высокой концентрацией приземного озона объясняют специалисты гибель хвойных на довольно обширных территориях. Этот газ вторичен, образуется из окислов азота (выбрасываемых с выхлопными газами автотранспортом) под действием жесткого ультрафиолета и, будучи сильным окислителем, повреждает хлоропласты хвой.

Нельзя не отметить, что построенные в заповеднике новые здания — кроме упомянутого лабораторного корпуса еще лаборатория

фонового мониторинга (уже не в центральной усадьбе, а поближе к "пробным" площадкам) и кормокухня в зубровом питомнике, — на мой взгляд, свидетельство заботы о сотрудниках. Зуброводам, например, теперь не придется мерзнуть зимой, мокнуть под дождем, они готовят кормовые смеси для зубров, занимаются ремонтными работами в крытом помещении.

Забот в заповеднике множество, трудностей тоже, с финансированием в том числе, ведь оно государственное.

А тем временем задачи биосферного заповедника выполняются: выходит научная продукция — сборники научных трудов<sup>6</sup>, статьи, небольшие красочные проспекты (чего стоит нынче издать что-либо, читатель знает), сотрудники занимаются природоохранным просвещением в печати, на радио, организуют экскурсии, лекции.

<sup>6</sup> См., напр., наиболее полное описание окской флоры (С м и р н о в П. А. Список растений, собранных и зарегистрированных в окрестностях с. Лужки на р. Оке Московской области // Тр. Приокско-Террасного гос. заповедника. М., 1958. Вып. 2.) и недавние издания: Изучение экосистем Приокско-Террасного государственного заповедника. Пушино, 1991; К вопросу о возможности сохранения зубра в России. Пушино, 1993.

<sup>5</sup> Литкенс Е. С. Служба кислотных дождей // Природа. 1991. № 6. С. 84-85; А б л е в а В. А., Литкенс Е. С. Кислотные дожди в Центральной России // Природа. 1995. № 3. С. 94-95.

## Дорогие читатели!

Оформляя подписку на второе полугодие 1995 г., **ТРЕБУЙТЕ** на почтамте каталог издательства "Известия". Сведения о "ПРИРОДЕ" (наш индекс 70707) помещены на стр. 29.

## Мир островов

**В. И. Симачев,**

кандидат биологических наук  
Ботанический сад Санкт-Петербургского  
государственного университета

**М. С. Боч,**

доктор биологических наук  
Ботанический институт РАН

**Г. А. Носков,**

доктор биологических наук  
Биологический научно-исследовательский институт  
Санкт-Петербургского университета

**Н**А карте Ленинградской области, в Финском заливе, между фарватерами судоходных линий на Таллинн и Хельсинки, изогнутой цепочкой протянулась группа островов: Сескар, Малый, Мощный, Вигрунд, Большой и Малый Тютерсы,

Виргины. Самый крайний из них — о. Гогланд — почти вплотную подходит к морской границе с Финляндией, в составе которой вся эта группа островов была до 1944 г., а позже включена в пограничную с Финляндией зону России. Удивительный мир островов для российских ученых открылся лишь в самые последние годы: строгий пропускной режим мало способствовал

их изучению, однако с другой стороны, слабая посещаемость благоприятствовала сохранению дикой природы, их животного и растительного мира.

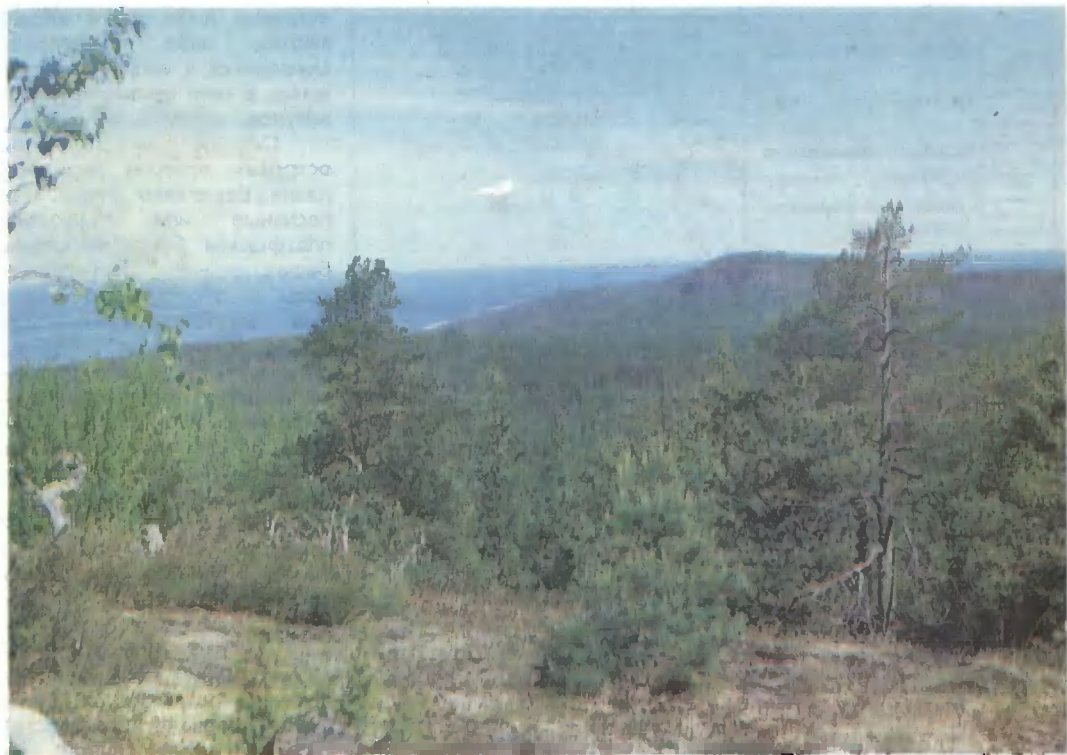
Острова сильно различаются размерами, слагаю-

*Цветущая морская горчица на песчаной литорали о. Сескар.*

*Здесь и далее фото В. И. Симачева*

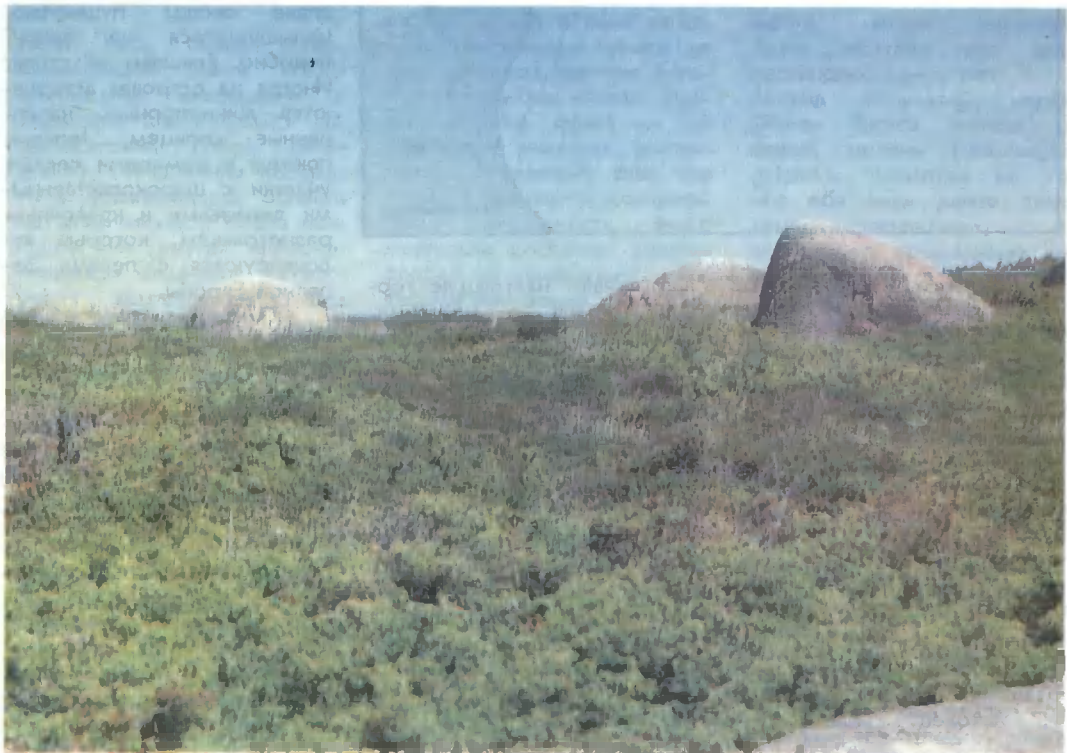
© Симачев В. И., Боч М. С., Носков Г. А. Мир островов.

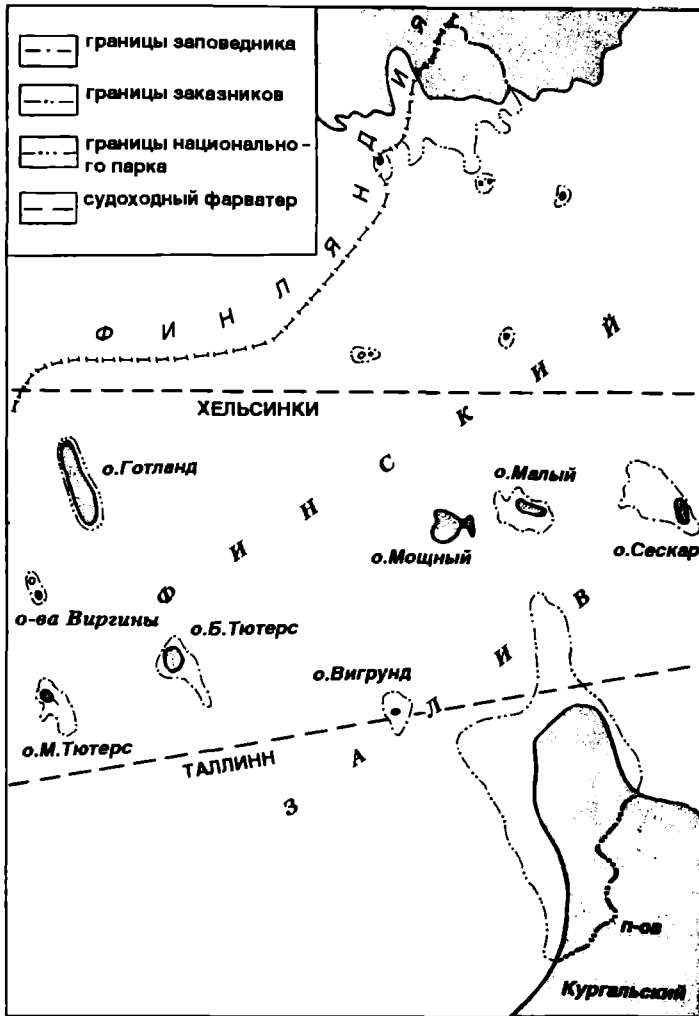




**Ельник (о. Гогланд).**

**▼ «Тундра» (о. М. Тютерс).**





**Схема-проект охраняемых территорий Финского залива и побережья.**

щими их коренными породами, рельефом. Самый маленький — о. Вигрунд — занимает всего 1 га, самый большой — о. Готланд — более 2 тыс. га. Коренные породы островов — пески и граниты. Высота одних островов невелика (в пределах 10 м), и рельеф обычно сглажен. На других — встречаются дюны самой различной высоты (до 60 м), и, наконец, третьи —

напоминают настоящую горную страну с высотами, превышающими 170 м. На островах Б. Тютерсе и Готланде одновременно присутствуют все формы горного рельефа: практически голые сглаженные, будто полированные, бараньи лбы, отвесные скалы, разломы пород, напоминающие горные ущелья, трудно проходимые беспорядочные нагромождения многотонных гранитных блоков и валунов разной величины и формы, каменные террасы и ступени. Гранитные породы этих

островов либо круто обрываются, либо постепенно спускаются в залив, продолжаясь в нем цепью крупных валунов.

Особую живописность островам придает разнообразие береговых линий. На песчаные или гранитные платформы будто нанизаны бесчисленные песчаные косы и отмели, тростниковые заросли, каменистые гряды и россыпи валунов, приморские лужи и болота, выше которых поднимаются леса. Прибрежные полосы и внутренние части островов нередко образуют необычные сочетания ландшафтов, словно перенесенных сюда из других ботанико-географических зон. То они напоминают горную тундру со сплошным ковром из водяники и стелющегося под ногами мохожеленьника с небольшой (чуть выше человеческого роста) рябиной обыкновенной, то похожи на степь с «морем» злака овсеца пушистого, колышущегося на ветру, подобно ковылям в степи. Иногда на островах встречаются миниатюрные, наполненные солнцем, теплом, покоем и комарами лесные участки с широколиственными деревьями и красочным разнотравьем, которые ассоциируются с лесами Западной Европы.

Пожалуй, главное богатство островов — птицы, особенно многочисленные в периоды миграций. В эту пору тростниковые заросли, каменистые россыпи и песчаные мелководья, кажется, до предела заполнены тысячами пернатых обитателей. Различные виды морских речных уток, крохалей, гусей и лебедей, куликов и чаек регулярно останавливаются здесь для отдыха и кормежки. В летние месяцы на островах обитают редкие для области чернозобая га-



### о. Малый.

гара, гага, серая цапля. Обнаружены даже следы пребывания внесенного в «Красную книгу СССР» сокола-сапсана (*Falco peregrinus*), гнездование которого в Ленинградской области не отмечалось с конца 60-х годов. Из других «красно-книжных» хищников на островах встречаются скопа (*Pandion haliaetus*) и орлан-белохвост (*Haliaeetus albicilla*). Впервые для Ленинградской области обнаружено гнездование серого гуся, турпана, гаги, пеганки.

На островах часто можно встретить лося или кабана, обычны для этих мест и заяц-беляк. На Гогланде обитает енотовидная собака (*Nyctereutes procyonoides*), видимо, завезенная сюда ранее, а на о. Б. Тютерс многочисленна садовая соня (*Elomys quercinus*) — редчайший для

области впадающий в зимнюю спячку вид грызунов, проникновение которого на остров остается пока загадкой. Удивительно много на этих островах черного большого хищного слизня (*Loi-max cinereo niger*) — на отдельных участках (например, у подножия скал или вдоль тропинок в сосновом лесу) численность этого моллюска достигает десятка особей на квадратный метр. Весьма интересен и видовой состав амфибий и рептилий: помимо обычных — травяной лягушки, гадюки, живородящей ящерицы, серой жабы — здесь обнаружены достаточно редкие в области уж и обыкновенный тритон. Места размножения тритонов довольно неожиданны: они используют для откладывания икры небольшие и хорошо прогреваемые «ванночки» с пресной водой в углублениях скал. На островах Мощный, Гогланд, Б. Тютерс поражает обилие серых жаб.

Гряды валунов и небольшие выступающие из воды скалы — излюбленные места лежек тюленей. Здесь обитают два вида ластоногих — балтийский подвид кольчатой нерпы (*Phoca hispida botnica*) и серый тюлень (*Halichoerus grypus*). Несмотря на то, что оба вида давно стали «красно-книжниками», их численность продолжает сокращаться, и в водах восточной Прибалтики осталось всего две-три сотни особей. На летний сезон большинство тюленей скапливается на небольших островках Кургальского рифа (южнее группы рассматриваемых островов) и на о. Вигрунд. В марте же они рожают детенышей на льдах залива ближе к северному берегу.

Очаровывает и растительный мир островов, особенно на побережьях. Когда зацветают растения песчаной и каменистой литорали, впечатление такое,



будто перед вами искусно созданный садоводом-любителем яркий цветочный газон, где валуны и желтый песок гармонично чередуются с сизоватым ковром побегов гонкени бутераковидной, с малиновыми цветками чины приморской, с лиловыми шапками обильно разветвленных соцветий горчицы морской балтийской, с пронзительно желтыми и ярко-розовыми кистями-метелками льнянки обыкновенной, вербейника обыкновенного и плакун-травы. Такое же сильное впечатление оставляют ветровые формы деревьев и кустарников — иногда это замысловато изогнутые небольшие сосны (высотой немногим более и даже ниже человеческого роста) или рябины с туго перекрученными витыми стволами. Когда высаживаешься на о. М. Тютерс, первое впечатление, что попал в старательно ухоженный парк с аккуратно подстриженными в форме шаров, кубов, конусов и пирамид кустами. Их образуют разнообразные ветровые формы можжевельника обыкновенного. На побережье некоторых островов распространены приморские лужки и болота, где на фоне обычной здесь полевicy побегообразующей, клевера ползучего, лабазника вязолистного и пушиц растет немало флористических редкостей: подорожник морской (*Plantago maritima*), глаукс приморский (*Glaux maritima*), осока галечная (*Carex gloeosa*) и другие. На песчаных дюнах о. Сескар найден редкий для области злак — песколюбка песчаная (*Ampophila arenaria*). Практически весь флористический комплекс, свойственный побережью Финского залива, присутствует и на островах. К береговой полосе примыка-

ют сухие заросли черной ольхи (в области эти деревья обычно образуют болотные леса), на границе с которыми часто встречается дерен шведский (*Chaamaericidumetium suecicum*) вместе с восковником болотным (*Myrica gale*) — реликтовым растением, занесенным в «Красную книгу СССР». В таком обилии, как на островах, не увидишь дерен нигде более в нашей области. На внутренних болотах о. Гогланд восковник образует растительное сообщество вместе с другими редкими видами — пухоносом дернистым (*Trichophorum caespitosum*), роснянкой промежуточной (*Drosera intermedia*). Столь же богаты редкими видами, в том числе растениями из «Красной книги СССР», например, очеретником бурым (*Rhynchospora fusca*), и встречающиеся на трех островах запа-болота — болота северного типа, характерные больше для Карелии, Кольского полуострова, чем для нашей области. Очень необычно выглядят миниатюрные, так называемые «висячие» болотца, образующиеся в плоских понижениях, трещинах и выбоинах гранитных пород. В них все, как в настоящих больших болотах: в каменной оправе окна воды с изящной бахромой цветков вахты трехлистной, с пятнами сфагнума, пушицей, вереском и даже дерном и восковником. Вообще, на островах можно проследить все стадии формирования болот — от только-только зарождающихся со сплавиной из сабельника болотного и осоки, ковром мха кукушкина льна до зрелых с отложениями торфа, сфагнумом, пушицей, багульником, вереском и порослью сосны.

Пески и граниты, ко-

ренные породы островов, не очень-то благоприятствовали пышному развитию здесь растительности. Главная лесообразующая порода на островах — сосна. На дюнах, скалах, песках и болотах она образует разнотипа сосняки, в основном в сообществе с лишайниковыми, зелеными мхами, вересковыми и сфагновыми. Сосны здесь, как правило, молодые и небольшой высоты (до 10 м). Состав разнотравья довольно бедный, но и в сосняках встречаются редкие виды. Например, в редкостных скальных сосняках о. Гогланд в трещинах скал можно увидеть разные редкие папоротники — вудсию северную (*Woodsia ilvensis*), костенец северный (*Asplenium septentrionale*), в более затененных местах — костенец волосовидный (*A. trichomanes*). На плоских гранитных лбах, в микропонижениях и трещинах растет смолка альпийская (*Viscaria alpina*). На островах обычные также и мелколиственные леса: березняки, осинники, ивняки. Широко распространены, но только на островах Б. Тютерс и Гогланд, разные типы ельников, сложенных зрелыми деревьями, достигающими 18—20 м высоты. В ельниках, особенно на о. Гогланд, встречается примесь отдельных широколиственных пород, например, липы, а в разнотравье обычные типичные спутники широколиственных лесов — печеночница благородная, чина весенняя и др. На месте бывших деревьев на о. Гогланд есть небольшая по площади ясеневая роща, а на Б. Тютерсе — кленовая.

Исследование природы островов стало возможным в связи с идеей создания в восточной части Финского залива заповедника. Идея

была высказана еще в начале века А. П. и В. П. Семеновыми -Тян-Шанскими и другими русскими учеными, но начала осуществляться только в самые последние годы при поддержке и заинтересованности финских экологов в организации в пограничном с Финляндией районе заповедника. Благодаря финансовой помощи со стороны Международного фонда охраны дикой природы в 1993—1994 гг. на гидрологическом судне была проведена комплекс-

ная экспедиция с участием финских и российских специалистов разного профиля из различных учреждений Финляндии и г. С.-Петербурга. Руководил работами директор биологического научно-исследовательского института С.-Петербургского университета проф. Д. В. Осипов. В итоге российские и финские ученые разработали предложения о необходимости организации системы особо охраняемых природных территорий, которые должны охватить, по-

мимо упомянутых (за исключением о. Мощный), группу островов вдоль северного побережья залива, пограничную с Финляндией материковую часть и расположенный на южном побережье залива Кургальский полуостров в составе заповедника, двух заказников и национального парка. Осуществление этого проекта позволит сохранить уникальную богатую природу островов и материковой части востока Финского залива. Работы продолжаются..:

## НОВОСТИ НАУКИ

Этология

### Осьминоги обучаются «вприглядку»

Обучение по принципу «делай как я» свойственно не одним лишь людям, да обезьянам. Так учиться умеют и другие млекопитающие, птицы и рыбы. Но могут ли таким способом обучаться беспозвоночные животные? Итальянские биологи Г. Фьорито с Неаполитанской зоологической станции и П. Скотто из Университета Реджо-Калабрия в Катандзаро<sup>1</sup> на осьминогах *Octopus vulgaris* доказали: могут!

Сначала они обучали одних осьминогов выбирать красный пластиковый шарик и отвергать белый, а других — наоборот. Для этого применяли стандартный метод поощрения (кусочек рыбки приклеивали к «по-

ощряемому» шарик с противоположной от осьминога стороны) и наказания (слабый удар током; электроды тоже приклеивали к шарик). Опыты проводили до тех пор, пока в серии из пяти экспериментов осьминоги не делали ни одной ошибки. Для этого выбиравшим красный шарик понадобилось в среднем 16,8 опытов, а белый — 21,5. Осьминоги не видят цветов; красный и белый шарики они различали по яркости, и, похоже, красный им явно нравился больше.

Затем в четырех сериях опытов обученные осьминоги должны были, уже без поощрения и наказания, выбрать «свой» шарик, в то время как в другой половине аквариума за их действиями через стеклянную перегородку следили другие, необученные осьминоги. Исследователи сразу заметили: осьминоги-«наблюдатели» смотрели за работой «демонстраторов», буквально не отрывая глаз.

Наконец, осьминогам-наблюдателям позволили самим выбрать шарик,

опять-таки без поощрения и наказания. Те, которые наблюдали за осьминогом-демонстратором, выбиравшим красный шарик, сами выбрали красный в 86 % случаев, а наблюдавшие за тем, кто выбирал белый, — избрали белый в 70 % случаев. И тут красный шарик оказался симпатичнее! Если исключить опыты, в которых осьминоги вообще не трогали шарик, доля ошибочного выбора составила 9 %. Прекрасный результат: ведь осьминоги-наблюдатели видели работу демонстраторов лишь в четырех опытах. Демонстраторы же после четырех опытов делали 49 % ошибок! Через пять дней опыт повторили: осьминоги прекрасно запомнили то, чему научились.

Таким образом, обучение методом «обезьяничанья» у осьминогов не только возможно, но происходит гораздо быстрее, чем стандартным методом поощрения и наказания.

<sup>1</sup> Fiorito G., Scotto P. Observational learning in *Octopus vulgaris* // Science. 1992. V. 256. № 5056. P. 545—547.

# Моделирование биологического окисления метана

А. Е. Шилов, А. А. Штейнман

**О**ГРОМНЫЕ запасы метана на нашей планете будоражат воображение химиков, заставляя их искать пути его эффективного превращения в легко транспортируемое топливо (например, в метанол) или высшие насыщенные и ненасыщенные углеводороды — основные синтетические строительные блоки в химической индустрии. В принципе из метана можно получать любые органические вещества (полимеры, красители, лекарства и т. д.), однако до сих пор не найдены катализаторы, способные осуществлять эти превращения достаточно эффективно без больших затрат энергии в малостадийном процессе.

Между тем в ходе длительной химической эволюции Природа создала весьма совершенные биокатализаторы — ферменты, позволяющие без труда достичь этой цели. Действительно, ферментные системы некоторых микроорганизмов настолько активны, что способны осуществлять эффективное окисление метана не только при обычных температурах и давлении в водной среде, но даже вблизи температуры замерзания воды или при низком парциальном давлении метана. Конечно, раскрытие секретов Природы дало бы в руки химиков мощный рычаг для создания новых экологически чистых химических процессов в целях рационального использования этого ценного химического сырья. При всей практической важности этой проблемы решение ее имело бы и большое познавательное значение в понимании окружающего нас мира.

Большую роль в исследовании механизма ферментативного окисления

и выяснении природы активации молекул метана и кислорода играет химическое моделирование биологических процессов — один из важнейших методов сравнительно новых химических наук: бионеорганической химии, биоорганической химии, биохимической физики. Особое место в этом ряду занимает биомиметическая химия, которая стремится подражать Природе в ее искусстве целенаправленного, экономного и изящного превращения химических соединений. Именно этот принцип используется для создания новых химических катализаторов, обладающих, помимо высокой активности, также высокой селективностью и экологической чистотой.

Приблизительно 25 лет назад, когда мы приступили к исследованиям в области биомиметического окисления алканов (насыщенных углеводородов, простейший из которых — метан), сведения о соответствующих ферментах были еще довольно скудными. Мы полагали тогда, что в этих процессах большую роль должна играть активация алканов с участием ионов или комплексов металлов: уже была накоплена информация о роли ионов металлов в активных центрах некоторых ферментов, и бурно развивался в те годы гомогенный металлокомплексный катализ<sup>1</sup>.

## АКТИВАЦИЯ АЛКАНОВ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСАМИ

К концу 60-х годов благодаря металлокомплексному катализу были достигнуты большие успехи в активации таких «инертных» молекул, как  $H_2$ ,  $CO$ ,



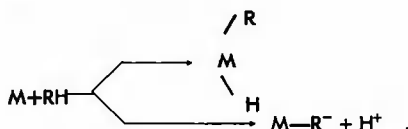


*Александр Евгеньевич Шилов, академик, профессор Московского государственного университета, член Европейской Академии наук, директор Института биохимической физики РАН и филиала Химического факультета МГУ (Черноголовка), заведующий лабораторией комплексных катализаторов Института химической физики РАН (Черноголовка). Основные научные интересы связаны с изучением кинетики и механизма химических реакций, катализа, химического моделирования ферментных систем.*



*Альберт Александрович Штейнман, доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института химической физики РАН (Черноголовка). Основные научные интересы лежат в области механизма химических реакций, металлосложесного и биомиметического катализа.*

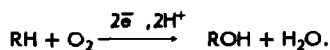
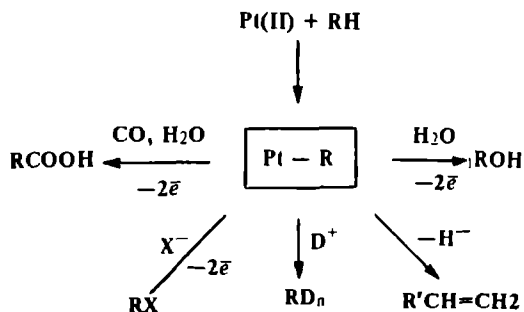
$N_2$ , низшие олефины. Эти молекулы слыли инертными потому, что не был известен механизм их превращения, а электронные конфигурации считались очень устойчивыми. Но активация металлокомплексами изменила положение: их координация к иону металла ведет к разрыхлению электронных облаков молекул и предоставляет путь для осуществления химического превращения. И только алканы продолжали сохранять репутацию неприступных молекул, закрепленную в их старом названии «парафины», что в переводе с греческого означает «не имеющие сродства». Было ясно, что активация алканов (RH) должна быть подобна, с одной стороны, активации молекулярного водорода, а с другой стороны, — ароматических углеводородов (ArH). Активация «инертных» молекул металлокомплексами (M) к тому времени уже была осуществлена и могла бы протекать путем так называемых реакций окислительного присоединения или электрофильного замещения:



Очевидно, что термодинамика этих процессов должна быть менее выгодной для алканов вследствие меньшей, как правило, прочности связи металла с алкильным радикалом (M—R) по сравнению со связями M—H и M—Ar, что объясняло, почему такие реакции не были обнаружены ранее.

Таким образом, открытие активации алканов к тому времени назрело, и в 1969 г. мы установили, что в водных растворах соли платины катализируют реакции дейтеро-водородного обмена алканов, включая метан<sup>2</sup>. Позднее было доказано, что эта реакция

<sup>2</sup> Гольдшлегер Н. Ф., Тябин М. Б., Шилов А. Е., Штейнман А. А. // Журн. физ. химии. 1969. Т. 43. № 8. С. 2174—2175.



*Активация в каталитические реакции алканов в водных растворах солей платины.*

осуществляется благодаря образованию Pt—R интермедиата (промежуточного соединения) и что возможны другие реакции алканов в водном растворе, протекающие тем же путем, включая окисление алканов. В результате многочисленных исследований круг активирующих алканы металлов, а также реакций и механизмов был существенно расширен, и теперь гомогенная активация алканов — одна из наиболее динамично развивающихся областей металлокомплексного катализа<sup>3</sup>. А priori можно было полагать, что биологическое окисление алканов включает активацию их на металлическом центре, однако вскоре после открытия металлокомплексной активации алканов стало очевидным, что по крайней мере аэробное окисление определяется активацией молекулы кислорода.

#### МЕХАНИЗМЫ ОКИСЛЕНИЯ АЛКАНОВ

**Анаэробное окисление.** Ферменты, участвующие в этом окислении, делятся на два больших класса: монооксигеназы и диоксигеназы, хотя различие между ними не очень принципиально. В диоксигеназной реакции оба атома молекулы кислорода переносятся в субстрат(ы), а в монооксигеназной для окисления используется только один атом, второй же превращается в молекулу воды:

Поскольку окисление алканов осуществляется, как правило, с участием монооксигеназ, на этом типе биологического окисления остановимся подробнее. В качестве примера рассмотрим наиболее известную окисляющую алканы монооксигеназу — так называемый цитохром P<sub>450</sub> (такое обозначение связано с тем, что в видимом спектре CO-комплекса этого цитохрома наблюдается интенсивная полоса поглощения вблизи 450 нм). Активный центр этого фермента содержит порфириновый комплекс железа — гем, входящий также в состав переносчиков кислорода гемоглобина и миоглобина. Однако если в последних двух случаях кислород связывается с гемом обратимо, то под действием цитохрома P<sub>450</sub> молекула кислорода активируется до такой степени, что способна окислить даже инертные алканы!

Такое поразительное различие в поведении гема зависит от его ближайшего белкового окружения, которое и определяет природу «аксиального» лиганда L (сам порфирин — экваториальный лиганд) и групп, участвующих в активации кислорода. Так, для миоглобина, гемоглобина и пероксидазы аксиальным лигандом служит имидазол гистидина, а для цитохрома P<sub>450</sub> и хлорпероксидазы — тиопат цистеина. Этот механизм достаточно надежно доказан при сравнительном изучении цитохрома P<sub>450</sub> и его химических моделей — порфириновых комплексов железа<sup>4</sup>. Было установлено, что активным окислителем служит монооксидородный комплекс железа, подобный широко известным в химии окислителям — оксокомплексам и оксоосолям металлов, таким как перманганат или бихромат, и представляет собой феррил Fe(IV)=O, объединенный с катион-радикалом порфирина P<sup>+</sup>, т. е.

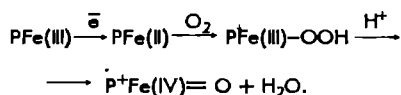
<sup>3</sup> Shilov A. E., Shteinman A. A. // Coord. Chem. Rev. 1977. V. 24. P. 97—143.

<sup>4</sup> Хенкин А. М., Штейнман А. А. // Кинетика и катализ. 1989. Т. 30. № 1. С. 7—21.

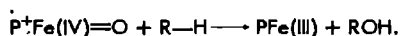
$\dot{P}^+Fe(IV)=O$ . Молекула кислорода, связываясь с гемом в цитохроме  $P_{450}$ , образует кислородный комплекс, аналогичный комплексам гемоглобина и миоглобина. Затем еще один электрон переносится от внешнего восстановителя, что приводит кислород к состоянию перекиси.

Как же этот перекисный интермедиат превращается в активный моноокислородный интермедиат?

Очевидно, что для осуществления этого превращения необходимо было найти способ, позволяющий подобрать тот или иной акцептор, с помощью которого от перекиси отщеплялся бы один атом кислорода в виде фрагмента воды ( $HO^-$  или  $O^{2-}$ ). В модельных системах таким акцептором выступали ионы металлов, ацил  $RCO^+$  или протон  $H^+$ . В цитохроме  $P_{450}$  эту роль, как оказалось, выполняет протон, вблизи места связывания кислорода в молекуле фермента существуют специальные группы для его переноса, а образование моноокислородного комплекса идет по реакции:



Активный окислитель цитохрома  $P_{450}$  обладает «оксеноидными» свойствами, т. е. может рассматриваться как комплекс атома кислорода (оксена) с железопорфирином. Действительно, как и в случае других оксеноидов, атом кислорода может переноситься на субстрат, в том числе и в  $C-H$  связь алкана:



Однако цитохром  $P_{450}$  вовсе не способен окислять метан и лишь очень небольшое его окисление установлено на железопорфириновых комплексах. Проведенные исследования хоть и позволили понять механизм активации  $O_2$  гемовыми монооксигеназами и создать эффективные химические ана-

логи для биомиметического окисления алканов, но не дали ответа на вопрос: как же окисляется метан в природе.

**Окисление метанмонооксигеназой.** Ферментные системы метанотрофов, метанмонооксигеназы, осуществляют эффективное превращение метана в метанол при обычных температурах и давлениях. В отличие от широко изученного семейства гемовых монооксигеназ железо в активном центре метанмонооксигеназы находится не в форме гемового комплекса, а входит в состав двухъядерного центра, в котором два атома железа связаны оксо- и карбоксилатными мостиками. Метанмонооксигеназа — член целого семейства негемовых железосодержащих белков, в состав которого входят: гемеритрин, осуществляющий перенос кислорода в крови некоторых моллюсков; рибонуклеотид-редуктаза; редокс-фермент, участвующий в синтезе РНК, и целый ряд других белков, включающих  $Fe-O-Fe$  ядро<sup>5</sup>. В зависимости от условий роста метанмонооксигеназа может находиться как в растворимой, так и в связанной с мембраной форме. Поскольку первая изучена гораздо лучше, поговорим сначала о ней.

Растворимая метанмонооксигеназа обладает широкой субстратной специфичностью и помимо метана способна окислять другие алканы, ненасыщенные и ароматические углеводороды и их функциональные производные. При окислении *n*-алканов (нормальных) окисляются только концевые метильные группы, это — так называемое « $\omega$ -окисление», в других случаях место атаки определяется обычным порядком реактивности в соответствии с прочностью соответствующей  $C-H$  связи. И все же метан окисляется легче других алканов, несмотря на его наибольшую инертность!

<sup>5</sup> Vincent J. B., Oliver-Lilley G. L., Averill B. A. // Chem. Rev. 1990. V. 90. № 8. P. 1447—1467.

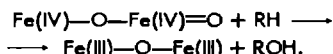
Метанмонооксигеназа состоит из тесно связанных между собой трех компонентов: собственно гидроксилазы, регуляторного белка и редуктазы. Гидроксилаза связывает метан или другой субстрат и осуществляет их гидроксילирование. Она содержит  $Fe_2O$  центр и для окисления молекулярным кислородом требует присутствия редуктазы. Однако окисление перекисью водорода может осуществляться и без ее участия, так как редуктаза необходима лишь для восстановления  $O_2$  до перекисного состояния. Регуляторный белок связывается с гидроксилазой и редуктазой одновременно и, видимо, выполняет организующую функцию, существенно улучшая эффективность и селективность гидроксילирования.

Рентгеновская структура гидроксилазного компонента метанмонооксигеназы *Methylococcus capsulatus*, установленная совсем недавно, подтвердила двухъядерную природу активного центра<sup>6</sup>. Оказалось, что структура этого фермента сходна со структурами гемеритрина и, особенно, рибонуклеотид-редуктазы, также активирующей кислород для реакций окисления. С атомами железа в активном центре метанмонооксигеназы связаны четыре карбоксильные группы глутамина (одна из них соединяет атомы железа) и два имидазольные кольца гистидина (по одному у каждого атома железа). Кроме того, в качестве мостиков выступают экзогенные лиганды  $HO^-$  и  $AcO^-$ . В цис-положении с одним из атомов железа координирована молекула воды, рядом с другим атомом находится не связанная с ним  $SH$ -группа цистеина, назначение которой пока неизвестно. Атомы железа находятся в гидрофобном окружении, способствующем связыванию гидрофобного же субстрата (каким и является алкан) с активным центром фермента.

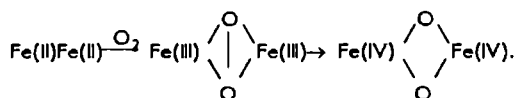
В результате кинетического анали-

за окисления метана с участием растворимой метанмонооксигеназы выяснилось, что восстановленный фермент-субстратный комплекс быстро связывает  $O_2$ , образуя тройной комплекс, который в лимитирующей (т. е. определяющей скорость всего процесса) стадии распадается с образованием метанола и воды. Эффективный перенос атома кислорода в монооксигеназном механизме мог бы происходить от  $Fe(V)=O$ , однако образование такого высокоэнергетического интермедиата в физиологическом окружении кажется крайне невероятным.

Принято считать, что механизм окисления  $C-H$  связи при участии метанмонооксигеназы сходен с механизмом действия гемовой монооксигеназы типа феррипа. Второй атом железа метанмонооксигеназы мог бы выполнять ту же функцию, что и порфирин в цитохроме  $P_{450}$ , а именно — обеспечивать возможность энергетически более выгодного двухэлектронного окисления  $C-H$  связи путем переноса на нее атома кислорода:



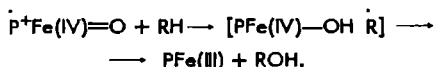
Образование феррильной частицы обеспечивается отщеплением воды от промежуточно образующейся перекиси подобно механизму с участием цитохрома  $P_{450}$ . Использование двухъядерного центра метанмонооксигеназы позволяет получить еще более приемлемую для биологии активную частицу. Действительно, атом кислорода может быть связан с обоими атомами железа в бис- $\mu$ -оксокомплексе. Для образования такого активного интермедиата не нужен внешний акцептор для  $O^{2-}$ , так как им могут быть два иона железа (III), обладающие заметной люисовской кислотностью:



<sup>6</sup> Rosenzweig A. C., Frederick C. A., Lippard S. J., Nordlund P. // Nature. 1993. V. 366. P. 537—543.

Ясно, что установление молекулярной структуры метанмонооксигеназы поможет выявить механизм ее действия.

Что касается реакции активного интермедиата с алканом, то наиболее приемлемы два механизма, предложенные по аналогии с механизмами внедрения в С—Н связь синглетных и триплетных бирадикалов (O, CH<sub>2</sub>, NH). Первый из них — механизм отщепления-рекомбинации — предполагает проявление радикальных свойств у активного окислителя, который в начальном акте взаимодействия с алканом отрывает от него атом водорода с образованием алкильного радикала. Дальнейший процесс подобен рекомбинации свободных радикалов в клетке растворителя:



Согласно другому механизму, получившему название механизма внедрения, процесс может протекать как синхронное внедрение атома кислорода в С—Н связь без промежуточного образования радикалов.

Первый механизм наиболее признан, в частности потому, что во время переноса кислорода молекула претерпевает некоторые дополнительные превращения (изомеризацию), присущие свободным радикалам (для механизма внедрения таких превращений ожидать не приходится). Однако и в этом механизме не все концы сходятся с концами. Недавно мы предложили новый механизм, по которому образуется промежуточный комплекс феррилы с алканом (FeO—CH<sub>2</sub>) через атом кислорода, причем углерод становится пятикоординированным, а алкан — неожиданно способным к дополнительному присоединению. Тем самым опровергается старое название алканов «насыщенные углеводороды». Возможно, этот комплекс способен изомеризоваться и поэтому нет никакой необходимости в образовании свободных радикалов<sup>7</sup>.

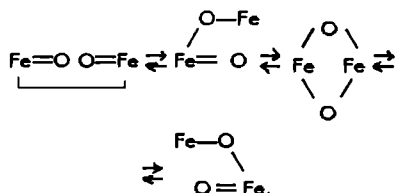
Обновленный механизм внедрения лучше объясняет имеющиеся экспериментальные данные, в частности факты, указывающие на отсутствие радикальных состояний в ходе переноса атома кислорода в С—Н связь. Возможно, в зависимости от природы активного центра и атакуемой С—Н связи оба механизма допустимы: для мягкого активного окислителя гемовых ферментов и слабых и пространственно затрудненных третичных С—Н связей предпочтительнее механизм отщепления-рекомбинации, а для более жесткого активного центра метанмонооксигеназы и очень прочных первичных С—Н связей вероятнее механизм внедрения.

Недавно с использованием кинетических методов исследования быстрых реакций впервые зафиксировано образование трех последовательных интермедиатов за время одного цикла метанмонооксигеназы<sup>8</sup>. Бесцветный интермедиат P образуется сразу после смешения двухэлектронно восстановленного фермента с O<sub>2</sub> и затем медленно превращается в окрашенный интермедиат Q. Скорость исчезновения Q зависит от природы и концентрации субстрата, подтверждая этим, что Q — активный интермедиат. Наконец, интермедиат T, образующийся в результате взаимодействия Q с субстратом, распадается с высвобождением оксигенированного продукта. Соединение Q было охарактеризовано с помощью мессбауэровской спектроскопии после быстрого замораживания образца, полученного смешением реагентов. В результате выяснилось, что Q представляет собой двухъядерный комплекс, содержащий

<sup>7</sup> Так живая природа вынуждает нас менять сложившиеся представления. Эти представления все равно надо менять при рассмотрении реакции метана с комплексами металлов: здесь также получены доказательства присоединения метана к комплексу с образованием пятикоординированного углерода. Еще раньше было найдено, что протон в газовой фазе и в растворах так называемых «суперкислот» способен присоединяться к метану, образуя ион CH<sub>5</sub><sup>+</sup>.

<sup>8</sup> Lee S. K., Fox B. G., Froland W. A., Lipscomb J. D., Munch E. // J. Am. Chem. Soc. 1993. V. 115. № 14. P. 6450—6451.

два неразличимых парамагнитных атома. Это означает, что активный кислород занимает симметричное положение в кластере и атомы железа антиферромагнитно связаны. На основании этих данных для интермедиата Q может быть предложена одна из структур между крайними состояниями диферрила или бис- $\mu$ -оксокомплекса:

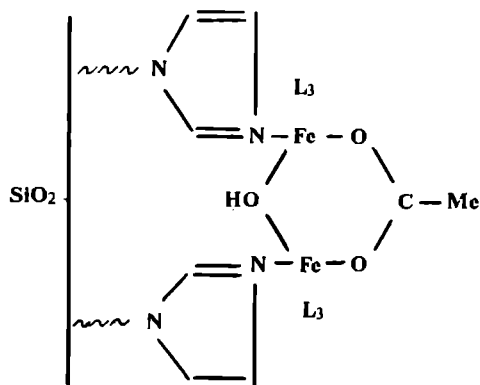


Возможно, что эти интермедиаты могут быстро превращаться друг в друга.

Оставалось надеяться, что химическое моделирование метанмонооксигеназы, подобно тому, как это произошло с цитохромом P<sub>450</sub>, позволит более определенно судить о механизме ее действия. Около 10 лет назад химиками С. Липпардом (США) и К. Витхардтом (ФРГ) независимо были синтезированы двухъядерные комплексы железа с  $\mu$ -оксо- и  $\mu$ -карбоксилатными мостиками, моделирующие структуру активных центров негемовых железосодержащих белков, и к настоящему времени получено целое семейство таких комплексов. Однако, у этих комплексов нет свободных вакансий для координации кислорода или перекиси и потому они не могут быть использованы в функциональных моделях этих негемовых белков. В последние годы комплексы со свободными или лабильными вакансиями в координационной сфере железа были получены, и их реакция с молекулярным кислородом, донорами активного кислорода и алканами начинают изучаться.

Существует несколько моделей окисления алканов с участием двухъядерных комплексов, но пока не удалось добиться эффективного биомиметического окисления метана. Поскольку образующиеся при восстановлении активированного кислорода высоко-

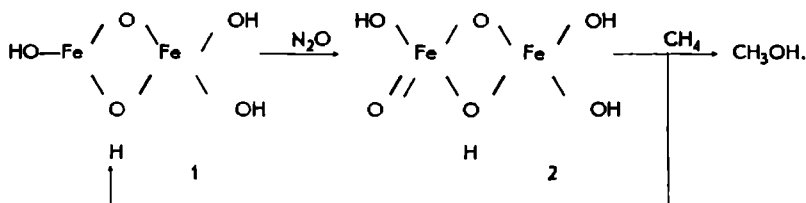
ковалентные комплексы железа — сильные окислители, они могут реагировать с одновременно присутствующими в растворе двух- и трехвалентными формами железа и «теряться», таким образом, для окисления алканов. Чтобы эти активные интермедиаты можно было использовать только в реакции с алканами, необходимо избавиться от бимолекулярных реакций комплексов железа, например, закрепив их на поверхности. Такая возможность была реализована недавно в нашей лаборатории: метан окислен молекулярным кислородом (с небольшой пока эффективностью) при участии комплексов, полученных путем самосборки на поверхности силикагеля, модифицированного имидазольными группами:



Видимо, лучшая в настоящее время функциональная модель метанмонооксигеназы — окисление метана, окиси углерода и бензола закисью азота на так называемых  $\alpha$ -центрах железосодержащих цеолитов ZSM-5. Эти центры образуются в результате выхода железа из кристаллической решетки цеолита при термической обработке<sup>9</sup>. Природа их до сих пор неизвестна, однако предполагается, что это — поверхностные гидроокисные кластеры железа (1). Диссоциация N<sub>2</sub>O

<sup>9</sup> Panov G. I., Sobolev V. I., Kharitonov A. I. // J. Mol. Catal. 1990. V. 61. P. 85—97.

на  $\alpha$ -центрах приводит к «посадке» на них атома кислорода с образованием активного окислителя (2), который стехиометрически окисляет метан в метанол при комнатной температуре:



и геохимии, изучая диффузию выделяемого метаногенными бактериями метана, уже давно обнаружили, что в бескислородных зонах морской воды и придонном иле вопреки ожиданию

Интересно, что никакие другие переходные металлы, кроме железа, не могут образовывать подобные  $\alpha$ -центры.

Известно, что большинство аэробных, окисляющих алканы монооксигеназ содержат комплексы железа, а недавно появились сведения, что активные центры мембраносвязанной метанмонооксигеназы построены на основе комплексов меди. Эта монооксигеназа отличается от растворимой более узкой субстратной специфичностью, т. е. способна окислять только низшие (от  $C_1$  до  $C_4$ ) алканы, а также чувствительна к тем ингибиторам, которые не влияют на растворимую форму фермента. Предполагается, что медь входит в трехъядерные кластеры, аналогичные кластерам так называемых голубых медных оксидаз, которые представляют ассоциацию моноядерных и двухъядерных комплексов меди — центров активации  $O_2$ . Не исключено, что в этом случае моноядерный комплекс в трехъядерном ассоциате мог бы участвовать в активации метана. На это указывает уширение сигнала в протонном спектре метана, сорбированного мембраносвязанной метанмонооксигеназой.

#### ЗАГАДКА АНАЭРОБНОГО ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА

Долгое время считалось, что метан инертен в анаэробных условиях и может ассимилироваться лишь аэробными микроорганизмами. Однако геологи

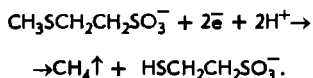
имеется некоторый недостаток этого газа.

Анаэробные метаногены вместе с другими ответственными за анаэробное сбраживание органических остатков микроорганизмами участвуют в круговороте углерода на Земле. Они используют продукты жизнедеятельности своих коллег — углекислый газ, водород, формиат или ацетат в качестве источника углерода и энергии для собственного роста. Эти бактерии превращают  $CO_2$  в  $CH_4$  путем сложного процесса четырехэлектронного восстановления за счет четырех молекул водорода:

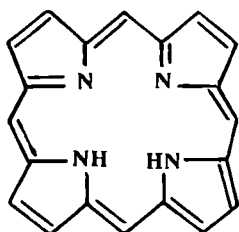


Реакция протекает с большим выделением энергии ( $\Delta G^\circ = -138$  кДж/моль). Кроме того, часть  $CO_2$  ассимилируется в тканях анаэробных бактерий.

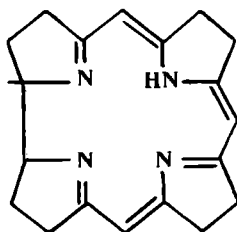
Ферментные системы этих бактерий содержат ряд кофакторов, из которых наиболее важны два — коэнзим M и так называемый  $F_{430}$ . Первый кофактор представляет собой 2-меркаптоэтансульфоновую кислоту, действующую как терминальный переносчик  $CH_3$  группы, а второй — комплекс никеля с тетрапиррольным макроциклическим лигандом корфином. Этот комплекс катализирует выделение метана из метилкоэнзима M (MeCoM):



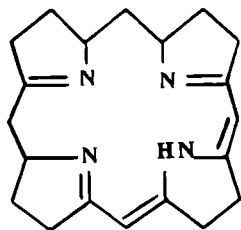
Корфин — гибридный порфирина и коррина, макроциклического тетрапиррольного лиганда, входящего в витамин В<sub>12</sub> в виде комплекса с Со. Все метаногены богаты никелем, большая часть которого используется для синтеза фактора F<sub>430</sub> и многочисленных Ni-гидрогеназ, осуществляющих превращение:  $H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-$ . Никель входит также в СО-дегидрогеназу, которая катализирует реакцию:  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ .



порфин (Fe, Mg)



коррин (Со)



корфин (Ni)

*Природные макроциклические тетрапиррольные лиганды и характерные для них биометаллы.*

Обе группы ферментов содержат никель в виде кластеров с железом и серой и осуществляют активацию  $H_2$  и СО для дальнейших химических превращений. Реакция выделения метана из  $MeCoM$  напоминает хорошо известную реакцию десульфурзации, катализируемую так называемым никелем Ренея — пористым и пирофорным (самовозгорающимся на воздухе) металлическим никелем, получающимся при растворении в щелочи сплава

никеля с алюминием. Интересно, что реакция s-деалкилирования характерна и для других металлов (Ni, Pd, Pt), среди которых наиболее активен никель. Механизм деалкилирования включает образование  $CH_3-Ni$  интермедиатов, подобных  $CH_3-Co$  интермедиатам витамина В<sub>12</sub>:  $Ni(I)F_{430} + CH_3SCoM \rightarrow CH_3-Ni(II)F_{430} + HSCoM$  (или S—S связь)  $CH_3Ni(II) + H^+ \rightarrow CH_4 + Ni(II)F_{430}$ . Для проявления S-деалкилирующей активности двухвалентный Ni должен быть восстановлен до одновалентного.

В глубинах иловых отложений больших и малых водоемов в результате жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов (в том числе и метаногенов) идет непрерывное разложение органических остатков с образованием среди прочих продуктов метана. Только ничтожная часть его попадает в атмосферу, основная же масса, диффундирует в кислородную зону, окисляется аэробными метанотрофами до метанола и используется ими в качестве источника энергии и строительного материала.

До накопления значительных количеств кислорода в атмосфере в результате появления фотосинтеза у растений и водорослей вся жизнь на нашей планете была анаэробной. Метанообразующие бактерии в то время уже существовали. Для реализации круговорота углерода в природе должен был, очевидно, существовать и процесс его связывания без участия кислорода. Им могло быть анаэробное окисление метана. После появления кислорода и бактерий, аэробно окисляющих метан, на долю анаэробного окисления приходится меньшая часть, но, по нашему мнению, его существование несомненно.

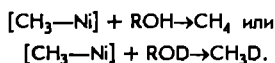
Косвенным подтверждением этой гипотезы стали результаты опытов, проведенных в 1979 г. с использованием радиоактивного изотопа углерода — <sup>14</sup>C. В этих опытах доказано анаэробное превращение <sup>14</sup>CH<sub>4</sub> в <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> при участии не метанотрофов, а метаногенов. В качестве продуктов окисления метана были обнаружены также мета-



нол и ацетат, к тому же часть метки включалась в ткани микроорганизмов. Окисление метана, так же как и образование его, ингибировалось 2-бромэтансульфоновой кислотой (аналогом коэнзима M). Однако окисление метана наблюдалось только одновременно с его выделением и никогда не удавалось зафиксировать чистого (нетто) окисления.

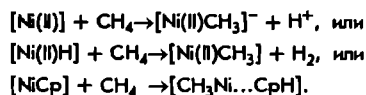
В то же время, существование анаэробного окисления было убедительно продемонстрировано на примере ненасыщенного углеводорода — ацетилена. Если предположить, что анаэробное окисление метана происходит на тех же центрах, что и его выделение, то необходимо принять, что процесс связывания метана должен быть приблизительно термонеутральным и протекать так, чтобы небольшое изменение условий могло повернуть его в ту или другую сторону. Эта ситуация очень напоминает связывание метана при его активации металлокомплексами.

Таким образом, выяснилось, что метан неинертен в анаэробных условиях и некий биохимический механизм должен существовать и для окисления этого газа в бескислородной среде. О природе этого механизма можно было только догадываться. Однако полученные недавно в нашей лаборатории результаты по реакции метана с NiH, в которой образуется CH<sub>3</sub>—Ni, существенно усиливают гипотезу металлокомплексной активации метана при его анаэробном окислении. Оказалось, что при нагревании до 70°C метан взаимодействует с системой Cr<sub>2</sub>Ni—AlH<sub>4</sub> (где Cr — циклопентадиенильный радикал) в тетрагидрофуране, давая относительно устойчивый продукт, который подвергается алкоголизу (аналогично гидролизу), и в результате выделяется метан. Следовательно, этот продукт должен содержать CH<sub>3</sub>—Ni:



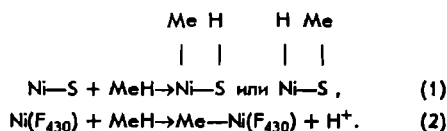
Вероятно, первая стадия реакции представляет активацию CH<sub>4</sub> на Ni(II)

аналогично активации его на Pt(II) и Pd(II):

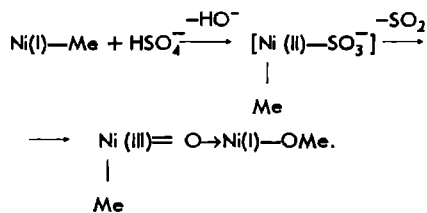


В опытах с дейтерометаном (CD<sub>4</sub>), вместо легкого метана (CH<sub>4</sub>) алкоголиз продуктов реакции дает значительные количества CH<sub>2</sub>D<sub>2</sub>, что согласуется с большим вкладом последней реакции. Об этом говорит также относительно небольшой обмен в присутствии дейтерия (D<sub>2</sub>). Аналогичные функции акцептора H(H<sup>+</sup>), а именно H(H<sup>-</sup>) или Cr(Cr<sup>-</sup>), может выполнять сера в Ni-гидрогеназах.

Активация метана в анаэробном окислении, возможно, протекает как активация молекулярного водорода на Ni-гидрогеназах (1) или как процесс, обратный выделению метана ферментными системами метаногенных бактерий (2):

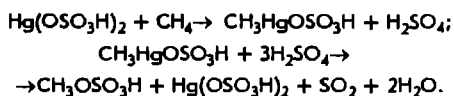


Вместо кислорода в качестве окислителя в анаэробных условиях вероятнее всего выступает сульфат-ион. Как уже отмечалось, анаэробное окисление метана может быть сопряжено только с каким-либо экзергоническим процессом, например, наиболее «популярным» в анаэробном мире восстановлением сульфата. Пока не очень ясно, на какой стадии его восстановления сульфат «забирает» электроны от метана (или передает на него атом кислорода). Процесс может выглядеть, например, так:



В то же время в сильно восстановительной анаэробной среде акцептором электронов может быть S—S связь:  $RS-SR + 2e \rightarrow 2RS^-$ . Проглядывается определенное сходство с сопряжением в монооксигеназном процессе.

В качестве модели анаэробного окисления можно было бы рассмотреть окисление метана до метанола серной кислотой, катализируемое ионами  $Hg(II)$  при  $180^\circ C$  и протекающее с выходом 43%. В этой реакции происходит образование ртутьорганического соединения, включающее стадию активации алкана:



Затем монометилловый эфир серной кислоты легко может быть гидролизован до метана.

И раньше нам удавалось в лаборатории добиваться окисления метана до метанола при катализе  $Pt(II)$ , окислителем в этом случае был комплекс  $Pt(IV)$ . Известны также реакции окисления алканов серной кислотой при катализе комплексами  $Pt(II)$  и  $Pd(II)$ , однако они изучены меньше, чем реакция с  $Hg(II)$ .

### БИОМИМЕТИЧЕСКИЙ КАТАЛИЗ

Круг каталитических явлений, охватываемых понятием биомиметический

катализ, как упоминалось, включает использование принципов Природы для создания новых химических процессов, отличающихся большой экономичностью в отношении затрат энергии и материалов, исключительной эффективностью и селективностью и, вследствие всего этого, высокой экологической чистотой.

На этом пути уже получены значительные результаты. Так, например, за последние 30 лет совершенно преобразилась низкотемпературная химия молекулярного азота. Если до 60-х годов едва ли не единственной известной реакцией, в которой азот реагирует при комнатной температуре, была реакция с металлическим литием с образованием нитрида, то теперь, благодаря в значительной степени выяснению химического механизма фиксации азота бактериями, удалось открыть множество интереснейших реакций азота в растворах с участием комплексов металлов. Выполнены важные исследования, направленные на создание искусственного фотосинтеза — аналога процесса, осуществляемого растениями. Можно привести и другие примеры успешного применения биомиметического подхода. Однако пока на этом пути сделаны лишь первые шаги, демонстрирующие его перспективность.

Исследования в области биомиметического катализа проводятся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Международного научного фонда (ISF) и Международной ассоциации (INTAS).

# Бесщелевые кристаллы с примесями

Академик И. М. Цидильковский  
Институт физики металлов УрО РАН  
Екатеринбург

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА

Электронные свойства твердых тел определяются энергетическим спектром электронов, который имеет зонный характер: полосы разрешенных для электронов энергий чередуются с полосами запрещенных энергий. Тип и электропроводность твердого тела зависят от заполнения электронами высших по энергии зон. Если в веществе имеется хотя бы одна заполненная зона, то мы имеем дело с металлом (рис. 1, а). Если же самая высокая по энергии заполненная зона (валентная) отделена энергетической щелью  $\epsilon_g$  от низшей пустой (зоны проводимости), вещество является полупроводником (рис. 1, б). Проводимость, обусловленную переносом заряда электронов зоны проводимости и дырок валентной зоны, называют собственной.

Найти величину щели  $\epsilon_g$  между зонами можно, зная концентрации электронов  $n_i$  и дырок  $p_i$  в области собственной проводимости, где  $n_i = p_i$ . Когда электроны и дырки подчиняются статистике Больцмана, собственная концентрация  $n_i$  для параболических зон, т. е. зон с квадратичным законом дисперсии, равна:

$$n_i = p_i = A T^{3/2} \exp\left[-\frac{\epsilon_g}{kT}\right], \quad (1)$$

где коэффициент  $A$  содержит эффективные массы электронов  $m_e$  и дырок  $m_h$  и универсальные константы.

Дефекты кристаллической структуры (примерные атомы, вакансии) образуют электронные примесные уровни,

которые, попадая в энергетическую щель, могут либо поставлять электроны в зону проводимости (донорные уровни), либо захватывать электроны из валентной зоны (акцепторные уровни) и создавать таким образом в последней подвижные дырки (см. рис. 1, б). Этот тип проводимости называется примесной проводимостью.

С начала 30-х годов считалось, что существуют два типа кристаллов: металлы, у которых проводимость убывает с повышением температуры степенным образом, и полупроводники, у которых в этих же условиях она растет экспоненциально. В 1955—1957 гг. в эту классификацию твердых тел пришлось внести изменение: был обнаружен новый класс веществ — бесщелевые полупроводники. Зона проводимости у них соприкасается с валентной зоной, т. е. отсутствует энергетический порог для рождения электронно-дырочной пары<sup>1</sup> (рис. 1, г, д).

Что, собственно, особенного в этом касании двух зон? Заполненные состояния смыкаются со свободными, и, следовательно, это твердое тело — вроде бы металл. В действительности все обстоит не так просто. Бесщелевой полупроводник существенно отличается по своим свойствам как от металлов, так и от полупроводников. С одной стороны, бесщелевые полупроводники можно рассматривать как металлы с наполовину заполненной зоной — объединенной валентной зоны и зоны проводимости. От типичных металлов их отличает существенно меньшая плотность электронного газа, равная нулю при  $T=0\text{K}$ . Поверхность Ферми

© Цидильковский И. М. Бесщелевые кристаллы с примесями.

<sup>1</sup> Иванов-Омский В. И., Цидильковский И. М. Бесщелевые полупроводники — новый класс веществ // Природа. 1983. № 2. С. 67.

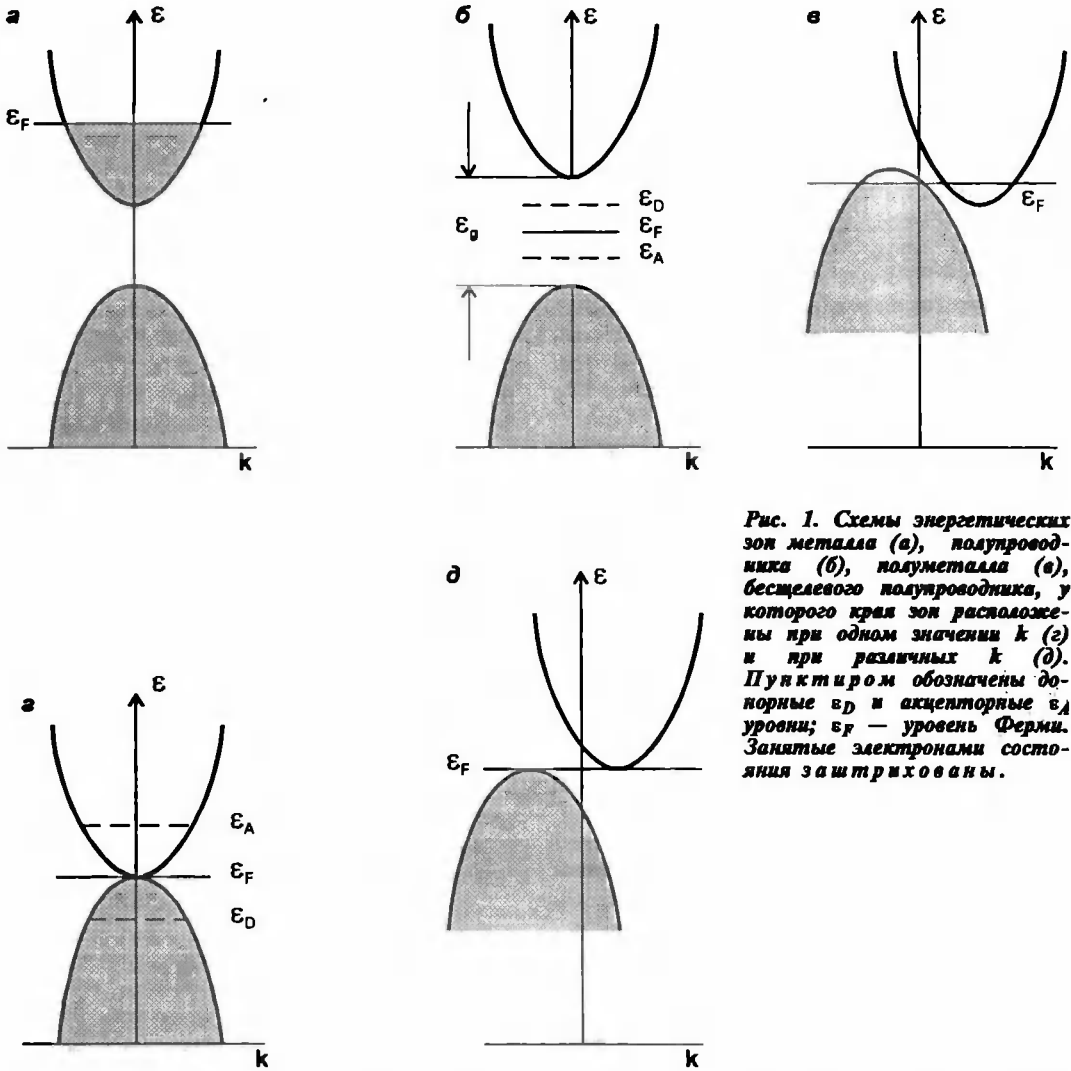


Рис. 1. Схемы энергетических зон металла (а), полупроводника (б), полуметалла (в), бесщелевого полупроводника, у которого края зон расходятся при одном значении  $k$  и при различных  $k$  (д). Пунктиром обозначены донорные  $\varepsilon_D$  и акцепторные  $\varepsilon_A$  уровни;  $\varepsilon_F$  — уровень Ферми. Занятые электронами состояния заштрихованы.

здесь точечная<sup>2</sup>. Под действием внешних факторов плотность электронного газа может, в отличие от металлов, меняться в очень широких пределах, что позволяет управлять свойствами бесщелевых полупроводников с помощью весьма слабых внешних воздействий. С другой стороны, бесщелевой

полупроводник — это полупроводник с нулевой щелью между целиком заполненной при  $T=0K$  валентной зоной и пустой зоной проводимости.

Принципиальная возможность существования полупроводников с непрерывным электронным спектром без щели была предсказана в 1934 г. С. П. Шубиным и С. В. Вонсовским на основе многоэлектронной полярной модели твердого тела<sup>3</sup>. А эксперимен-

<sup>2</sup> Поверхность Ферми — изоэнергетическая поверхность  $\varepsilon(\mathbf{p})=\varepsilon_F$  в пространстве квазиимпульсов  $\mathbf{p}$ , отделяющая занятые электронные состояния от пустых,  $\varepsilon_F$  — граничная энергия Ферми. В металлах поверхность Ферми обычно имеет довольно сложную форму.

<sup>3</sup> Shubin S. P., Vonsovsky S. V. On the Theory of Metals // Proc. Roy. Soc. 1934. V. A145. P. 159.

тально бесщелевое состояние было обнаружено<sup>4</sup> в 1955—1956 гг. на кристаллах HgTe, в которых дырки значительно тяжелее электронов ( $m_h \gg \gg m_e$ ), и поэтому с хорошей точностью константа Холла  $R_H$  в области собственной проводимости равна  $1/eq_i$ .

Найденная из графика температурной зависимости постоянной Холла с помощью формулы (1) величина щели оказалась необычно малой:  $\epsilon_g < 0.02$  эВ. Такое же значение было найдено из температурной зависимости электропроводности  $\sigma(T)$ , а из термомагнитных эффектов получалось даже, что  $\epsilon_g < 0.02$  эВ, т. е. значительно меньше, чем у известных полупроводников. Так, для полупроводника InSb, у которого прямая щель при волновом векторе  $\vec{k} = \vec{p} / \hbar = 0$  была самой меньшей среди исследованных в то время материалов,  $\epsilon_g$  равнялась 0.24 эВ при  $T=4$  К, т. е. на порядок превышала величину щели в HgTe.

Важно отметить, что значение  $\epsilon_g = 0.02$  эВ меньше средней тепловой энергии электронов.  $^{3/2}k_B T$  во всей области собственной проводимости: при 200 К  $^{3/2}k_B T = 0.026$  эВ, при 525 К эта величина составляет 0.069 эВ. Поскольку оцененная выше по экспериментальным данным величина щели в интервале 200 К  $< T < 525$  К меньше средней тепловой энергии электронов, т. е. теплового размытия краев зон, значение  $\epsilon_g$  указывает лишь верхнюю границу величины щели: если щель есть, она может быть лишь меньше 0.02 эВ. В принципе результаты измерений допускают и вывод о нулевом значении щели.

Формула для  $n_i$  справедлива при  $\epsilon_g > ^{3/2}k_B T$ , когда газы электронов и дырок невырождены, т. е. подчиняются статистике Больцмана. Поэтому значения  $\epsilon_g$ , вычисленные с помощью (1)

для области  $T > 200$  К, где  $\epsilon_g < ^{3/2}k_B T$ , следует рассматривать как грубую оценку. Правильно лишь заключение, что щель должна быть много меньше 0,02 эВ.

Посмотрим теперь, какова должна быть зависимость  $n_i(T)$  для реального собственного бесщелевого полупроводника с  $\epsilon_g = 0$ , поскольку формальный переход в (1) к случаю бесщелевого полупроводника с  $\epsilon_g = 0$  невозможен. У бесщелевого полупроводника, не содержащего примесей, уровень Ферми, разграничивающий заполненные и свободные состояния, должен при  $T=0$  К проходить через точку касания валентной зоны и зоны проводимости. При повышении температуры генерируются электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Вследствие того, что у HgTe масса дырок  $m_h = 0.4m_0$  значительно превосходит массу электронов  $m_e = 0.03m_0$  ( $m_0$  — масса свободного электрона), уровень Ферми  $\epsilon_F$  при  $T > 0$  К попадает в зону проводимости.

Сравнительно несложный анализ уравнения нейтральности для образца HgTe (число электронов  $n$  должно равняться числу дырок  $p$ ) позволяет заключить, что электроны, обладающие меньшей эффективной массой, подчиняются статистике Ферми (электронный газ вырожден), а дырки с большей массой подчиняются статистике Больцмана (газ дырок не вырожден). В результате для собственной концентрации электронов и дырок бесщелевого полупроводника получаем:

$$n_i = p_i = 2m_e m_h^{1/2} \left[ \frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right]^{3/2}. \quad (2)$$

Сопоставляя выражения (1) и (2), мы видим, что зависимости  $n_i(T)$  для полупроводника со щелью и бесщелевого полупроводника кардинально различаются: в обычном полупроводнике концентрация  $n_i$  растет экспоненциально с температурой, тогда как в бесщелевом полупроводнике она изменяется по степенному закону,  $n_i \sim T^{3/2}$ . Экспериментальные зависимости  $R_H = 1/eq_i$  от  $T$  свидетельствуют, что во всей области собственной проводимости, т. е. при

<sup>4</sup> Цидильковский И. М. Эффект Нернста — Эттингсгаузена в сильных магнитных полях // Программа VIII Всес. конфер. по полупроводникам. Л., октябрь 1955 г.; он же. Эффект Нернста—Эттингсгаузена в теллуриде ртути // Журн. техн. физики. 1957. Т. 27. С. 1744.

© Гальченко В. Ф. Бактериальный цикл метана в морских экосистемах.

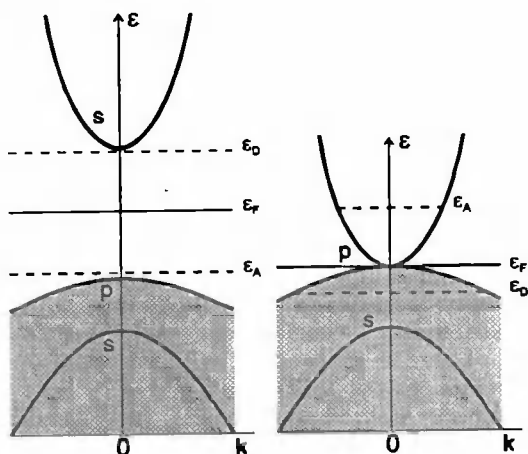


Рис. 2. Зонные схемы полупроводника тиа *InSb* (слева) и бесщелевого полупроводника *HgTe* (справа).

$T > 200$  К, с очень хорошей точностью  $n \sim T^{3/2}$ .

В типичном полупроводнике *InSb* со структурой цинковой обманки (кубическая гранецентрированная решетка) зона проводимости *s*-типа при  $k=0$  не вырождена и отделена щелью от двукратно вырожденной (без учета спина<sup>5</sup>) валентной зоны *p*-типа (рис. 2, слева). Вырождение *p*-зон происходит из соответствующего трехкратного вырождения *p*-уровня в атоме.

Как было установлено впервые С. Гровсом и У. Полом<sup>6</sup>, у серого олова  $\alpha$ -*Sn* зонная структура инвертирована по отношению к таковой в *InSb*. Во многих исследованиях было показано, что и у *HgTe* реализуется обращенная зонная модель (рис. 2, справа). Зона с *s*-симметрией расположена ниже *p*-зон, имеет отрицательную кривизну, и, следовательно, в отличие от случая *InSb*, является валентной зоной. В результате инверсии кривизна одной из вырожденных *p*-зон оказывается положительной (зона про-

водимости), а другой — отрицательной (зона тяжелых дырок). Запрещенная зона, т. е. щель между высшей валентной зоной и низшей зоной проводимости, тождественно равна нулю. Итак, зонная схема *HgTe* обращена по отношению к зонной схеме обычного полупроводника с той же кубической симметрией: *s*-зона расположена ниже *p*-зон и при  $k=0$  имеет максимум, а не минимум, как в *InSb*, т. е. является валентной зоной. Зона же проводимости, касающаяся зоны тяжелых дырок при  $k=0$ , обладает *p*-симметрией. В настоящее время имеется много экспериментальных данных, достоверно подтверждающих обращенную зонную структуру *HgTe*, *HgSe* и  $\alpha$ -*Sn*.

В чем причина возникновения обращенной зонной структуры у бесщелевых полупроводников?

Расчеты зонных структур  $\alpha$ -*Sn* и *HgTe*, выполненные различными методами, показали, что нерелятивистское рассмотрение приводит к «нормальному» порядку зон, как в случаях *Ge* и *InSb*, и лишь учет релятивистских поправок к энергии дает инверсную зонную схему. Таким образом, бесщелевые полупроводники представляют собой уникальную разновидность твердых тел, в которых решающую роль в формировании электронного энергетического спектра играют релятивистские эффекты.

Описанный выше электронный спектр бесщелевого полупроводника справедлив в одноэлектронном приближении, когда рассматривается один электрон в усредненном поле всех других электронов и всех ионов. Однако для бесщелевого полупроводника — и этим он существенно отличается от полупроводника со щелью — оказывается весьма важной роль эффектов, связанных с электрон-электронным взаимодействием. Эти эффекты приводят, например, к появлению в законах дисперсии электронов и дырок  $\epsilon(k)$  наряду с обычными квадратичными по квазиимпульсу  $\hbar k$  членами ( $\epsilon = \hbar^2 k^2 / 2m$ ) еще и линейных членов, которые вносят особенно существенный вклад в энергию дырок.

<sup>5</sup> Спин — квантовое число, характеризующее собственный момент импульса, не связанный с перемещением электрона, т. е. с движением его как целого.

<sup>6</sup> Groves S., Paul W. Band Structure of Gray Tin // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 11. P. 194.



## ПРИМЕСИ

*Немагнитные примеси.* В беспримесном бесщелевом полупроводнике концентрация  $n$  собственных носителей заряда при понижении температуры вплоть до  $T=0$  должна убывать согласно (2) по закону  $n \sim T^{3/2}$ . Однако многочисленные исследования эффекта Холла даже на наиболее чистых бесщелевых кристаллах HgTe и  $\alpha$ -Sn показали, что при  $T < 10$  К наблюдается значительное отклонение от этого закона, причем концентрация электронов при  $T > 0$  стремится к некоторому постоянному значению. Причиной существования остаточной концентрации электронов являются примеси.

В полупроводнике со щелью энергетические уровни электрона или дырки, захваченных атомами примеси, узки и дискретны, если они расположены в энергетической щели (см. рис. 2, слева) и соответствуют локализации носителя заряда на примесном атоме. В бесщелевом полупроводнике примесные уровни, т. е. возможные значения энергий электрона (дырки) на примесном центре, неминуемо попадают в область сплошного спектра разрешенных зон идеального кристалла: акцепторные уровни — в зону проводимости, донорные — в валентную зону (см. рис. 2, справа). Эти состояния не могут быть предельно узкими, а часто и дискретными.

Действительно, скажем, у электрона, локализованного на акцепторе, есть возможность перейти в делокализованные состояния зоны проводимости с той же энергией — для такого перехода не требуется дополнительной энергии. Время пребывания электрона на акцепторе (время жизни  $\tau_1$ ) здесь уже не бесконечно, как в случае акцепторного уровня в щели обычного полупроводника. Поэтому, согласно принципу неопределенности, этот уровень должен размыться, т. е. приобрести конечную ширину  $\sim \hbar/\tau_1$ . Это так называемое естественное уширение уровня<sup>7</sup>.

Итак, первая особенность примес-

ных состояний в бесщелевом полупроводнике состоит в том, что они расположены на фоне сплошного спектра идеального кристалла, т. е. являются, как говорят, резонансными. Поэтому состояния электрона (или дырки) на примеси не полностью связаны (локализованы), а квазилокализованы.

Другая особенность примесных состояний в бесщелевом полупроводнике заключается в необычном, обратном расположении донорных и акцепторных уровней (см. рис. 2). Донорные уровни, отщепленные от зоны проводимости возмущающим потенциалом дефекта, попадают в валентную зону и располагаются ниже акцепторных, которые оказываются в зоне проводимости. Наличие примесных уровней на фоне сплошного спектра зон приводит к ряду особенностей электронных свойств бесщелевых полупроводников. Так, у бесщелевых полупроводников, содержащих акцепторы, при повышении температуры электроны из состояний зоны проводимости, лежащих по энергии ниже акцепторных уровней, «забрасываются» на эти уровни и становятся связанными. Поэтому концентрация зонных электронов с увеличением температуры в определенном температурном интервале уменьшается. При дальнейшем повышении температуры число свободных мест на акцепторах истощается, и электроны возбуждаются из валентной зоны в состояния зоны проводимости, расположенные выше акцепторного уровня, и концентрация зонных электронов увеличивается. Таким образом, с ростом температуры концентрация зонных электронов в бесщелевом полупроводнике с акцепторами, в отличие от обычного полупроводника, сначала убывает и лишь затем начинает расти.

<sup>7</sup> Кроме естественного возникает еще концентрационное уширение, поскольку при достаточно высокой концентрации акцепторов волновые функции соседних акцепторов перекрываются, и уровень расплывается в акцепторную зону.

**Примеси переходных элементов.** Примеси переходных элементов — Mn, Fe, Co, Ni и т. д. — в бесщелевых полупроводниках представляют особый интерес<sup>8</sup>. Атомы этих элементов с незаполненными d-оболочками обладают отличным от нуля магнитным моментом. В кристаллической решетке бесщелевых кристаллов халькогенидов ртути (HgSe, HgTe) они замещают часть атомов ртути, образуя твердые растворы. Это — так называемые полумагнитные полупроводники, или разбавленные магнитные полупроводники. Интерес к ним определяется большим своеобразием их свойств.

Изменяя состав многокомпонентных полумагнитных полупроводников (HgMnTe, HgFeSe и т. д.), можно варьировать постоянную кристаллической решетки, энергетическую щель между зонами, эффективные массы носителей заряда и другие важные параметры. Изменение состава этих твердых растворов позволяет перестраивать электронный спектр, в частности, превращать бесщелевой полупроводник в полупроводник со щелью.

С точки зрения возможностей изучения электронных свойств полумагнитные полупроводники обладают несомненными достоинствами в сравнении с традиционными магнитными полупроводниками (которые в действительности являются диэлектриками) с широкой энергетической щелью, типа EuO или MnTe, поскольку для них надежно установлена зонная структура матрицы (например, HgTe). Кроме того, высокая подвижность зонных электронов в полумагнитных полупроводниках, на много порядков превосходящая подвижность в магнитных полупроводниках, позволяет использовать практически

весь арсенал современных методов исследования физических свойств твердых тел (циклотронный резонанс, оптические и магнитооптические методы, в том числе в длинноволновом диапазоне, кинетические явления при низких и сверхнизких температурах и в сильных магнитных полях и др.).

Переходные элементы, как и другие примеси, образуют в бесщелевых полупроводниках резонансные уровни. Для кристаллов HgSe и HgTe примесные уровни переходных металлов располагаются в весьма широком энергетическом интервале. Так, уровень иона  $Mn^{2+}$  лежит глубоко в валентной зоне, далеко от ее края и уровня Ферми и не влияет на явления переноса, тогда как ионы  $Fe^{2+}$ ,  $Cr^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  и т. д. образуют донорные уровни, расположенные относительно недалеко от дна зоны проводимости и уровня Ферми, и поэтому вносят существенный вклад в кинетические эффекты.

**Свойства кристаллов HgSe:Fe.** Бесщелевые полупроводники типа HgSe, содержащие железо, хром, кобальт, никель, — сравнительно новые представители класса полумагнитных полупроводников: их начали исследовать в 1985—1986 гг. Мы рассмотрим свойства наиболее изученного из этих материалов — селенида ртути, легированного железом (HgSe:Fe). Растворимость железа в HgSe достигает 20%. Ионы  $Fe^{2+}$ , размещающиеся в узлах регулярной решетки HgSe на местах ионов  $Hg^{2+}$ , в решетке являются нейтральными донорами, энергетический уровень которых расположен выше края зоны проводимости на 210 мэВ.

У кристаллов HgSe, содержащих железо, обнаружен ряд необычных физических свойств — «аномалий». Расскажем о наиболее важных из них и проанализируем причины их возникновения.

На рис. 3 приведена зависимость концентрации электронов  $n$  от содержания железа  $N_{Fe}$  в HgSe при 4.2 К. У образцов с содержанием железа  $N_{Fe} < N_{Fe}^* \approx 4.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$   $n$  растет пропорционально  $N_{Fe}$ , а при  $N_{Fe} > N_{Fe}^*$  перестает

<sup>8</sup> Подробное изложение вопроса об «аномалиях» электронных свойств бесщелевых полупроводников, легированных переходными элементами, можно найти в обзоре: Цидильковский И. М. Бесщелевые полупроводники с магнитными примесями, образующими резонансные донорные состояния // Успехи физ. наук. 1992. Т. 162. № 2. С. 63; он же. Электронный спектр бесщелевых полупроводников. Свердловск, 1991.

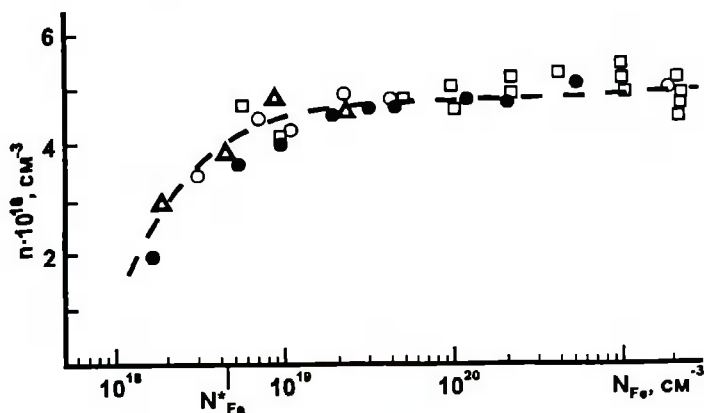


Рис. 3. Концентрация электронов  $n$  как функция концентрации  $N_{Fe}$  атомов железа в  $HgSe$  при 4.2 К.

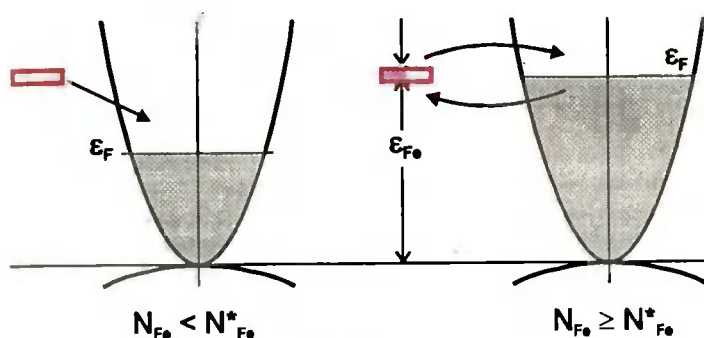


Рис. 4. Схематическое изображение зоны проводимости  $HgSe$  с донорным уровнем железа  $\epsilon_{Fe}$ .

расти, достигая насыщения при  $N_{Fe}^* = n \approx 4.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Это совершенно неожиданно: можно было ожидать, что, как и при низком содержании железа, концентрация электронов  $n$  будет продолжать возрастать пропорционально  $N_{Fe}$ . Именно такой рост  $n$  характерен для примесной проводимости, когда каждый атом примеси поставляет один электрон в зону проводимости. Аномальную зависимость  $n(N_{Fe})$  удастся объяснить, если предположить, что ионы  $Fe^{2+}$  образуют резонансный уровень, расположенный в зоне проводимости (рис. 4).

Действительно, при  $N_{Fe} < N_{Fe}^*$  уровень Ферми лежит ниже уровня железа, и все ионы  $Fe^{2+}$  автоионизируются, т. е. каждый ион  $Fe^{2+}$  отдает электрон в зону проводимости, превращаясь в ион  $Fe^{3+}$ . Когда концентрация железа достигает  $N_{Fe}^*$ , уровень Ферми  $\epsilon_F$  поднимается до уровня железа  $\epsilon_{Fe}$  и захватывается им.

Дальнейшее увеличение концент-

рации железа не изменяет концентрации электронов: продолжение ионизации доноров  $Fe^{2+}$  при  $N_{Fe} > N_{Fe}^*$  энергетически невыгодно. Образуется смешанная система ионов  $Fe^{2+}-Fe^{3+}$ , причем  $N_{Fe^{2+}} = N_{Fe^{3+}} \approx 4.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а  $N_{Fe^{2+}}$  может достичь значений  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ .

Ряд экспериментальных фактов подтверждает захват уровня Ферми уровнем железа при концентрациях  $N_{Fe} > N_{Fe}^*$ . Приведем один из них, а именно — влияние всестороннего давления на эффект Холла, а значит, и на концентрацию электронов  $n = 1/e|R|$ . Всестороннее давление как изотропное воздействие не вызывает расщепления вырожденных р-зон, но уменьшает зазор между р-зоной проводимости и s-зоной легких дырок (см. рис. 2, справа). Результатом такого воздействия является уменьшение плотности состояний (числа состояний в единичном интервале энергий) в зоне проводимости. При этом можно представить себе два варианта развития

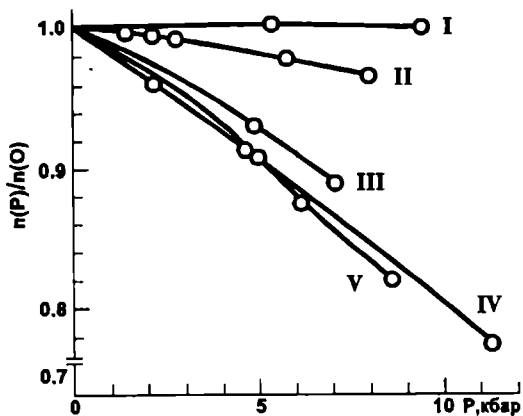


Рис. 5. Изменение концентрации электронов в HgSe:Fe под действием всестороннего давления  $P$  при 4.2 К. I —  $N_{Fe} = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , II —  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , III —  $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , IV —  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , V —  $20 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

событий. Первый: число электронов в зоне проводимости остается неизменным. Поскольку в зоне стало меньше состояний под уровнем Ферми, которые электроны могут занять, уровень Ферми должен сместиться выше по энергии (чтобы увеличилось число состояний, которые электроны могли бы заселить). Второй: уровень Ферми фиксирован. Тогда, если приложить давление, ниже уровня Ферми не хватит состояний для всех электронов, которые были в зоне проводимости, и следовательно, их число в зоне должно уменьшиться. Итак, можно проверить: если под действием давления  $P$  концентрация электронов  $n$  не меняется, то должен сдвигаться уровень Ферми. Если же концентрация  $n(P)$  убывает — это верный признак неизменного положения уровня Ферми. На рис. 5 показаны результаты измерений  $n(P)$  для пяти образцов HgSe:Fe с разным содержанием железа. Видно, что при  $N_{Fe} < N_{Fe}^*$ , когда уровень Ферми находится ниже уровня железа (см. рис. 4), концентрация электронов практически не меняется с давлением (уровень Ферми имеет возможность смещаться вверх). Если же  $N_{Fe} > N_{Fe}^*$  концентрация электронов уменьшается с давлением, что является прямым свидетельством

захвата уровня Ферми уровнем железа. При  $N_{Fe} > N_{Fe}^*$  электроны уходят из зоны проводимости и нейтрализуют трехвалентные ионы железа, превращаясь в ионы  $Fe^{2+}:Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$ .

Расскажем теперь об «аномалиях» подвижности электронов  $\mu$ . Начнем с температурной зависимости  $\mu(T)$ . Для образцов с концентрациями  $N_{Fe} < N_{Fe}^*$  в интервале 4.2 К  $< T < 100$  К экспериментальные кривые  $\mu(T)$  вполне удовлетворительно согласуются с кривыми, рассчитанными на основе стандартной теории для случая рассеяния на неупорядоченной системе ионов примеси (рис. 6, справа). (При температурах от 100 до 300 К в расчете необходимо было учесть и рассеяние на колебаниях атомов решетки, которые при  $T > 100$  К вносят существенный вклад.) Это согласие подтверждает приведенное выше заключение: когда уровень Ферми находится ниже уровня железа, все доноры ионизованы и образуют хаотическую совокупность заряженных центров.

Что же касается образцов HgSe с  $N_{Fe} > N_{Fe}^*$ , то результаты первых же измерений подвижности электронов оказались совершенно неожиданными: при понижении температуры в области 4 К  $< T < 100$  К величины подвижности  $\mu$  возрастают и заметно превышают значения  $\mu$ , вычисленные в предположении неупорядоченного распределения доноров по кристаллу (см. рис. 6). (Заметим, что последние совпадают с подвижностями в образцах HgSe, легированных немагнитными примесями, скажем Ga или In.)

Для объяснения этой аномалии И. Мыцельский выдвинул интересную идею<sup>9</sup>: распределение доноров  $Fe^{2+}$  по узлам металлической подрешетки  $Hg^{2+}$  хаотическое, но вследствие кулоновского взаимодействия между заряженными донорами  $Fe^{3+}$ , если их доля невелика

<sup>9</sup> Mycielski J. Formation of a Superlattice of Ionized Resonant Donors or Acceptors In Semiconductors // Sol. State Commun. 1986. V. 60. P. 165.

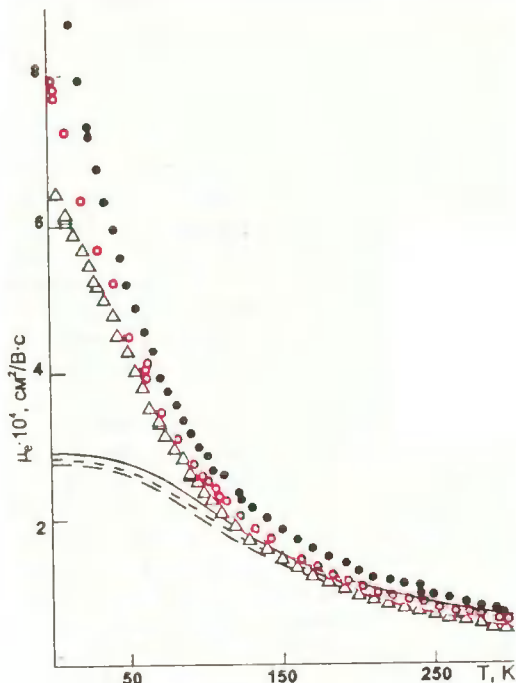
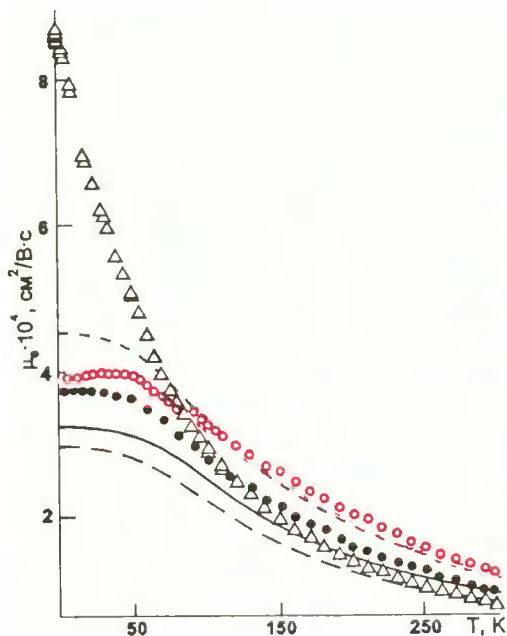


Рис. 6. Температурные зависимости подвижности  $\mu_e$  электронов в кристаллах HgSe:Fe. Слева — экспериментальные точки для концентраций железа  $N_{Fe}=1.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (цветные кружки),  $N_{Fe}=5.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (черные кружки),  $N_{Fe}=9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (треугольники). Для этих же концентраций приведены расчетные кривые, полученные в предположении хаотического расположения центров рассеяния. Справа — экспериментальные точки для

концентраций  $N_{Fe}=1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (черные кружки),  $N_{Fe}=5.4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (цветные кружки),  $N_{Fe}=9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (треугольники). На этом рисунке также представлены кривые, рассчитанные в том же предположении, что и на левом рисунке.

( $N_{Fe^{2+}}/N_{Fe^{3+}} \ll 1$ ), возникает корреляция их пространственного расположения. Положительные заряды образуются на тех донорах  $Fe^{2+}$ , которые наиболее удалены друг от друга. В пределе  $N_{Fe^{2+}} \gg N_{Fe^{3+}} = n$  ионизованные доноры  $Fe^{3+}$  должны при низких температурах образовывать строго упорядоченную структуру — идеальный кристалл заряженных доноров. Разумеется, если все хаотически расположенные доноры ионизованы (т. е. все ионы  $Fe^{2+}$  превратились в ионы  $Fe^{3+}$ ), то упорядочения не возникает, так как положения всех доноров как заряженных ( $Fe^{3+}$ ), так и нейтральных ( $Fe^{2+}$ ) в решетке фиксированы. Положения же заряженных доноров могут меняться лишь вследствие перемещений электронов между атомами железа.

Итак, согласно Мыцельскому, в кристаллах HgSe:Fe может возникнуть коррелированное расположение заряженных доноров  $Fe^{3+}$ , которые при низких температурах служат основными центрами рассеяния электронов. Эта гипотеза могла бы объяснить рост подвижности при понижении температуры ( $T \rightarrow 0$ ). В предельном случае строго периодической решетки атомов железа электрон пройдет сквозь нее, как через идеальный кристалл, не испытывая рассеяния. Длина свободного пробега  $l$  между двумя актами рассеяния и подвижность  $\mu$  в этом случае бесконечны. Бесконечна и проводимость, т. е. электросопротивление равно нулю. Длина свободного пробега становится конечной, если электрон встречается с отклонениями от регуляр-

ности решетки: вакансиями, колебаниями атомов решетки и другими дефектами.

Каковы условия, необходимые для возникновения пространственной корреляции заряженных примесей  $Fe^{3+}$  в кристаллах  $HgSe:Fe$ ? Во-первых, не все примеси должны быть ионизованы, т. е. необходимо сосуществование двух зарядовых состояний железа —  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ . Во-вторых, состояния  $Fe^{3+}$  должны быть долгоживущими. Для этого нужно, чтобы гибридизация (смешивание) примесных состояний между собой и с зонными состояниями была слабой.

Как показывает анализ ряда экспериментальных данных, оба эти условия для  $HgSe:Fe$  выполняются. Сосуществование ионов  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  было впервые доказано измерениями осциллирующей сопротивленности в магнитном поле, а затем подтверждено исследованиями электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Анализ ЭПР показал также, что и второе условие пространственной корреляции ионов  $Fe^{3+}$  выполняется — донорные состояния  $Fe^{3+}$  в  $HgSe$ , действительно, долгоживущие. То, что межпримесная гибридизация доноров  $Fe$  должна быть весьма слабой, нетрудно понять:  $d$ -уровни атома являются более локализованными, чем  $s$ - и  $p$ -уровни, и, следовательно, перекрытие волновых функций  $d$ -типа соседних примесей мало. Гибридизация примесных состояний с зонными также должна быть слабой, поскольку плотность зонных состояний вблизи уровня Ферми  $g(\epsilon_F)$  в  $HgSe$  сравнительно мала и естественная ширина примесного уровня  $\Gamma \sim g(\epsilon_F)$  тоже мала.

К сожалению, несомненно привлекательная модель Мыцельского не может быть непосредственно использована для интерпретации экспериментальных результатов. Во-первых, радиус экранирования  $r$ , потенциала заряженно-го центра<sup>10</sup> в  $HgSe:Fe$  меньше средне-

го расстояния  $r_1 \approx N^{-1/3}$  между ионами  $Fe^{3+}$ . Экранирование ослабляет кулоновское взаимодействие между ионами  $Fe^{3+}$ , и трудно ожидать формирования строго регулярной решетки заряженных доноров. Можно говорить лишь о большей или меньшей степени упорядочения ионов  $Fe^{3+}$ , скажем, об образовании островков регулярной решетки (как говорят, о ближнем порядке), или, иными словами, о некоторой корреляции в пространственном расположении ионов  $Fe^{3+}$ . Во-вторых, «аномалия»  $\mu(T)$ , как и «аномалия»  $\mu(N_{Fe})$ , о которой речь будет идти ниже, начинается при концентрациях железа  $N_{Fe} \approx N_{Fe}^*$ , тогда как в модели Мыцельского строгая периодичность в системе ионов  $Fe^{3+}$ , приводящая к увеличению подвижности, может возникнуть лишь, если  $N_{Fe}^*$  много больше  $N_{Fe}$ , строго говоря, если  $(N_{Fe}^*/N_{Fe}) \rightarrow \infty$ . В пределе, когда все атомы железа трехкратно заряжены  $N_{Fe} \approx N_{Fe}^*$ , как уже отмечалось, совокупность ионов полностью разупорядочена.

Итак, ясно, что совокупность ионов  $Fe^{3+}$  следует рассматривать как неупорядоченную систему с ближним порядком, в которой короткодействующие корреляции обусловлены кулоновским отталкиванием. Для описания такой системы могут быть использованы методы, разработанные в теории жидкого состояния, которые, в частности, оказались весьма полезными для изучения электронных свойств жидких металлов и расплавов. Прежде чем говорить о применении этих методов к системе  $HgSe:Fe$  следует пояснить, в чем состоит различие подходов к описанию кристаллов и неупорядоченных структур.

С физической точки зрения кристалл представляет собой очень большое число атомов или ионов, однородно распределенных по регулярным рядам и плоскостям. Из периодического расположения атомов в узлах

<sup>10</sup> Кулоновский потенциал заряда  $U=e^2/r$  является дальнедействующим ( $U=0$  при  $r \rightarrow \infty$ ). Электроны, окружающие заряд, экранируют его, т. е.

уменьшают расстояние, на котором потенциал равен  $U$ . Радиус экранирования  $r$ , есть расстояние от заряженного центра, на котором потенциал уменьшается в  $e$  раз.



решетки следует, что кристалл совместится сам с собой, если сместить все атомы на вектор  $\vec{I} = l_1 \vec{a}_1 + l_2 \vec{a}_2 + l_3 \vec{a}_3$ , где  $l_i$  — целые числа, а  $\vec{a}_i$  — периоды, или трансляционные векторы, решетки ( $i=1, 2, 3$ ). Математически суть дела состоит в том, что кристаллическая решетка инвариантна относительно трансляции: все физические характеристики в некоторой точке  $\vec{r}$  точно воспроизводятся в любой другой точке с координатами  $\vec{r} + \vec{I}$ , т. е.  $F(\vec{r} + \vec{I}) = F(\vec{r})$ , где  $F$  — некоторая физическая характеристика. Это позволяет аналитически описать кристаллическую структуру.

В отсутствие дальнего порядка невозможно задать координаты всех случайным образом расположенных  $N$  частиц, которых в одном кубическом сантиметре может быть  $\sim 10^{22}$ . Поэтому такую хаотическую систему можно характеризовать только через статистические параметры. Необходимо пользоваться функциями распределения. Функция распределения есть вероятность найти атом 1 в объеме  $V_1$  вблизи точки  $\vec{r}_1$ , атом 2 в объеме  $V_2$  — вблизи точки  $\vec{r}_2$  и т. д. Практически все результаты измерений, зависящих от расположения частиц в твердом теле, могут быть описаны так называемой бинарной функцией распределения  $g(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ , которая в силу пространственной однородности системы частиц зависит только от вектора  $\vec{r}_{12} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$ , соединяющего точки  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ . Масштаб локального порядка определяется как расстояние, за пределами которого функция  $g(\vec{r}_{12}) \approx 1$ .

Информация о структуре изотропного тела может быть получена с помощью радиальной функции распределения  $g(\vec{r})$  (в этом случае  $g(\vec{r}_{12}) \equiv g(r)$ ). Задача заключается в том, чтобы найти связь между функцией  $g(r)$ , описывающей вероятность относительного пространственного расположения совокупности частиц, и потенциалом взаимодействия между частицами  $U(r)$ . Решение задачи требует трудоемких численных расчетов. Поэтому приходится прибегать к феноменологическому рассмотрению интуитивного характера. Одним из наиболее плодотворных является метод интегральных уравнений, с помощью которого ищутся приближенные уравнения, связывающие  $g(r)$  и  $U(r)$ . Напомним, что наша цель — найти зависимость подвижности электронов от температуры (время свободного пробега между двумя актами рассеяния = времени релаксации). Мы, разумеется, не будем здесь приводить довольно утомительные выкладки, а изложим лишь основную канву расчета<sup>11</sup>.

Сначала предполагается что функцию  $g(\vec{r}_{12})$  можно представить в виде суммы двух частей, одна из которых описывает прямую корреляцию атомов 1 и 2, а другая — непрямую корреляцию, которая является результатом взаимодействия с более удаленными атомами. Для не очень плотных систем, когда можно пренебречь вероятностью того, что третий атом окажется на расстоянии, меньшем радиуса действия потенциала  $U(\vec{r}_{12})$  от атомов 1 и 2, функция распределения дается выражением:

$$g(\vec{r}_{12}) \approx \exp[-U(\vec{r}_{12})/k_B T]. \quad (3)$$

В качестве потенциала взаимодействия между заряженными донорами казалось естественным выбрать экранированный кулоновский потенциал  $U(r_{12}) \approx (e^2/\kappa r_{12}) \exp(-r_{12}/r_i)$ , где  $\kappa$  — диэлектрическая проницаемость кристалла. Однако это выражение для  $U$  справедливо только для медленно меняющегося в пространстве потенциала, скажем, на расстояниях  $r \sim r_i$  ( $r_i$  — среднее расстояние между ионами  $Fe^{3+}$ ). В нашей задаче радиус экранирования  $r$ , мал,  $r < r_i$ , и потенциал  $U(r)$  не является медленно меняющимся. Поэтому необходимо было обратиться к квантовой теории экранирования и в качестве  $U(\vec{r}_{12})$  выбрать квантовый

<sup>11</sup> Цидильковский И. М., Кулеев И. Г., Ляпилин И. И. Аномалия рассеяния электронов на коррелированной системе заряженных доноров // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. С. 326.

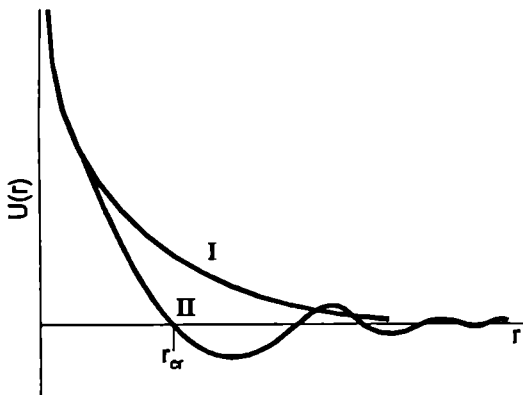


Рис. 7. Изменение потенциала взаимодействия  $U(r)$  между ионами  $Fe^{3+}$  с расстоянием  $r$  согласно классической (I) и квантовой (II) теории экранирования.

потенциал  $U_{KB}(\vec{r})$ , который изменяется в пространстве при малых  $\vec{r}$  быстрее, чем приведенный выше полуклассический потенциал  $U(\vec{r}_{12})$  (рис. 7). Потенциал  $U_{KB}(\vec{r})$  подставляется в выражение (3) для функции распределения  $g(\vec{r})$ , которая используется для расчета структурного фактора  $S$ . Последний учитывает расположение хаотически разбросанных центров рассеяния электронов. Затем с помощью  $S$  вычисляется время релаксации  $\tau(T)$  и подвижность  $\mu(T)$ .

Сравнение рассчитанной зависимости подвижности от температуры для концентраций железа  $N_{Fe} = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  с экспериментальными величинами  $\mu(T)$  показывает, что кривые практически совпадают. Столь хорошее согласие экспериментальных данных с результатами расчета, в котором не использовался ни один подгоночный параметр, казалось неправдоподобным. Доверие к этим результатам укрепили расхождения между опытными и теоретическими кривыми для малых концентраций  $N_{Fe} < 1.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Эти расхождения связаны с тем, что при малых величинах  $N_{Fe}$ , когда концентрация ионов  $N_{Fe^{3+}}$  ненамного меньше полной концентрации атомов железа  $N_{Fe}$ , корреляция в пространственном распределении  $N_{Fe^{3+}}$  хуже, чем при  $N_{Fe} \gg N_{Fe^{3+}}$ , поскольку при  $N_{Fe} \gg N_{Fe^{3+}}$  система ионов  $N_{Fe^{3+}}$  более хаотизирована.

Теперь ответим на вопрос: почему функция  $\mu(T)$  для  $HgSe:Fe$  не постоянна в области низких температур, как того требует классическая теория рассеяния на ионизованных примесях? При конечной температуре  $T > 0$  электроны мигрируют между ионами  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ . С повышением температуры эта миграция усиливается, и кулоновские корреляции между заряженными донорами  $Fe^{3+}$  ослабевают, система примесных ионов  $Fe^{3+}$  все больше хаотизируется, и следовательно, вероятность рассеяния электронов на них возрастает, а подвижность  $\mu$  падает. Происходит как бы переход из состояния коррелированной жидкости при низких температурах в газообразное состояние при высоких температурах.

Еще более интригующей, чем температурная «аномалия» подвижности, оказалась зависимость подвижности от концентрации железа  $\mu(N_{Fe})$ . При низких температурах  $T < 100 \text{ К}$  у образцов  $HgSe$  с концентрациями железа в интервале от  $4.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  подвижности заметно превышают подвижности в образцах  $HgSe$  с немагнитными примесями, например с галлием, причем в интервале значений  $N_{Fe}$  от  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$   $\mu(N_{Fe})$  возрастает примерно в пять раз, а при  $N_{Fe} > 2 \cdot 10^{19}$  монотонно убывает (рис. 8). На этом рисунке приведена также кривая  $\mu(N_{Fe})$ , рассчитанная на основе стандартной теории рассеяния на неупорядоченной системе примесных ионов. Рост  $\mu(N_{Fe})$  при увеличении концентрации железа до  $N_{Fe} \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  казался аномальным потому, что, согласно установившимся представлениям, рассеяние электронов должно усиливаться, а их подвижность падать при увеличении содержания примесей, служащих при низких температурах главными рассеивающими центрами. Загадочным казалось также убывание при  $N_{Fe} > 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Эти «аномалии» проявляются только в области температур  $T < 100 \text{ К}$ , когда основными источниками рассеяния электронов являются дефекты регулярной кристаллической структуры, в частности атомы примеси.

При высоких температурах, когда основной вклад в рассеяние вносят тепловые колебания атомов решетки, эти «аномалии» исчезают.

Очевидной причиной роста подвижности  $\mu(N_{Fe})$  при увеличении концентрации железа, как и убывания  $\mu(T)$  при увеличении  $T$ , является постепенное упорядочение совокупности ионов  $Fe^{3+}$ . Качественно и количественно объяснить рост кривой  $\mu(N_{Fe})$  удалось с помощью модели короткодействующих корреляций<sup>12</sup>. Однако в интерпретации зависимости подвижности от содержания железа в образце есть существенная особенность, которая была для нас не столь важна при объяснении зависимости  $\mu(T)$ . Речь идет о различиях в характере рассеяния электронов при малых и больших концентрациях железа. Совокупность ионов  $Fe^{3+}$  мы рассматриваем как систему твердых шаров, пространственное упорядочение которых определяется взаимодействием между ними. Совокупность твердых шаров удобно описывать параметром упаковки  $\eta$ , который представляет собой долю всего объема системы, заключенного внутри шаров. Величина по существу определяет степень заполнения веществом данного объема. Для регулярной плотной упаковки твердых сфер  $\eta=0.74$ , для кристалла с кубической гранцентрированной решеткой  $\eta=0.68$ . Для жидкости, в которой существует ближний порядок,  $\eta=0.45$ , а для полностью разупорядоченной совокупности твердых шаров  $\eta=0.125$ .

Расчет концентрационной зависимости подвижности  $\mu(N_{Fe})$ , выполненный в модели короткодействующих корреляций примерно по такой же схеме, что и расчет  $\mu(T)$ , привел к хорошему согласию с экспериментом в области концентраций  $N_{Fe} \leq 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Было показано, что при достаточно низких концентрациях железа  $N_{Fe} < 5.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,

когда  $N_{Fe} \ll \ll N_{Fe}$ , кулоновские корреляции между ионами  $Fe^{3+}$  весьма слабы и система ионов  $Fe^{3+}$  близка к газообразному (неупорядоченному) состоянию, для которого коэффициент упаковки  $\eta=0.125$ . По мере увеличения содержания железа в  $HgSe$ , когда  $N_{Fe}$  становится больше  $N_{Fe}$  кулоновские корреляции между ионами  $Fe^{3+}$  усиливаются, и совокупность заряженных доноров  $Fe^{3+}$  все больше упорядочивается и трансформируется в систему с ближним порядком — в «кулоновскую жидкость», для которой коэффициент упаковки  $\eta=0.45$ . При увеличении степени порядка в системе ионов  $Fe^{3+}$  рассеяние электронов на них ослабляется и подвижность возрастает. Согласно оценкам, подвижность электронов должна достичь предельного значения при концентрации железа  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и при дальнейшем увеличении  $N_{Fe}$  не должна изменяться. Однако на опыте при  $N_{Fe} > 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  подвижность  $\mu(N_{Fe})$  уменьшается (рис. 8). Какова причина этого уменьшения?

Ионы  $Fe^{2+}$  замещают в узлах регулярной решетки  $HgSe$  ионы  $Hg^{2+}$  и создают таким образом дополнительный источник рассеяния электронов, поскольку потенциал иона  $Fe^{2+}$  отличается от потенциала  $Hg^{2+}$ . Это так называемое сплавное рассеяние. Если совокупность ионов  $Fe^{3+}$  неупорядочена (при малом содержании железа в образце), рассеяние на ионах  $Fe^{3+}$  доминирует, и роль рассеяния электронов на сплавном потенциале мала. Когда же система доноров  $Fe^{3+}$  упорядочивается, рассеяние электронов на них существенно ослабляется, и вклад сплавного рассеяния становится определяющим. Вклад этот тем больше, чем больше ионов  $Fe^{2+}$ , и, следовательно, с увеличением содержания железа в  $HgSe$  подвижность электронов должна падать. Теоретические кривые, учитывающие корреляции доноров  $Fe^{3+}$  и сплавное рассеяние, хорошо описывают наблюдаемые монотонные зависимости  $\mu(N_{Fe})$ , приведенные на рис. 8.

Хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными зависи-

<sup>12</sup> Кулеев И. Г., Ляпилин И. И., Цидильковский И. М. Проблема концентрационной аномалии подвижности электронов в  $HgSe:Fe$  // ЖЭТФ. 1992. Т. 102. С. 1652.

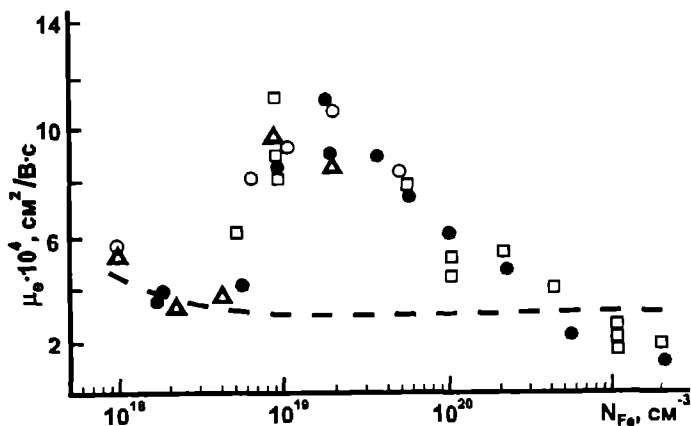


Рис. 8. Зависимость подвижности  $\mu_e$  электронов от концентрации  $N_{Fe}$  железа в  $HgSe:Fe$  при 4.2К. Штриховая линия — результат расчета для рассеяния на неупорядоченной совокупности примесных ионов.

мостями подвижностей электронов от температуры и содержания железа в кристаллах  $HgSe$  свидетельствует о том, что в системе заряженных доноров  $Fe^{3+}$  действительно устанавливается ближний порядок, который совместно со сплавным потенциалом ответствен за наблюдаемые «аномалии» в рассеянии электронов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, в 1955—1956 гг. мы установили, что у кристаллов  $HgTe$  прямая щель очень мала, а возможно и равна нулю. Однако, когда эти результаты были доложены на VIII Всесоюзной конференции по полупроводникам в октябре 1955 г. в Ленинграде, некоторые известные ученые весьма скептически отнеслись к возможности существования структур такого типа (рис. 1, г), считая, что это скорее полуметалл (рис. 1, в) или случайное вырождение термов (рис. 1, д). Последнее утверждение просто противоречило результатам наших измерений магнитосопротивления. Статья с нашими результатами пролежала более полутора лет в редакции ЖТФ и получила отрицательную рецензию. Рецензент писал, что трудно, если вообще возможно, представить себе твердое тело с нулевой прямой щелью, поскольку такое касание зон должно быть связано с фундаментальным вырождением электронных состояний,

обусловленным симметрией кристалла, а не пересечением термов в точке  $k=0$ . А такое фундаментальное вырождение зон ни в каких кристаллах со структурой цинковой обманки и алмаза раньше не наблюдалось. Лишь благодаря вмешательству главного редактора журнала А. Ф. Иоффе статья увидела свет в 1957 г., да и то со значительными купюрами.

Научная общественность среагировала немедленно. Уже в 1958 г. в американских журналах было опубликовано несколько статей, в которых наши результаты воспроизводились и обсуждались. В дальнейшем число публикаций о новом классе вещества стало резко возрастать. Были организованы специализированные конференции по бесщелевым и узкощелевым полупроводникам, которые, кстати, проводятся регулярно до сих пор. Так что открытие бесщелевого состояния послужило началом нового перспективного направления в физике твердого тела.

Теперь можно говорить уже о широком практическом применении бесщелевых полупроводников, прежде всего в электронике в качестве материала для приемников и генераторов электромагнитного излучения широкого диапазона частот — от радио до инфракрасных. В фотоприемниках, принцип действия которых основан на внутреннем фотоэффекте, в случае традиционных полупроводников ( $Si$ ,  $InSb$ ) используется примесная фотопро-

водимость, тогда как в приборах на основе бесщелевых полупроводников ( $\text{HgCdTe}$ ,  $\text{HgZnSe}$ ) — собственная фотопроводимость. Поскольку собственное поглощение света гораздо эффективнее, чем примесное, заданный уровень генерируемой или детектируемой мощности достигается при собственной фотопроводимости в значительно меньшем (на три-четыре порядка) объеме вещества, чем в случае примесной. Это позволяет создавать многоэлементные приемники, повышать пространственное разрешение и направленность приема излучения. Другое достоинство фотодетекторов на собственной проводимости — возможность их эксплуатации при более высоких температурах (вплоть до комнатных).

Еще одна разновидность детекторов излучения — фотодиоды, в которых излучение регистрируется по фотоэдс, возникшей между областями с дырочной и электронной проводимостями. Основным направлением развития детекторов изображения в инфракрасном диапазоне является разработка матричных приемников, в которых миниатюрные фотодетекторы, изготовленные на одной полупроводниковой пластине, располагаются в шахматном порядке и образуют матрицу, способную преобразовывать световые сигналы в электрические, а дальше, с помощью обычной телевизионной техники, — в видимые изображения.

Фотоприемники, изготовленные из узкощелевых полупроводников на основе бесщелевых кристаллов, обладают огромным преимуществом перед де-

текторами излучения из обычных полупроводников: величина щели, а следовательно, и граничная частота излучения регулируется с помощью внешних воздействий, т. е. можно создавать приемники и генераторы излучения с управляемой областью спектральной чувствительности. Величину  $\epsilon_g$  можно менять магнитным полем или давлением. Однако, на практике удобнее ее варьировать путем сплавления бесщелевого полупроводника с  $\epsilon_g < 0$  ( $\text{HgTe}$ ) с полупроводником с широкой щелью  $\epsilon_g > 0$  ( $\text{CdTe}$ ). Приемники из  $\text{HgCdTe}$  чувствительны во всей инфракрасной области спектра, но используют их прежде всего в диапазонах атмосферных «окон» — в интервалах длин волн, в которых атмосфера прозрачна для инфракрасных лучей — от 8 до 14 и от 3 до 5 мкм.

Кроме того, из бесщелевых полупроводников  $\text{HgCdTe}$  изготавливаются превосходные датчики Холла, применяемые для измерения магнитных полей. Заметим еще, что эти кристаллы используются также в качестве материалов для термоэлементов и холодильников, поскольку их термоэлектрическая активность превосходит эффективность полупроводниковых материалов, использовавшихся до сих пор. При низких температурах (50—90 К) термоэлементы и холодильники на основе бесщелевых полупроводников обладают наиболее высоким КПД.

Итак, бесщелевые полупроводники представляют собой не только очень интересные объекты для научного исследования, но и имеют очень широкий спектр практического применения.

# Противоастероидная защита Земли

Р. В. Алимов, Е. В. Дмитриев



*Ростислав Викторович Алимов, кандидат технических наук, начальник Конструкторского бюро «Салют» — филиала Государственного космического научно-производственного центра им. М. В. Хруничева, член-корреспондент академии космонавтики РФ. Занимается анализом перспектив развития космической техники.*



*Евгений Валентинович Дмитриев, главный специалист отдела того же Конструкторского бюро. Имеет ряд публикаций по проблемам текститов, комет, Тунгусского метеорита и астероидной опасности. Развивает эруптивную гипотезу происхождения комет.*

**А**СТЕРОИДНАЯ опасность привлекает все большее внимание мирового сообщества. Происходит постепенное осознание тех катастрофических последствий, которые может иметь встреча Земли с крупными астероидами, кометами и их обломками. Определенную остроту проблеме придало последнее событие на Юпитере — падение на него обломков кометы Шумейкеров — Леви-9. Если бы взрывы такой мощности произошли на Земле, это означало бы конец цивилизации.

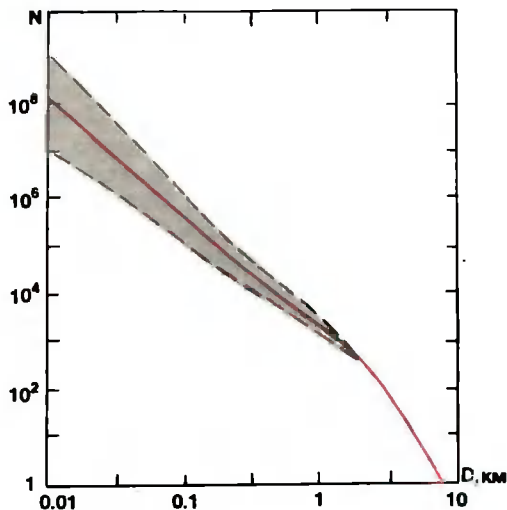
Однако такие крайне редкие космические события не привели бы к столь внимательному изучению астероидной опасности в последние годы, если бы не стало ясно, что человечество способно в значительной степени уберечь себя от подобных катастроф уже при современном уровне развития науки и техники.

**ОПАСНОСТЬ «ВЕСОМА, ГРУБА, ЗРИМА»**

Теперь, когда проблема осознана на качественном уровне и предварительные проработки показали возможность, по крайней мере, частичного ее решения, естественно, встал вопрос: пора ли ей заниматься всерьез, а если пора, то в каких направлениях.

Прежде всего нужно оценить величину предотвращенного ущерба и вероятность его возникновения. Значение первого фактора не оставляет сомнений. Отвлекаясь от глобальных катастроф, можно на примере Тунгусского падения утверждать, что даже астероид диаметром в несколько десятков метров может лишить условий





*Распределение по размерам астероидов, сблизжающихся с Землей.  $N$  — число астероидов с диаметрами, большими  $D$ . Пунктирными линиями показаны пределы ошибки. (По Bowell E. et al., 1991).*

цивилизированного существования отдельный регион. А падение несколько более крупного астероида в океан поставит под вопрос жизнь прибрежных городов и поселков. Что касается вероятности таких событий, то, по некоторым оценкам, астероиды типа «Тунгусска» падают на Землю раз в 100 лет, более крупные — еще реже.

Стоит ли заниматься проблемой, в которой так огромна величина устраняемого ущерба (вплоть до спасения цивилизации) и так мала вероятность ущерба, измеряемая временем между подобными столкновениями в сотни и тысячи лет?

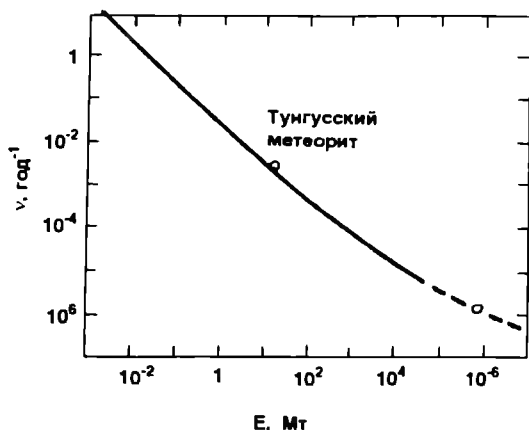
Классические модели выбора наиболее предпочтительного решения предполагают минимизацию максимального ущерба и максимизацию математического ожидания полезности. При использовании этих двух моделей проблема астероидной опасности оказывается одной из важнейших среди других общечеловеческих задач: нет большего ущерба, чем гибель цивилизации, и он вряд ли может быть оценен конечной величиной.

Сочетание двух столь противоположных факторов приводит еще к одному парадоксальному выводу: вероятность гибели отдельного человека от астероидного удара соизмерима с вероятностью его гибели при редких, но обычных обстоятельствах, например, в авиационной катастрофе. Из этого, конечно, не следует, что уже сегодня максимальные ресурсы будут переключены на решение рассматриваемого вопроса. Однако можно твердо сказать: проблема астероидной опасности «весомая, грубая, зрима», и человечество рано или поздно приступит к ее практическому решению.

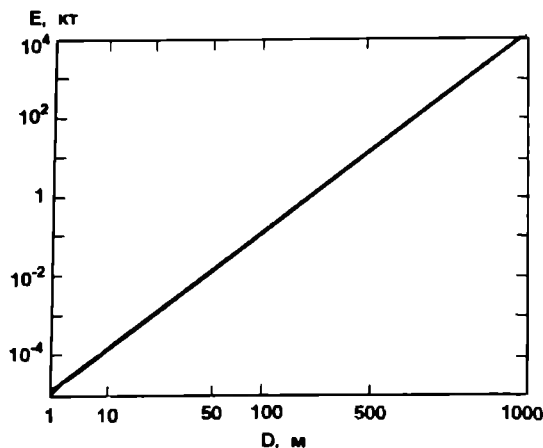
Защита Земли может быть реализована в пассивном или активном режимах. Пассивный режим предполагает обнаружение и определение степени опасности астероидов, а также проведение мероприятий по эвакуации населения и защите особо важных объектов. Активный — разрушение астероидов или изменение их орбит. Оба направления нуждаются в средствах обнаружения опасных астероидов и определения их характеристик. Бездумное противодействие (безотносительное к конкретным или типовым структурным особенностям астероидов) может быть не только малоэффективным, но в некоторых случаях и вредным. Здесь задача изучения астероидов «работает» на классическое научное исследование Солнечной системы. Изучение свойств астероидов имеет при этом особое значение и для вопросов об их происхождении, так как, по современным оценкам, они сохранили свой состав в наиболее первозданном виде<sup>1</sup>.

Еще один немаловажный аспект проблемы — политический. На заре своего развития космические исследования были источником достижений, имеющих общечеловеческое значение: первый спутник, первый космонавт, первая экспедиция на Луну. В последние годы космическая деятельность

<sup>1</sup> Мороз Л. В. Астероиды и метеориты — осмысление фактов // Природа. 1995. № 5. С. 26—31.



Частота ( $\nu$ ) столкновений с Землей космических тел с различной энергией удара ( $E$ ). Оценка проведена по данным наблюдений комет, астероидов и распределению кратеров на лунной поверхности. На пунктирной линии отмечено падение на рубеже мезозоя — кайнозоя. (По Чапман С., Morrison D., 1989).



Энергия, необходимая для разрушения АСЗ различных диаметров с плотностью  $\rho=2$  г/см<sup>3</sup>. (По Housen K., Holsapple K., 1990).

стала более прагматичной. Престижные дорогостоящие проекты типа базы на Луне и пилотируемого полета к Марсу приостановлены. Действует лозунг: «Подобные экспедиции должны проводиться по мере того, как позволят средства» (можно подумать, что запуск первого спутника или экспедиция на Луну осуществлялись при наличии крупных свободных средств и при меньшем количестве других проблем). Можно представить, что прагматический период космической деятельности также не будет вечным. Как отдельному человеку и государству, так и человечеству в целом для эффективного развития нужны светлые одухотворяющие идеи. Одной из таких идей может быть защита нашего общего дома — планеты Земля.

#### ЗАДАЧА СЛОЖНА И МНОГОПЛАНОВА

В научно-техническом плане защита Земли от астероидной опасности неоднозначна. Одно из основных направлений ее решения — информационное.

Общее количество астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), т. е. проходящих на расстоянии от нее менее 0.1 а. е., измеряется сотнями

тысяч. Среди них астероиды, которые могут вызвать глобальную катастрофу (диаметр более 0.5 км), — единицы процентов. Эти астероиды должны быть достаточно полно описаны. Их эфемериды и некоторые физические характеристики заранее определяются и вносятся в «Каталог АСЗ». Это позволит, вообще говоря, за несколько лет прогнозировать встречу таких объектов с Землей и своевременно организовать противодействие. Однако имеющиеся в настоящее время данные полны лишь для объектов диаметром более 8—10 км; астероидов с диаметром около 1 км, по-видимому, известно не более 5—10%. Но для того, чтобы «Каталог АСЗ» был достаточно исчерпывающим (включал хотя бы 90—95% крупных АСЗ), необходимо соответствующее дооснащение наземных измерительных средств, так как при существующих темпах открытия новых астероидов эту работу не удастся закончить в обозримом будущем<sup>2</sup>. Возможность сколько-либо полного учета сотен тысяч опасных для Земли астероидов диаметром от 50 до 500 м пока не реальна. Таким образом, следует ориентиро-

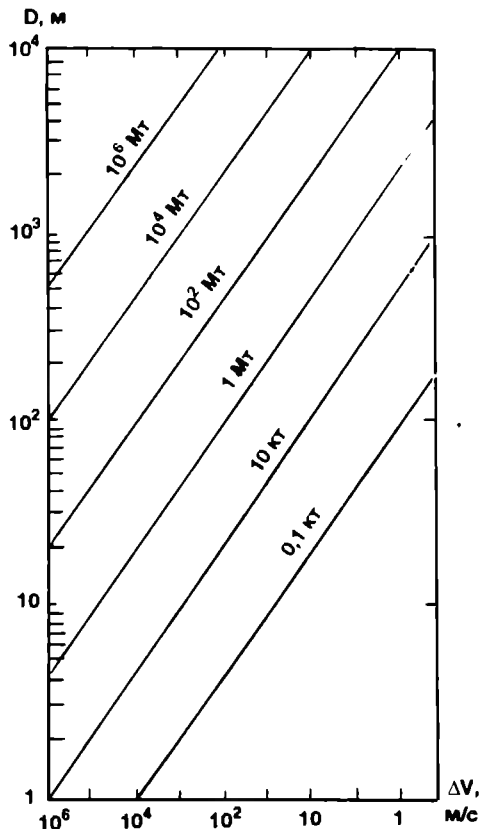
<sup>2</sup> Report of the NASA International Near-Earth Object Detection Workshop (25 January 1992). 1992.

ваться на их обнаружение непосредственно в околоземном космическом пространстве перед столкновением с Землей.

Следовательно, организация противодействия астероидам включает два типа задач. Первый — защита от крупных объектов диаметром более 300—500 м. Резерв времени в случае расчетного столкновения с ними измеряется годами. Второй — реакция на приближение астероидов с диаметром менее 300—500 м и отдельных, не обнаруженных заблаговременно, крупных астероидов. В этом случае резерв времени определяется возможностями средств обнаружения. В качестве таких средств рассматривались радиолокационные системы предупреждения о ракетном нападении (СРПН). Использование СРПН позволяет в принципе контролировать значительную часть небесной сферы. Однако дальность обнаружения астероидов этой системой составляет от 50 до 100 тыс. км в зависимости от диаметра астероида. Поэтому при относительной скорости астероида от 50 до 15 км/с на организацию противодействия остаются десятки минут или в лучшем случае — несколько часов.

Этого времени недостаточно как для принятия мер по гражданской защите, так и для организации противодействия. Основным способом защиты от астероидов, обнаруженных уже на подходе к Земле, из-за дефицита времени может быть только их разрушение с использованием ракет с ядерным зарядом. Перехват возможен на высотах в единицы тысяч километров. К сожалению, увеличение энергетики ракет не позволит существенно расширить рубеж перехвата. При разрушении на малых высотах обломки астероида войдут в атмосферу Земли компактным роем и ущерб будет не столь малым, как хотелось бы.

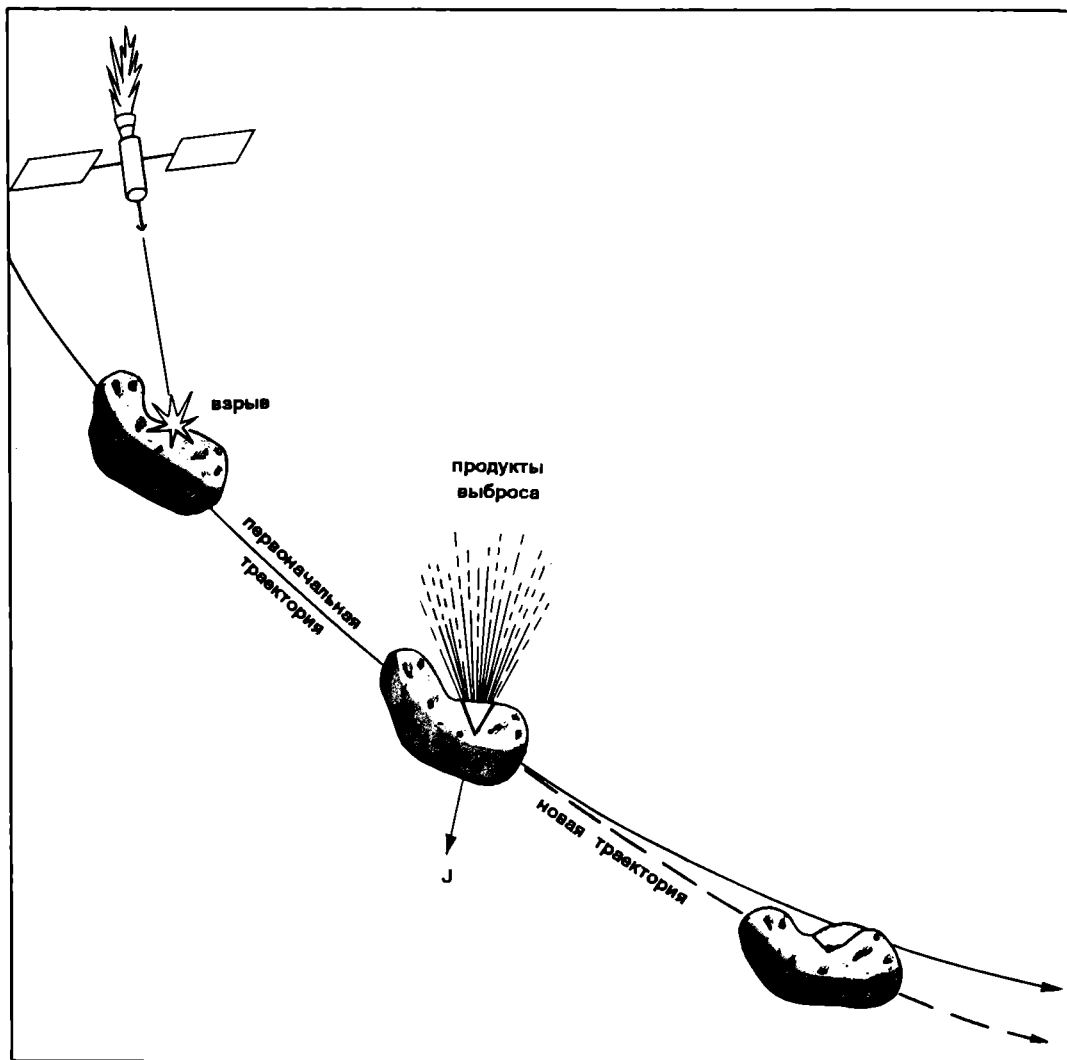
По нашим оценкам, оптимальная высота перехвата составляет несколько десятков тысяч километров для астероидов диаметром от 50 до 300 м, падающих в океан, и не менее 250 тыс. км для падающих в населенные районы.



Энергия, необходимая для отклонения АСЗ в зависимости от его диаметра и относительной скорости ( $\Delta V$ ). (По Phipps С., 1992).

Реализовать такой перехват с использованием наземных ракет с ядерным зарядом можно в том случае, если обнаружение будет производиться на дальности порядка 0,1 а. е. (~15 млн. км). Работы, проведенные в России и за рубежом, показали возможность создания относительно простой оптико-электронной системы космического базирования, позволяющей обеспечить дистанцию поиска опасных космических объектов до 0,1 а. е.

Существование космической системы обнаружения, кроме выдачи цели средствам перехвата и (или) наземным измерительным приборам для уточнения траектории астероида и его характеристик, позволит решить ряд других важных задач: во-первых, своевременно реализовать мероприятия по

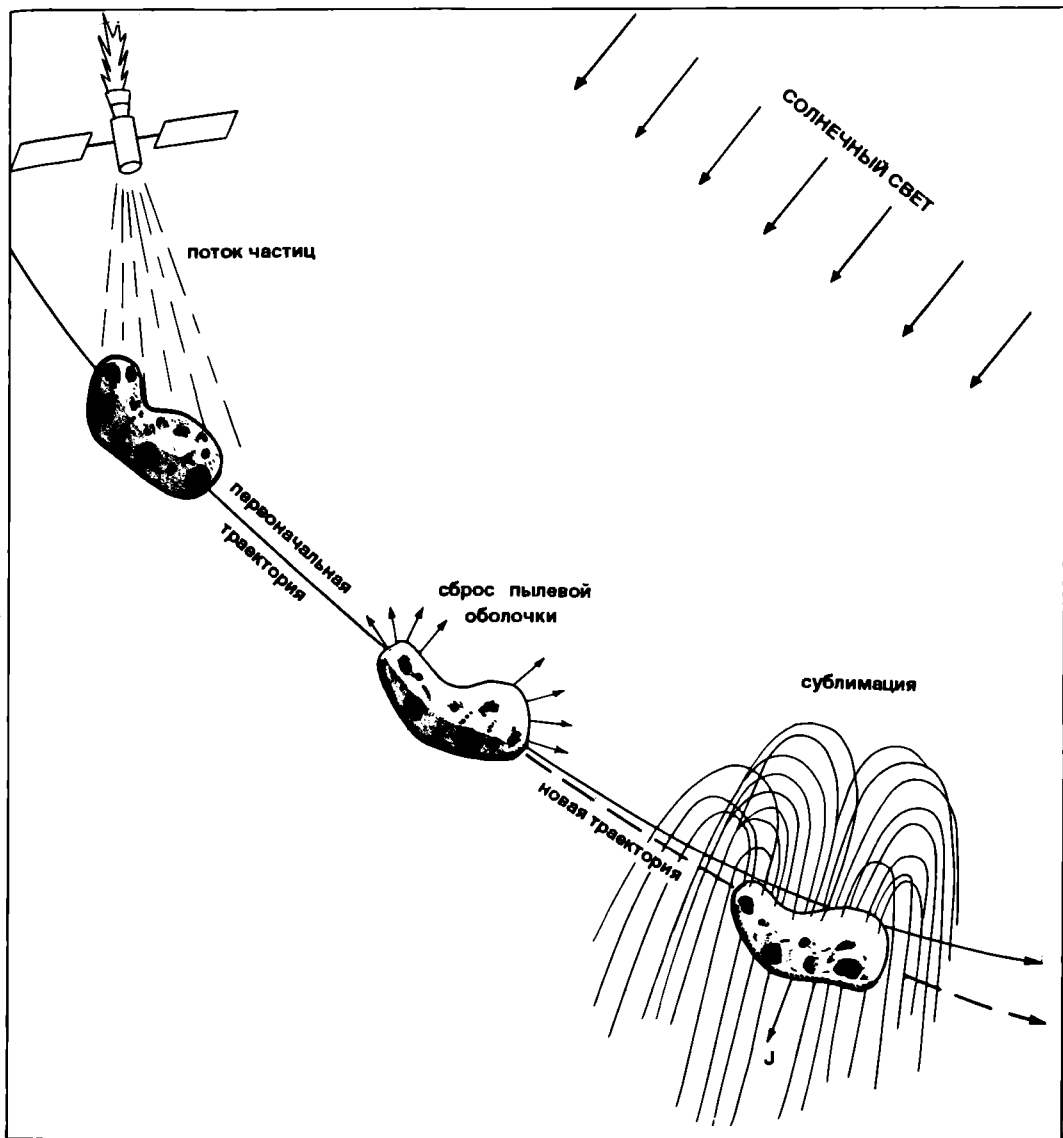


гражданской защите; во-вторых, организовать систематические наблюдения обнаруженных АСЗ с использованием фотометрических, поляриметрических, радиолокационных и других наземных измерительных средств; в-третьих, набрать статистику по плотности потока астероидов в околоземном пространстве и оценить современную вероятность их столкновения с Землей.

#### АКТИВНАЯ ЗАЩИТА

Если крупный астероид, угрожающий столкновением с Землей, обнару-

*Наиболее легко реализуемые способы увода с орбит опасных объектов (дальний перехват). Отклонение железного (каменного) астероида (слева). Ядерный взрыв на поверхности тела (жесткое воздействие) вызывает образование кратера, при этом возникает импульс отдачи (J) от продуктов выброса и астероид начинает двигаться по новой траектории. Отклонение астероида кометной природы. Направленный на поверхность астероида высокоскоростной поток жидких или твердых частиц или ядерный взрыв на расстоянии (мягкое воздействие) приводит к сбросу пылевой оболочки, что влечет за собой обнажение ледяных пород. Под действием солнечной радиации возникает сублимационный реактивный эффект, и астероид меняет свою траекторию.*



жен заблаговременно и для противодействия имеется достаточное время (несколько месяцев и более), то стратегия и средства перехвата могут быть существенно иными, чем в случае, когда астероид, замечен в окрестностях Земли.

В настоящее время в публикациях, посвященных астероидной опасности, обсуждаются различные варианты противодействия:

— разрушение (увод) астероида

при воздействии ядерного заряда или столкновении с модулем перехвата;

— увод астероида с помощью двигателей малой (использующей солнечную энергию) или большой тяги, с применением солнечного паруса или за счет окрашивания поверхности<sup>3</sup>;

<sup>3</sup> Энеев Т. М., Ахметшин Р. Э., Ивашкин В. В. и др. Баллистический анализ проблемы обеспечения астероидной безопасности Земли // Тез. докл. конференции «Астероидная опасность-93», 25—27 мая 1993 г. С.-Петербург. С. 94.

— эрозионное разрушение астероида с помощью роя частиц на пути его движения<sup>4</sup>;

— изменение орбиты астероида кометного происхождения за счет искусственно созданного сублимационного реактивного эффекта<sup>5</sup>;

— увод астероида за счет реактивного эффекта (разлет плазмы и осколков), полученного при разогреве поверхности сфокусированным солнечным или лазерным излучением<sup>6</sup>.

Анализ этих и некоторых других вариантов противодействия показал, что применение указанных способов не дает однозначных результатов.

Разрушение (увод) крупных астероидов при воздействии ядерных зарядов — наиболее перспективный вариант — требует уточнения физических параметров разрушения и тактики воздействия.

Столкновение с модулем перехвата дает эффект только при весьма больших массах модуля.

Использование двигателя большой тяги требует доставки на астероид сотен тонн топлива, а двигатель малой тяги эффективен только при продолжительности работы в течение многих лет.

Солнечный парус для увода астероида должен иметь площадь в сотни гектаров при времени увода, исчисляемом десятками и сотнями лет. Такая же длительность действия характерна и при окрашивании астероида.

Эффективность эрозионного разрушения не подтверждалась при высо-

ких относительных скоростях прохождения тела через рой мелких частиц.

Увод с помощью сублимационного реактивного эффекта реализуется относительно просто, однако требует экспериментального подтверждения и заблаговременного определения типа астероида.

Увод за счет реактивного эффекта при разогреве поверхности астероида искусственным источником излучения требует гигантских мощностей излучения.

Таким образом, необходим сравнительный анализ основных вариантов противодействия крупным астероидам и проведение дополнительных экспериментальных исследований по наиболее перспективным из них.

Если же располагаемый резерв времени на противодействие крупному астероиду исчисляется десятком лет, то одним из первых шагов к решению проблемы, как нам кажется, будет запуск к астероиду исследовательского космического аппарата. Его задача — уточнить характеристики астероида и, возможно, доставить на его поверхность некоторые элементы средств противодействия. Затем выбирается наиболее рациональный комплекс защиты. Представляется, что этот комплекс мер должен включать ядерные средства если не как основной вариант противодействия то, в крайнем случае, как резервный.

Для противодействия опасным астероидам, обнаруженным в околоземном пространстве, альтернативы ядерным средствам пока не видно. В то же время эффективность как ядерных, так и неядерных средств защиты напрямую зависит от информации о характеристиках астероида.

В настоящее время существует ряд представлений о типовых опасных для Земли астероидах, в основу которых положены результаты наблюдений, включая данные по метеоритам. Но информация по ним достаточно ограничена. Необходимы комплексные исследования астероидов, в том числе с использованием космических аппаратов.

<sup>4</sup> Чернявский Г. М., Чудецкий Ю. В. Конверсия и некоторые задачи астероидной безопасности // Там же. С. 99—100.

<sup>5</sup> Дмитриев Е. В., Попцов В. Н., Сазонов В. С. Использование эффекта сублимации вещества «спящих» кометных ядер с целью их увода с орбит // Тез. докл. 22-й Метеоритной конференции, 6—8 дек. 1994 г. Черногловка. С. 30—31.

<sup>6</sup> Немчинов И. В., Артемьев В. И., Медведюк С. А., Рыбаков В. А. Отклонение астероидов и комет от траектории сфокусированным солнечным излучением // Тез. докл. конференции «Астероидная опасность-93», 25—27 мая 1993 г. С.-Петербург. С. 103—104.



Первый шаг в этом направлении был сделан Соединенными Штатами, которые запустили в 1994 г. космический аппарат «Клементина». Одной из его задач было изучение астероида «Географ» на пролетной траектории. Но необходимо получить представительную информацию обо всем множестве опасных астероидов. Программа исследований должна включать серию экспедиций: на пролетной траектории; с использованием контактного зондирования; с посадкой на астероид для исследования грунта и доставкой образцов на Землю. Ясно, что в наиболее простых экспедициях с целью сокращения требуемых расходов должны использоваться относительно небольшие космические аппараты и легкие носители. Одним из них может быть «Рокот», разработанный в Государственном космическом научно-производственном центре им. М. В. Хруничева на базе конверсируемой баллистической ракеты СС-19.

Следующее важное направление в решении проблемы противоастероидной защиты — определение облика, принципов построения и применения противоастероидных комплексов: дальнего перехвата, для противодействия крупным, заблаговременно обнаруженным астероидам, и ближнего — для объектов, замеченных в непосредственной близости от Земли. Особое значение для комплексов ближнего перехвата имеет тактика.

Предположим, что с помощью космической системы обнаружения определена траектория АСЗ, наземные измерительные приборы уточнили его характеристики. Известен район падения. Необходимо выбрать набор средств, рубеж перехвата, мощность и тактику применения ядерных зарядов.

Если район падения — акватория океана, главная задача — снизить мощность цунами<sup>7</sup>. Поскольку площадь

водной поверхности составляет 70% поверхности Земли, то цунами являются одним из наиболее вероятных последствий падения астероида, а побережья морей и океанов — наиболее уязвимыми районами Земли.

Основной путь снижения ущерба — обеспечить разлет осколков астероидов после разрушения на такую относительную дальность, которая гарантирует невозможность их взаимодействия при образовании цунами.

Более тонкие проблемы возникают, если район падения — материк. Увеличение высоты перехвата и мощности ядерного заряда ведут к увеличению площади покрытия обломками астероида. Необходимо учитывать падение обломков не только на жилые массивы, но и на особо ценные исторические объекты, на опасные производства, разрушение которых может привести к многократному увеличению ущерба.

Опасность представляет и такое разрушение астероида, которое приводит к образованию большой массы аэрозольей, запыленности атмосферы и изменению климатических условий на Земле.

Таким образом, необходим взаимоувязанный комплекс работ, обеспечивающий оптимальный выбор решения по цепочке: обнаружение астероида — уточнение его характеристик и района падения — определение стратегии и тактики противодействия.

В заключение необходимо подчеркнуть: проблема противоастероидной защиты Земли вообще говоря не нова. Но в последние годы она привлекает все большее внимание, и есть основания считать, что в обозримом будущем она войдет в ряд важных научно-технических проблем, решаемых человечеством. Практическое ее решение находится в тесной связи с дальнейшим изучением и освоением околоземного пространства и Солнечной системы.

<sup>7</sup> Немчинов И. В., Полов С. П., Тетерев А. В. Оценка характеристик волн и цунами, вызванных падением астероидов и комет в океаны и моря. // Астрон. вестник. 1994. Т. 28. № 3. С. 81—99.

# Он шел самостоятельными путями

(К 150-летию со дня рождения Н. А. Гезехуса)

И. А. Захаров,

доктор биологических наук

Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова РАН

Москва

Имя выдающегося русского физика конца XIX — начала XX в. Николая Александровича Гезехуса сейчас мало известно. Имеется только одна публикация И. И. Якобсона, специально посвященная его трудам (Природа, 1949, № 7). В энциклопедиях и библиографических словарях это имя упоминается, но в них приводятся лишь скудные и подчас противоречивые сведения. Пожалуй в наибольшей степени память о нем сохраняется в Томске — Н. А. Гезехус был первым ректором открывшегося в этом городе первого сибирского университета. вклад Гезехуса в развитие физики в России и особенно в дело высшего образования и распространения научных знаний несомненно значителен. Как ученого его отличали исключительная требовательность к себе, тщательность в проведении экспериментов, самостоятельность и взвешенность в их теоретической трактовке. Как педагог он обладал глубокой эрудицией, широтой суждений и особым умением донести до слушателей суть физических проблем.

Ниже мы предоставляем слово И. А. Захарову, проработавшему большую работу по сбору сведений о жизни и деятельности его выдающегося прадеда — Николая Александровича Гезехуса. Среди научных интересов Гезехуса большое место занимали загадки шаровой молнии: он систематизировал информацию о наблюдениях ее в природе и пытался реализовать ее в лабораторных условиях. Статья С. И. Степанова посвящена некоторым современным представлениям об этом явлении и предлагает оригинальную гипотезу, объясняющую ряд свойств молнии.

**НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ГЕЗЕХУС** родился 17 (29) января 1845 г. в Санкт-Петербурге в семье корабельного инженера. Среди немногочисленных потомков и родственников Гезехуса осталось предание о шведском происхождении его фамилии (Hesehus); это, однако, вызывает сомнение — в Швеции такой или созвучной фамилии нет. Возможно, что род Гезехусов брал начало в Германии или Прибалтике. Каковы бы ни были его корни, Николай Александрович происходил из вполне обрусевшей, православной семьи.

Гезехус окончил Императорский Санкт-Петербургский университет в 1869 г., в 1871—1872 гг. стажировался в Берлине у Г. Гельмгольца. Вернувшись в Петербург, работал на физико-

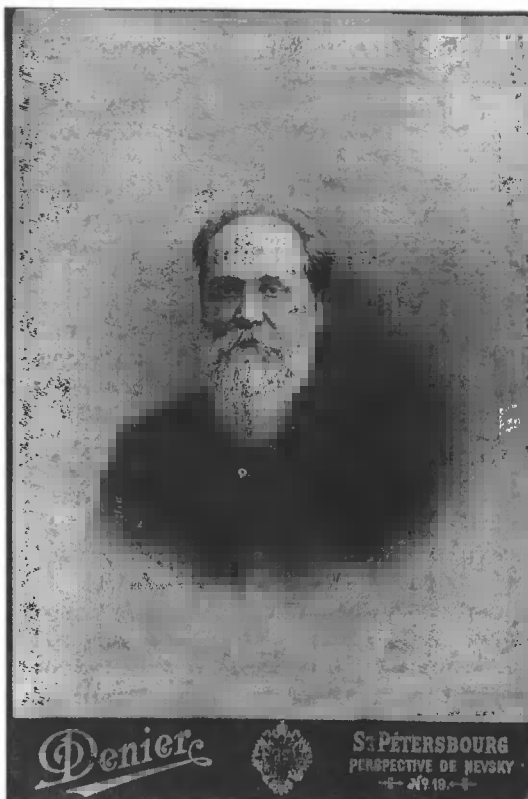
математическом факультете университета, совмещая преподавание с проведением научных исследований. Им были последовательно получены степени кандидата (1869), магистра (1876) и доктора (1882). С 1873 г. он участвует в проведении практических занятий, а в 1877 г. приступает к чтению лекций в Санкт-Петербургском университете. Среди его студентов был, например, А. С. Попов, изобретатель радио.

Короткий томский период деятельности Гезехуса начался в 1888 г.

Открытие первого в Сибири университета состоялось в Томске 22 июля 1888 г. Для работы в нем были приглашены профессора из Петербурга, Казани и других научных центров России. Несмотря на то, что университет открылся, имея в составе один, медицинский факультет, в Томск приехали и начали работать видные специалисты в различных областях науки: ботаник С. И. Коржинский, гистолог А. С. Догель (отец известного

зоолога В. А. Догеля), физик Н. А. Гезехус и др. Именно последний с 6 сентября 1888 г. приступил к исполнению обязанностей ректора Императорского Томского университета.

В Томске Гезехус проработал всего год, занимаясь как административной и организационной работой (нетрудно представить ее объем в только что открытом учебном заведении), так и чтением лекций, подготовкой к проведению практических занятий. В первом выпуске «Известий Императорского Томского университета» опубликована статья Гезехуса, описывающая созданный им кабинет физики<sup>1</sup>. Возможно, что некоторые разногласия с попечителем Западно-Сибирского учебного округа профессором В. М. Флоринским способствовали решению оставить Томск, но, как видно из недавно опубликованной переписки Флоринского и Гезехуса, взаимно уважительной и благожелательной по духу, в исторической литературе в прошлом острота конфликта между двумя университетскими деятелями преувеличивалась. Основным мотивом отъезда Гезехуса из Томска было приглашение занять кафедру физики Технологического института императора Николая I в Петербурге. Не последнюю роль, несомненно, сыграла и тоска по родному городу, которую не мог не испытывать коренной петербуржец, и, как мне представляется, естественное неудовлетворение от преподавания второстепенного для слушателей-медиков предмета — физики. Гезехусу, видимо, стало ясно, что перспектива открытия в Томске физико-математического факультета отодвигается в достаточно далекое будущее (действительно, он был организован лишь в 1917 г.). Осенью 1889 г. Николай Александрович покидает Томск, передав преподавание физики другому петербуржцу — Ф. Я. Капустину. Вся дальнейшая жизнь Гезехуса прошла в Петербурге.



*Николай Александрович Гезехус (1910-е годы). Снимок из семейного архива. Публикуется впервые.*

После возвращения в родной город и до конца своих дней он состоял профессором в Технологическом институте, став со временем заслуженным профессором, совмещающая исследовательскую и преподавательскую деятельность с выполнением административных обязанностей проректора (помощника директора) института (должность, которую он занимал 27 лет!) и, как мы бы теперь сказали, с общественной работой — он был вице-председателем «Общества для пособия учащимся в Технологическом институте».

«Отец советской физики» Абрам Федорович Иоффе, окончивший в 1902 г. Технологический институт, был одним из студентов в те годы, когда профессором физики был Гезехус. В

<sup>1</sup> Гезехус [Н. А.]. Физический кабинет // Изв. Имп. Томского университета. Кн. 1. 1889. С. 22—24.

биографиях Иоффе отмечается, что в решающую для его дальнейшей научной карьеры поездку на стажировку к В. К. Рентгену в Мюнхен он отправился по совету и с рекомендацией Гезехуса<sup>2</sup>.

Николай Александрович был физиком широких интересов, его работы относятся к молекулярной физике, изучению электрических явлений, оптике, акустике, а также метеорологии — физическим процессам в атмосфере.

Им были экспериментально изучены явления электризации трением, электризации при разбрызгивании и распылении, упругое последствие, свето- и звукопроводность. Гезехус сформулировал законы звукопроводности твердых тел, имеющих форму пластин; построил так называемую акустическую линзу (чечевицу) для вычисления коэффициента преломления звука и получил для своего времени наиболее точные значения скорости звука в воздухе. Академик Иоффе как совершенно оригинальные отмечает исследования Гезехуса по электризации трением. Николаем Александровичем была выполнена одна из первых в России работа по изучению радиоактивности («О влиянии радия на электризацию соприкосновения», 1903 г.).

Академик И. В. Обреимов писал: «... у Гезехуса была одна «законодательная» работа: он разъяснил природу «сфероидального состояния» жидкостей, когда, например, вода в виде капелек катается по раскаленной плите или жидкий воздух в виде капли — по лабораторному столу»<sup>3</sup>.

Сейчас наибольшее внимание продолжат привлекать труды Гезехуса, посвященные природе шаровой молнии. Возможно, что интерес к проблеме «сфероидального» электричества возник у него еще при изучении сфероидального состояния жидкости. В своей

речи, прочитанной на первом годовичном акте Томского университета (22 октября 1889 г.) и посвященной задачам метеорологии, Николай Александрович приводит записанные им сведения о шаровой молнии по наблюдениям свидетелей.

Вот пример подобных описаний:

«Один из таких случаев имел место в Гатчине, в 40 верстах от Петербурга, 10 июля 1885 г. Сидевшие в восьмом часу вечера на балконе, во время сильной грозы, Л. К. С. — жена известного врача, племянник ее — гимназист и гувернантка заметили вдруг появление в саду большого огненного шара, видом своим похожего на восходящую над горизонтом луну, но немного, как им казалось, больше лунного диска; через несколько секунд последовал страшный удар грома (без раската) и светящийся шар мгновенно исчез. По словам Л. К. С., и в прошлом году в Гатчине была подобная же шаровая молния <...>.

Приведены здесь эти описания очевидцев не с целью показать, как должно наблюдать и записывать изучаемое явление, а как образцы вообще того скудного и мало надежного материала, который имеется по отношению к столь редкому и загадочному явлению, как шарообразная молния...»<sup>4</sup>.

Позднее ему самому удалось наблюдать подобное редкое природное явление: «Посчастливилось и мне наблюдать один метеор, который я тоже склонен приписать к рассматриваемым здесь электрическим метеорам. Это именно блестящий яркий метеор грушевидной формы, пронесшийся в Петербурге 1-го января 1895 г. в седьмом часу вечера. Описан он был проф. С. И. Залеским и мною в № 5 "Новостей". Об электрическом происхождении метеора можно было предполагать, во-первых, по его блеску и медленному движению, а во-вторых,

<sup>2</sup> Соминский М. С. Абрам Федорович Иоффе. М.— Л., 1964.

<sup>3</sup> Обреимов И. В. // Воспоминания об А. Ф. Иоффе. Л., 1973. С. 26.

<sup>4</sup> Гезехус Н. А. О значении метеорологических наблюдений по отношению к Сибири // Изв. Имп. Томского университета. Кн. 1. 1889. С. 98.

по вспышке на небе, как бы зарнице, замеченной нами полтора часа позже»<sup>5</sup>. К экспериментальному изучению явления ученый обратился через несколько лет.

В опытах, проведенных Гезехусом в самом конце XIX — начале XX в., медная пластинка, горизонтально помещенная на расстоянии 2—4 см от поверхности воды, присоединялась к одному полюсу трансформатора напряжением 10 тыс. В, другой полюс которого имел контакт с водой. С металлической пластинки начинался разряд, «световые явления при этом получались замечательно красивые и разнообразны. Из одного какого-либо места пластинки выходил сноп лучей, окруженный светлой оболочкой и пламенем, то в виде конуса, то овальной или сферической формы. Цвет его, в зависимости от напряженности тока, менялся от красноватого и желтоватого к синеватому, фиолетовому и белому. При этом и различные части такого светового снопа представлялись вообще не одинакового цвета. Но всего поразительнее в этом явлении — это значительная подвижность огненного сфероида. Он не только перемещался с одного края пластинки к другому при малейшем дуновении, но и сам по себе не оставался в покое. При его перемещении слышался особый треск, и он нередко распадался на отдельные части, которые затем опять соединялись»<sup>6</sup>. При покрытии полученного пламени колпаком под ним собирались пары азотной кислоты, на основании чего автор заключил, что и в шаровой молнии происходит сгорание азота. В различных опытах были получены разряды, напоминающие такие атмосферные явления, как линейные и зигзагообразные, простые и разветвленные молнии, шаровые и

четкообразные молнии и, наконец, молнии в виде пламени<sup>7</sup>.

Исследования Гезехуса продолжают цитироваться не только в отечественной, но и в зарубежной литературе<sup>8</sup>. Так, в вышедшей на русском языке в 1983 г. книге Дж. Барри «Шаровая молния и четочная молния» (американское издание 1980 г.) даются ссылки на 12 публикаций Николая Александровича, посвященных этому редкому явлению природы.

Исследовательская работа является одним из элементов триады настоящего ученого — исследование, преподавание, научно-литературная деятельность. Как отмечалось, Гезехус 45 лет проработал в высших учебных заведениях, 30 из них был профессором.

В европейских и русских изданиях им опубликовано большое число статей, его учебник «Основы электричества и магнетизма» выдержал три издания (последнее, объемом 300 стр., 1914 г.). Гезехус был многолетним редактором физического отдела «Журнала Русского физико-химического общества», редактором других периодических изданий — «Вопросы физики», «Известия Технологического института императора Николая I», а также энциклопедических словарей, в том числе последнего, предреволюционного издания многотомной энциклопедии Брокгауза и Ефрона.

Нельзя не сказать и о многолетней деятельности Николая Александровича в Русском физико-химическом обществе, объединявшем почти всех физиков и химиков страны. Став в 1877 г. секретарем (делопроизводителем) Общества, он до конца жизни

<sup>5</sup> См. две предыдущие работы, а также: Гезехус Н. А. О шаровой молнии // Изв. Технологич. ин-та. 1900. Т. 13. С. 39—48; он же. Электрическое пламя и шаровидная молния // Журн. Русск. физ.-хим. о-ва. 1900. Т. 32. Вып. 4. С. 127—129; Hesehus N. A. Kugel und Flammenblitze als besondere Entladungsformen der atmospharischen Elektrizitat // Physik, Z. 1901. B. 2. Nr. 32. S. 578—580.

<sup>8</sup> Сингер С. Природа шаровой молнии. М., 1973.

<sup>5</sup> Гезехус Н. А. Шаровидные и пламенообразные молнии как особые типы разрядов атмосферного электричества // Изв. Технологич. ин-та. 1901. Т. 14. С. 49.

<sup>6</sup> Гезехус Н. А. О шаровой молнии // Науч. обозрение. 1899. № 7. С. 1389.

вел в нем активную работу, а в 1902 г. был избран председателем физического отделения Общества.

Обреимов оставил описание того впечатления, которое уже пожилой Николай Александрович производил на молодых физиков: «Мы знали Н. А. Гезехуса по заседаниям Физического общества как очень апатичного человека, говорящего тихим, монотонным голосом. А. Ф. Иоффе утверждал, что по существу Гезехус — натура страстная, но он болен сердцем. Очень болен. И чтобы не довести болезнь до рокового конца, он выработал в себе спокойствие, ровный тихий голос, манеры, которые щадили его сердце»<sup>9</sup>.

Николай Александрович был не только талантливым физиком, но и художественно одаренной натурой: в

Петербурге участвовал в музыкальных концертах, исполняя в струнном квартете роль первой скрипки; в томский период своей жизни организовал в университете музыкальный класс, где с другими энтузиастами бесплатно давал уроки; был директором Томского отделения Русского музыкального общества. И в Петербурге продолжал совмещать физику и музыку — вплоть до последних лет жизни был председателем Общества любителей камерной музыки. Не случайно под его редакцией вышла книга профессора Блацерны «Теория звука в приложении к музыке» (СПб, 1878).

Умер Николай Александрович 2 сентября 1918 г. в Петрограде от истощения, не сумев приспособиться к тяжелым условиям, в которых оказались ученые в первые послереволюционные годы. Так завершилась жизнь труженика на ниве российского просвещения, выдающегося ученого, настоящего русского интеллигента.

<sup>9</sup> Обреимов И. В. // Воспоминания об А. Ф. Иоффе. Л., 1973. С. 26—27.

## НОВОСТИ НАУКИ

Охрана природы

### Черноморские дельфины в опасности

Черноморские дельфины находятся под угрозой исчезновения. Об этом свидетельствуют наблюдения экологов и материал «Китообразные Украины: оценка статуса животных, находящихся под угрозой исчезновения», представленный президенту Украины, министру экологии и в Национальную комиссию по Красной книге.

Специалисты с тревогой отмечают катастрофическое снижение численности афалины, белобочки, азовки, т.е. трех видов, которые обитают в Черном море. Черноморские дельфины венчают существующую в

этом море трофическую пирамиду. Они являются, точнее являлись, биологическими регуляторами: поддерживая равновесие системы хищник — жертва, дельфины регулировали численность мерланги, камбалы, ставриды, бычков, хамсы и др. Человек нарушил это естественное равновесие в результате чрезмерной эксплуатации пищевых ресурсов моря, токсичного загрязнения морской среды, разрушения мест обитания животных; он не принимал во внимание прирост и гибель фауны Черного моря.

В настоящее время мировая общественность озабочена сложившимся кризисным положением китообразных Черного моря. Однако в глобальный план

действий по охране, управлению и использованию морских млекопитающих не включена Национальная программа Украины по сохранению популяций черноморских дельфинов, да к тому же и нет у нас надлежащей юридической защиты китообразных Украины.

Положение стало настолько угрожающим, что представляется необходимым создание Международной конвенции черноморских государств по сохранению и воспроизводству черноморских дельфинов.

© А. Е. Ефимов,  
член Международной организации ГРИНПИС,  
президент Одесской ассоциации юных экологов  
Одесса, Украина

# Природа шаровой молнии

С. И. Степанов

Петербургский институт ядерной физики  
им. Б. П. Константинова РАН  
Гатчина

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Первыми экспериментальными исследованиями механизма образования шаровой молнии (ШМ), проведенными в России, были опыты Н. А. Гезехуса, как сказано в предыдущей статье. Их постановка типична для экспериментов по получению лабораторных аналогов ШМ. Создается электрический разряд, как правило высоковольтный, в специально подобранных условиях. В их число входят материал электродов, их форма, длительность разряда, дополнительное вещество, введенное в область разряда. На этом пути во второй половине XX в. исследователи достигли значительных успехов в получении лабораторных аналогов ШМ. Современные лабораторные генераторы шаровых молний представляют собой сложные устройства, с помощью которых удается получать светящиеся шарики или объекты другой формы, существующие некоторое время после окончания разряда. Так, в опытах Дж. Барри, исследовавшего длительный (около 1 мс) разряд в воздухе, к которому был добавлен в небольших количествах горючий газ (типа бутана), возникал светящийся шарик. Он двигался по камере в течение примерно 1 с, мог отскакивать от ее стенок и оставаться целым<sup>1</sup>.

А. Г. Аскарьян и А. А. Лерман на специальной разрядной установке — коаксиальном инжекторе — получали устойчивый объект, который двигался со скоростью 50—70 м/с, не увеличивая своих первоначальных размеров<sup>2</sup>.

При действии СВЧ разряда на пары воды в экспериментах Е. Т. Протасевича возникал светящийся шар, существовавший около 1 с. Внутри шара были обнаружены большие электрические поля, электроны в высокой концентрации и водород, образовавшийся из воды под действием СВЧ излучения<sup>3</sup>.

«Вещество шаровой молнии» в виде струи удалось получить Р. Ф. Авраменко с коллегами<sup>4</sup>. Эти результаты, на наш взгляд, наиболее интересны. В опытах создается длительный разряд, проходящий через канал в диэлектрике, из канала вылетает светящаяся струя (длиной 20—40 см), которая состоит из керна (диаметром 1—2 мм) и оболочки (6—10 мм). В состав струи входят в основном продукты эрозии диэлектрика и электродов. Она имеет большую (относительно ожидаемой в низкотемпературной плазме) концентрацию заряженных частиц и содержит значительную долю энергии, вложенной в разряд. Необходимое условие — ламинарное истечение струи из капилляра, тогда как при турбулентном получается обычная плазма.

Струя имеет весьма необычные свойства: как и шаровая молния, она

<sup>2</sup> Аскарьян Г. А., Лерман А. А. Направленный выброс концентрированного компактного сгустка из коаксиального инжектора в атмосферу // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 1. С. 49—51.

<sup>3</sup> Протасевич Е. Т. «Шаровая молния» на лабораторном столе // Химия и жизнь. 1986. № 8. С. 49—50.

<sup>4</sup> Авраменко Р. Ф., Бахтин В. И., Николаев В. И. и др. Исследование плазменных образований, индуцируемых эрозийным разрядом // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 57—64.



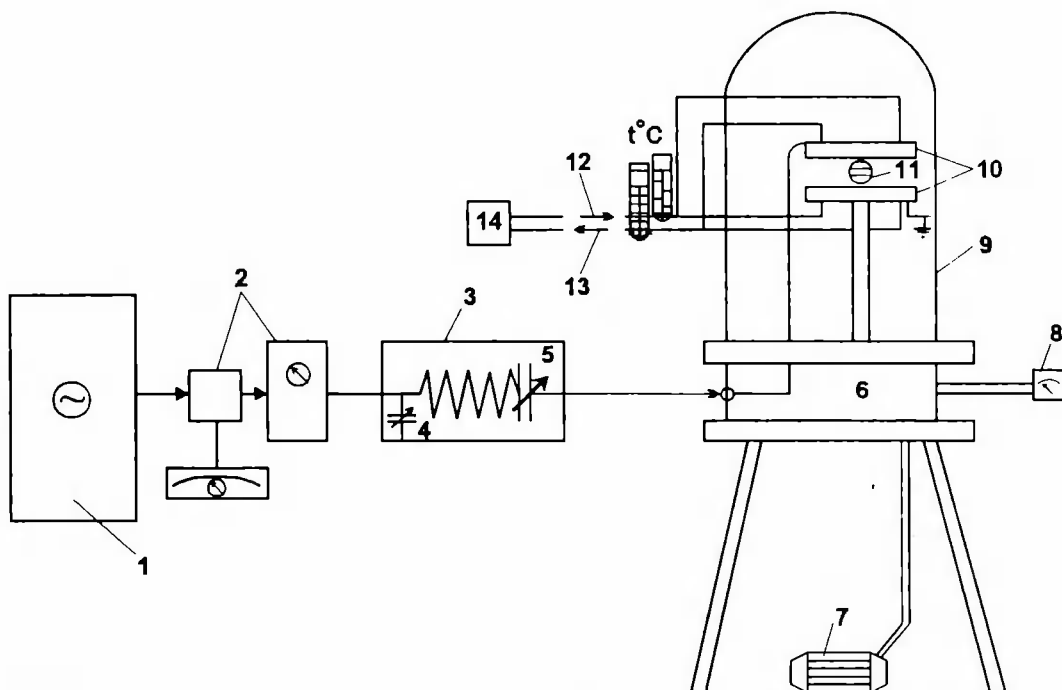
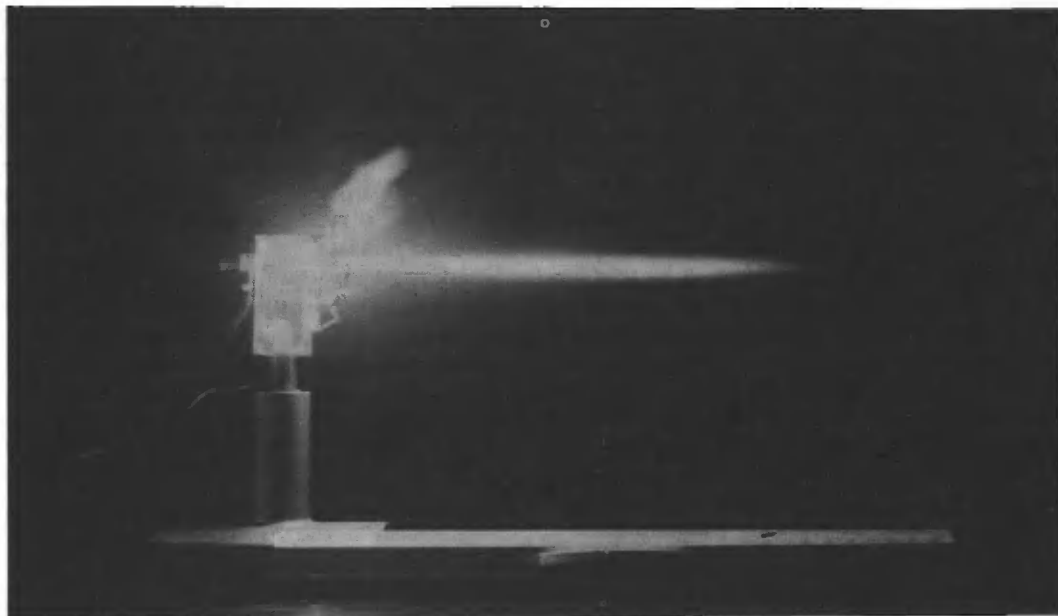


Схема одной из лабораторных установок для генерации шаровых молний. 1 — высокочастотный (ВЧ) генератор; 2 — ВЧ-ваттметры; 3 — согласующее устройство; 4 — нагрузка; 5 — настройка; 6 — вакуумная камера; 7 —

форвакуумный насос; 8 — вакуумметр; 9 — стеклянный колпак; 10 — ВЧ-электроды; 11 — шаровая молния; 12 — холодная вода; 13 — горячая вода; 14 — расходомер.



Интегральная во времени струя, возникающая в атмосфере сухого воздуха и газов (аргон,

гелий) при разряде в цилиндрическом канале из диэлектрика.

прожигает металлическую фольгу, но не повреждает бумагу и другие диэлектрики, способна проходить через отверстие в пластине, теряя при этом свою оболочку. Но если струю направить между двумя отверстиями в пластине, то она отклоняется и проникает только в одно из них! Таким образом, струя Авраменко демонстрирует удивительную способность сохраняться как единое целое. Такая устойчивость совершенно не типична для обычной плазмы.

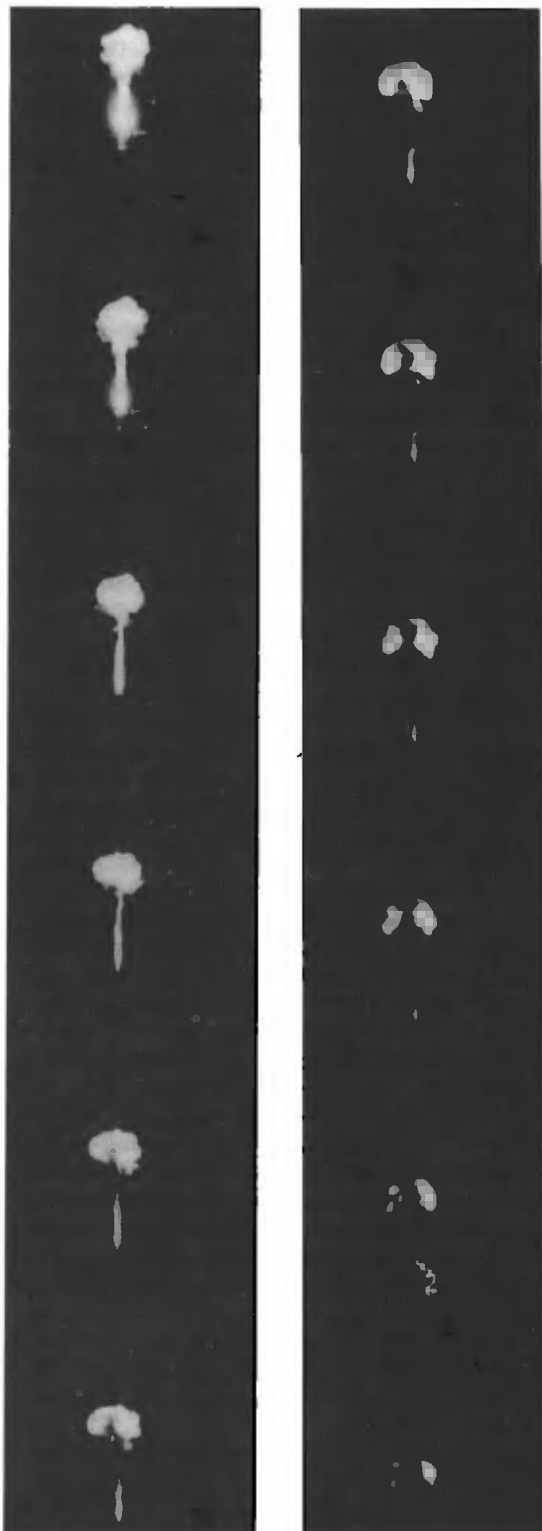
Обнаружено, что керн струи может как ослаблять, так и усиливать зондирующий луч гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм. Факт усиления излучения весьма нетривиален. Дело в том, что излучение могло бы усиливаться в такой же среде, в которой работает сам лазер, т. е. в смеси гелия и неона. Однако струя не содержит этих веществ и поэтому непонятно, каким образом осуществляется усиление на данной длине волны.

При исследовании взаимодействия струи с пересекающим ее сверхзвуковым потоком воздуха выяснилось, что она делится на три части: первая сносится потоком, вторая 'демонстрирует неожиданное поведение — проходит через него без отклонения, а третья движется ему навстречу.

Кроме струи, которая существует во время разряда, при измененных условиях эксперимента на установке Авраменко получены и автономно существующие плазменные объекты, в частности, сферической формы.

Исследовалось встречное столкновение автономного плазменного объекта с ударной волной. Плазменный объект расщеплялся на два, из которых один сносился движущимся за ударной волной потоком, а второй

*Кинограмма образования автономного шаровидного плазменного объекта. При разряде в среде, содержащей мелкодисперсный водный аэрозоль, возникают автономные, отделенные от генераторов плазменные объекты. (Фотографии предоставлены Р. Ф. Авраменко и Л. П. Поскачевой.)*



двигался сквозь нее, не уменьшая своей скорости. Подчеркнем, что речь идет не о делении объекта на одинаковые, а о расщеплении его на два объекта различной природы. Эти опыты, как и опыты со струей, экспериментаторы сопоставляют с наблюдениями движения шаровой молнии против ветра.

В последнее время струя Авраменко успешно исследуется и другими научными группами, описываются многочисленные опыты с ней, а также с автономными плазменными объектами, обсуждаются их свойства в сравнении со свойствами природной шаровой молнии<sup>5</sup>.

По общему мнению, установление физической природы струи Авраменко станет решающим шагом к пониманию того, чем же является шаровая молния.

#### ПРИРОДА БОЛЬШИХ ЭНЕРГИЙ

По наиболее обоснованной точке зрения, энергия ШМ имеет химическое происхождение. Однако известно, что иногда шаровая молния способна выделять большую энергию — 1 МДж и более, а это не может быть объяснено запасом только химической энергии в молнии. Подобные факты сбивают с толку тех, кто размышляет о природе ШМ. Все случаи ее наблюдения, когда выделение энергии могло быть корректно оценено, сведены в таблицу<sup>6</sup>. При ее составлении мы исходили из предположения И. П. Стаханова, что разрушительное действие молнии обусловлено не ее собственной энергией, а энергией внешнего электрического поля, выделяющейся при протекании тока через нее<sup>7</sup>. Тогда сила воздействия должна быть различ-

#### Таблица

Действия, вызываемые шаровой молнией, и энерговыделение

Энергетическое действие ШМ	Энергия, Дж
<b>НАБЛЮДЕНИЯ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ</b>	
Нагрев пластика и золота	440
Воздействие вспышки света	10
Акустическое воздействие взрыва	10
Нагрев, плавление, испарение железа	2000
Нагрев и испарение железа	700
Поднятие воды в ведре	10
<b>НАБЛЮДЕНИЯ ВНЕ ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ</b>	
Нагрев воды	3
Расщепление сваи причала	0.15
Нагрев воды и битума	0.016
Выжигание травы	0.9
Нагрев высоковольтного провода	0.15
Нагрев железной трубы	0.1
Прожигание железной трубы	0.1
Нагрев, испарение воды	180
Расщепление древесины (4 случая)	10—200

ной в зависимости от того, находилась ли ШМ в областях с большим полем или нет. В последнем случае это могут быть жилые помещения, поскольку атмосферное поле не проникает в них.

Из таблицы следует, что выделение больших энергий действительно наблюдалось только на открытой местности. Поражает разница в поведении ШМ в помещении и вне его, если она попадает в сосуды с водой: так, в помещении молния совсем не нагрела воду, лишь выплеснула ее часть из ведра, на улице же вода в одном случае закипела в бочонке, в другом — даже вся испарилась, что требовало в миллионы раз большей энергии. Таким образом, предположение Стаханова подтверждается: на открытой местности ШМ может выделять энергию внешнего электрического поля. В помещениях же проявляется энергия самой молнии. Судя по таблице, она невелика (сотни Дж) и имеет, несомненно, химическую природу. Между прочим, отсюда следует практическая рекомендация: не следует бояться ШМ

<sup>5</sup> См., например: Шаровая молния в лаборатории. М., 1994.

<sup>6</sup> Степанов С. И. Об энергии шаровой молнии // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 2. С. 211—212.

<sup>7</sup> Стаханов И. П. Физическая природа шаровой молнии. М., 1979.

в комнате, хорошо изолированной электрически.

### НЕКОТОРЫЕ МОДЕЛИ

Главная трудность при построении гипотезы ШМ — объяснить устойчивость ее формы. Обычно исходят из того, что шаровая молния больше всего похожа на облако, т. е. рассматривают ее как дисперсную среду. Но облако, состоящее из плазмы, газа или аэрозоля, не устойчиво, так как нет сил, которые способны противостоять внешним силам, изменяющим его форму. К настоящему времени такие гипотезы так и не смогли объяснить устойчивость формы ШМ.

По-иному объясняет это Б. М. Смирнов, исходя из каркасной гипотезы<sup>8</sup>, по которой ШМ представляет собой каркас, комок, сгусток нитей или маленьких фрактальных кластеров<sup>9</sup>. По Смирнову, химические реакции происходят во многих точках каркаса, в них развивается высокая температура (тысячи градусов) и появляется свечение. В целом температура ШМ остается незначительной, и это соответствует наблюдениям.

Имеется вариант модели, в котором каркас состоит из органического полимера<sup>10</sup>.

Рассмотрим критически основные положения гипотезы Смирнова. Главное утверждение состоит в том, что устойчивость ШМ обусловлена жесткостью ее каркаса, т. е. жесткостью твердого тела. Сам по себе каркас имеет ту форму, какая была у него в

момент возникновения; сферическая — только одна из многих возможных. Тогда с равной вероятностью должна существовать как сферическая, так и, например, кубическая молния. Чтобы все же объяснить наличие сферической формы у ШМ, приходится вводить дополнительные предположения. Согласно одному варианту, ШМ вращается в сдвиговых течениях<sup>11</sup> и приобретает сферическую форму, наподобие комка пуха, катающегося по земле. Но если форма каркаса легко меняется в сдвиговых потоках воздуха, то она должна меняться и в других течениях, например, турбулентных, а в спокойной атмосфере (в закрытых помещениях) быть вообще неопределенной. Напротив, известно, что ШМ везде появляется сразу в виде шара. Другой вариант — ШМ только кажется нам сферической из-за быстрого вращения в сдвиговых течениях. Но для этого она должна вращаться весьма быстро, что при реальных градиентах скорости ветра маловероятно.

Кроме того, в горячих точках каркаса вещество будет находиться в расплавленном состоянии, но это сильно ослабит жесткость, а именно она должна обеспечить устойчивость формы. Что касается варианта гипотезы, где каркас состоит из органического полимера, то его существование вообще не совместимо с высокой температурой.

### ШАРОВАЯ МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

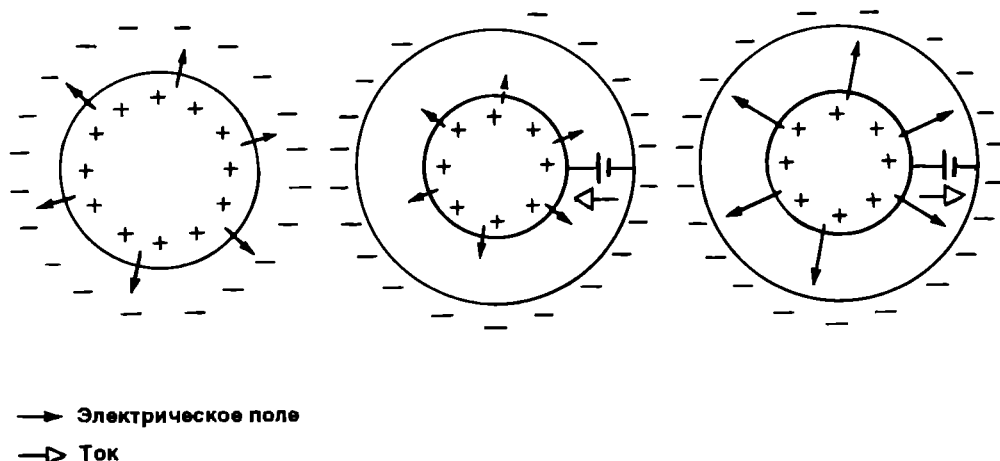
Возможно, трудности в понимании ШМ возникли потому, что не учтена какая-либо ее важная особенность. Обратим внимание, что молния испускает искры, ударяет током человека, плавит и испаряет металлические предметы при контакте с ними и на некотором расстоянии от них. Существенно, что эти связанные с электричес-

<sup>8</sup> Смирнов Б. М. Шаровая молния — что же это такое? // Природа. 1987. № 2. С. 15—26; он же. Загадка шаровой молнии // Новое в жизни, науке, технике. М., 1987.

<sup>9</sup> Фрактал — это структура, имеющая дробную размерность. Примером является ветвь дерева: она делится на мелкие ветви, те делятся снова и так далее. Фрактал подобен сам себе на различных пространственных масштабах.

<sup>10</sup> Bychkov V. L. Polymer Ball Lightning Model // Physica Scripta. 1994. № 50. P. 591—599.

<sup>11</sup> Сдвиговое течение — это течение, в котором скорость плавно меняется в соседних слоях. Такое течение имеется, в частности, вблизи поверхности земли, обдуваемой ветром.



*Модель шаровой молнии как аналог электрохимического аккумулятора. Молния представляет собой аэрозольное облако (слева), в нем происходят химические реакции с образованием заряженных частиц, что служит причиной возникновения стороннего тока, который поддерживает собственное электрическое поле. Внутренняя и внешняя части молнии заряжены противоположно, давление внутри молнии чуть меньше, чем снаружи. При мгновенном значении поля меньше величины, соответствующей ЭДС (в середине), течет сторонний ток, происходит разделение зарядов за счет превращения химической энергии в электрическую.*

*Поле увеличивается. Если поле больше величины, соответствующей ЭДС (справа), возникает ток проводимости. Поле уменьшается. В зависимости от мгновенного значения электрического поля результирующий ток может течь в одну или другую сторону. Внешняя оболочка молнии может быть частично потеряна во время ее эволюции, например, сдута при движении. На следующих рисунках молния изображена без внешней оболочки, т. е. представлена своим ядром, в основном и определяющим рассматриваемые здесь свойства ШМ.*

кими силами явления происходят как вне помещений, так и в них. Последнее свидетельствует о том, что ШМ имеет собственное электрическое поле. Предположим, что внутри молнии есть постоянно действующий источник, который поддерживает ее электрическое поле и способен создавать ток во внешней среде. Возьмем собственное электрическое поле в качестве отправной точки при построении модели ШМ<sup>12</sup>.

Пусть ШМ представляет собой не каркас, а аэрозольное облако, в котором протекают химические реакции с выделением энергии и появлением заряженных частиц (электронов или ионов). Примеры таких реакций извест-

ны и изучены. Основное наше утверждение состоит в следующем: в ШМ имеется сторонний ток, который создается возникающими заряженными частицами, т. е. работает электродвижущая сила, происходит разделение зарядов, что и приводит к возникновению в ШМ радиального электрического поля с большим потенциалом<sup>13</sup>. Таким образом, в шаровой молнии осуществляется преобразование химической энергии в энергию поля.

В состоянии равновесия возникающее таким образом поле задано величиной ЭДС и ток в ШМ отсутству-

<sup>13</sup> Сторонний ток — это ток, вызванный неэлектрическими силами. Аналогичные явления — это сторонние токи и поля с большими потенциалами, наблюдаемые в других дисперсных средах (в плазме, выхлопных газах реактивных двигателей, при взрыве), а также поля с небольшими потенциалами, возникающие в обычном электрохимическом аккумуляторе.

<sup>12</sup> Stepanov S. I. How Can an Electrochemical Model Solve the Mysteries of Ball Lightning? // Proc. of Europ. Interdisciplinary Congress on Ball Lightning, Sept. 1993. Salzburg, Austria.

ет (аналог — отключенный электрохимический аккумулятор). Если по какой-то причине величина поля изменилась, то в зависимости от знака этого изменения ток внутри молнии может течь в одну или другую сторону. Если поле меньше значения, соответствующего ЭДС, ток течет против поля — это и есть сторонний ток (аккумулятор преобразует химическую энергию в электрическую). Если поле больше того, которое соответствует ЭДС, ток течет по полю — это ток проводимости (аккумулятор заряжается от внешнего источника энергии).

Поскольку ШМ является дисперсной средой, протекание токов в ней имеет некоторые особенности: и концентрация, и энергия заряженных частиц здесь могут меняться, вызывая изменение тока. В результате одному значению напряженности поля могут соответствовать различные значения плотности тока. Часто протекание тока демонстрирует гистерезис: при увеличении поля плотность тока меньше, чем при уменьшении поля (при той же напряженности). Эта особенность приводит к развитию тех или иных неустойчивостей в токовых явлениях. Известным примером таких неустойчивостей являются страты — непостоянство свечения в люминесцентных лампах.

В ШМ равновесное состояние в принципе устойчиво, однако в силу того, что связь между напряженностью поля и плотностью тока в ней не вполне однозначна, в устойчивом состоянии появляются небольшие спонтанные токи (сторонний или ток проводимости), а поле колеблется вокруг некоторого «среднего».

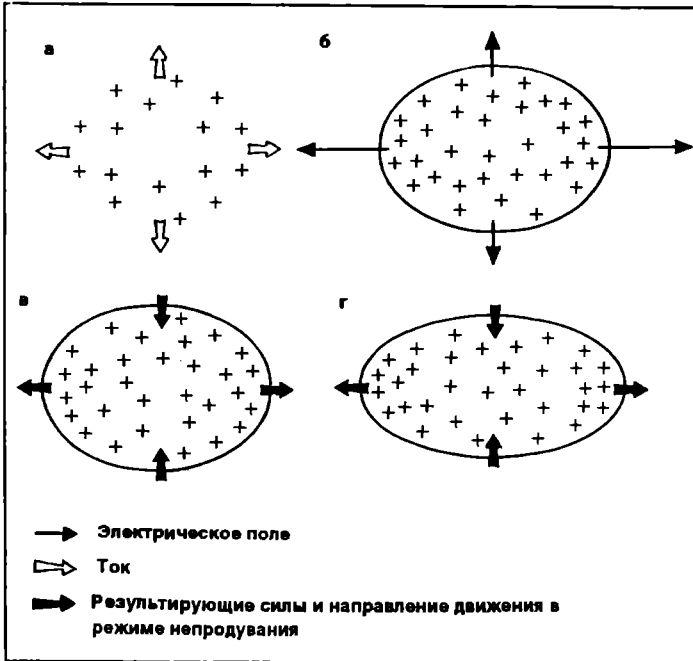
С колебаниями поля и возникновением спонтанных токов в нашей модели можно связать радиопомехи, которые природная ШМ вызывает в близко расположенных приемниках, колебание свечения всей молнии, неравномерность интенсивности свечения и цвета по поверхности, выбрасывание «искр» или кусков светящегося вещества, звуки (обычно это шипение или потрескивание).

До сих пор речь шла лишь о разделении зарядов в молнии. Будем считать, что ШМ состоит из более плотного ядра и внешней оболочки. Предположим, что часть этой оболочки «сдувается» во время движения и у молнии остается нескомпенсированный электрический заряд. Рассмотрим устойчивость формы такой системы.

Любое заряженное облако под действием кулоновских сил отталкивания стремится к расширению в радиальном направлении. Заряженные частицы при дрейфе в собственном электрическом поле облака сталкиваются с молекулами воздуха и увлекают их за собой, что облегчает движение частиц, так как они все движутся в потоках от соседей.

Движение заряженных частиц в поле вместе с увлеченным воздухом известно под названием «электрический, или ионный, ветер». Под высоковольтной линией слышится потрескивание — это и есть электрический ветер, т. е. движение зарядов вместе с воздухом в электрическом поле проводов. В облаке из редко расположенных частиц эффект увлечения воздуха незначителен, а в достаточно плотном облаке весь внутренний воздух «захватывается» движущимися частицами, и возникает явление непродуваемости: внешний воздух обтекает облако как единое целое. Непродуваемость больше известна нам по движению в поле силы тяжести. Отдельная пушинка падает довольно медленно. Если собрать пушинки в комок, то комок падает значительно быстрее, поскольку наружный воздух обтекает комок как целое и сопротивление движению уменьшается.

Аналогично этому непродуваемое заряженное облако быстрее перемещается во внешнем электрическом поле, но, казалось бы, оно должно скорее рассеяться в пространстве из-за более эффективного разлета отталкивающихся друг от друга частиц. Однако это не так. В сферическом заряженном облаке, разлетающемся в собственном поле, непродуваемость приво-



*Неустойчивость формы заряженного облака: а — облако из редко расположенных частиц расширяется во всех направлениях за счет их дрейфового движения; б — заряды и поля в плотном (непродуваемом) деформированном заряженном облаке, возникшем из сферического. В выступающих частях облака поля больше, чем в плоских частях; в — силы в том же облаке. Кулоновская сила преобладает над перепадом давления в выступающих частях и выталкивает их наружу. Перепад давления преобладает над кулоновской силой на плоских частях и вдавливают их внутрь; г — облако продолжает деформироваться и распадается.*

дит к тому, что внутри облака появляется разрежение и возникает перепад между внешним давлением и давлением внутри облака. Когда вскоре этот перепад в точности уравнивает кулоновскую силу, быстрое радиальное движение заряженных частиц наружу прекратится и останется лишь медленный их дрейф. Заметим, что для реальной ШМ скорость дрейфа частиц в собственном поле молнии очень мала, поэтому время разлета ШМ за счет дрейфа значительно больше, чем время ее жизни.

Баланс перепада давления и кулоновской силы дает для первого выражение:

$p = E^2 / 8\pi$ , где  $E$  — поле на границе облака. Оценивая перепад давления для поля пробоя воздуха (30 кВ/см), получаем  $p = 0,0005$  атм, т. е. небольшую величину.

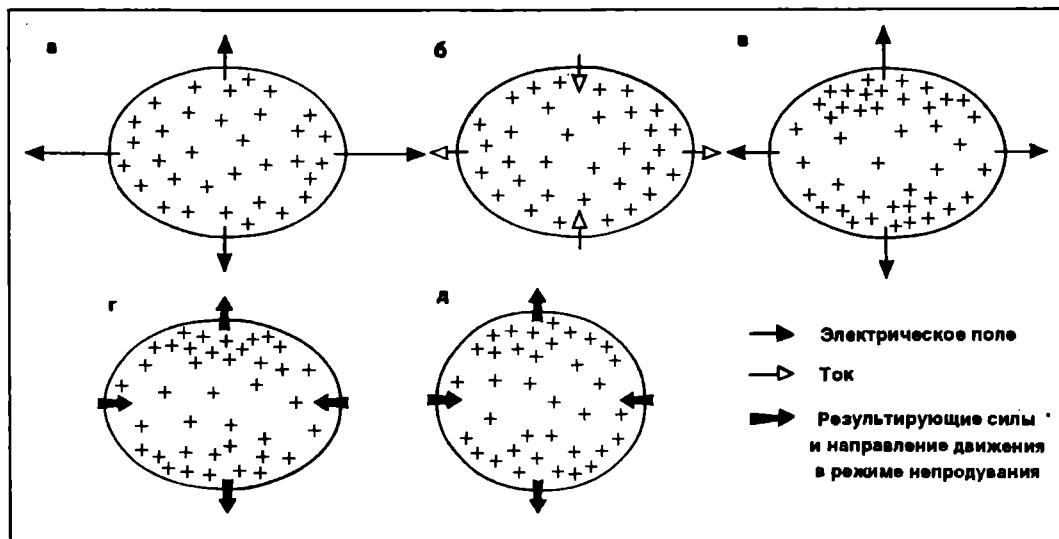
Пусть далее наше облако деформировалось под влиянием какого-либо внешнего воздействия. При этом поля в каждой точке облака изменились. В выступающих частях поля и соответственно кулоновские силы стали больше,

чем в сферическом облаке, на плоских частях — меньше<sup>14</sup>. Перепад давления между внешней средой и внутренней частью облака одинаков для всех его частей. Поэтому в выступающих частях кулоновская сила превышает перепад давления и эти части выталкиваются наружу, а в плоских, наоборот, перепад давления превышает кулоновскую силу и эти части вдавливаются внутрь, деформация увеличивается, и облако в конечном итоге распадается.

Итак, обычное заряженное облако не устойчиво к деформации. А как поведет себя в этом случае ШМ, в которой действуют сторонние силы? Пусть ШМ получила деформацию. Сразу после этого распределение зарядов и полей в ней выглядит так же, как в обычном деформированном облаке. Теперь в выступающих частях поле стало больше, чем равновесное, соответствующее ЭДС, а в плоских —

<sup>14</sup> Это качественное утверждение можно формализовать: при эллипсоидальной форме облаков соответствующие поля поддаются строгому расчету.





Устойчивость формы шаровой молнии: а — заряды и поля, которые есть в ШМ непосредственно после деформации. В выступающих частях поля больше значения, соответствующего ЭДС, в плоских — меньше; б — токи возникают в деформированной ШМ потому, что поля отличаются от значения, соответствующего ЭДС. В выступающих частях имеется ток проводимости, в плоских — сторонний ток; в — заряды и поля, которые

возникают под действием этих токов. Поля близки к значению, соответствующему ЭДС, плотность заряда на плоских частях больше, чем на выступающих; г — силы в деформированной ШМ. Кулоновская сила преобладает над перепадом давления на плоских частях, она выталкивает их наружу. Перепад давления преобладает над кулоновской силой в выступающих частях и вдавливают их внутрь; д — сферическая форма ШМ восстанавливается.

меньше. В соответствии с этим в выступающих частях течет ток проводимости и плотность зарядов уменьшается, а в плоских частях текут сторонние токи и плотность увеличивается.

Изменение полей происходит, в первом приближении, до тех пор, пока поля снова не станут равны полю, соответствующему ЭДС. Для эллипсоидов можно точно решить задачу поиска распределения зарядов на основе известного поля. Оказывается, что плотность заряда на плоских частях становится больше, чем на выступающих, а направление сил противоположно силам в обычном деформированном облаке: в выступающих частях ШМ перепад давления преобладает над кулоновской силой, он толкает эти части внутрь, в то же время кулоновская сила, превосходящая перепад давления, выталкивает наружу плоские части. Тем самым ШМ восстанавливает сферическую форму.

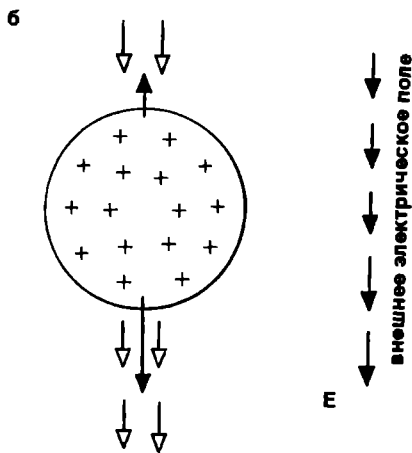
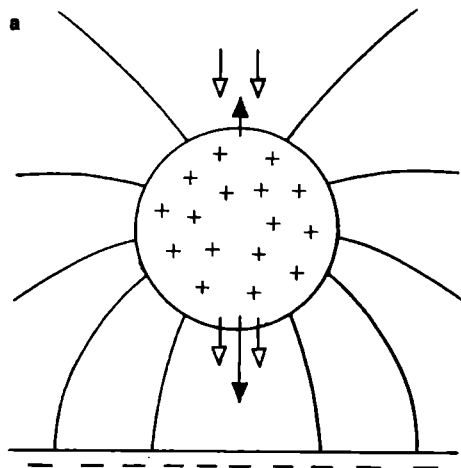
Учет гистерезиса не меняет принципиально обрисованной картины, правда, он может и способствовать, и препятствовать восстановлению формы.

Химическая реакция, дающая заряженные частицы, может прекратиться, например, из-за того, что исчерпан запас исходных веществ. Тогда механизм устойчивости перестанет работать и ШМ превратится в обычное заряженное облако, которое распадается. Этим можно объяснить такое странное явление, как взрыв или погасание молнии без видимых причин.

#### МОДЕЛЬ И ПОВЕДЕНИЕ МОЛНИИ

Попробуем объяснить некоторые известные свойства ШМ в рамках нашей гипотезы.

Природная ШМ плавит и испаряет металлические предметы, не трогая, как правило, диэлектрики. Известен случай, когда молния расплавила и испарила катушку репродуктора, совер-



→ Электрическое поле

→ Ток

шенно не затронув соседних картонных деталей. Если ШМ находится возле проводящего или диэлектрического тела, то при ее приближении к телу в нем появляются наведенные заряды, и молния притягивается к нему. Поле в ШМ, в свою очередь, перераспределяется: в области, обращенной к телу, оно увеличивается, а в области, удаленной от тела, уменьшается. Так как поля в обеих областях не равны теперь полю, соответствующему ЭДС, возникают токи — ток проводимости и сторонний, соответственно. Вследствие

*Шаровая молния вблизи проводящего или диэлектрического тела (вверху). Будучи заряженной, она приводит к появлению в теле наведенного заряда, что вызывает перераспределение поля в молнии. На стороне, обращенной к телу, поле становится больше значения, соответствующего ЭДС, на противоположной — меньше. Вследствие этого возникают ток проводимости и сторонний ток, и через ШМ к телу течет сквозной ток. Он лежит в основе явлений, сопровождающих контакт с телами, — возникновения искр между молнией и металлическим телом, расплавления проводников, распада ШМ, гидрирования.*

*Молния во внешнем электрическом поле (внизу). Внешнее поле накладывается на поле самой молнии. На одной стороне молнии поле становится больше поля, соответствующего ЭДС, на другой — меньше. Через молнию потечет ток, для которого она поставит заряженные частицы. Протекание тока приводит к выделению дополнительной энергии, которую наблюдатели принимают за энергию самой шаровой молнии.*

этого при приближении ШМ к телу течет сквозной ток. Если тело состоит из проводников и диэлектриков, ток проходит только через проводники. Это может вызвать их плавление и испарение.

Напомним, что струя Авраменко также расплавляет металлическую фольгу и не действует на диэлектрики, например на бумагу. Это свойство имеет то же самое объяснение, если считать, что воздействие на металлы оказывает электрический ток, причем струя Авраменко имеет постоянно действующий источник стороннего тока.

Между ШМ и металлическими телами наблюдаются искры, причем одна и та же молния может испускать их неоднократно. Как мы отметили, при приближении ШМ к телу возникает ток, который при большой напряженности поля может переходить в пробой. Заметим, что если бы в ШМ не было стороннего тока, постоянно возобновляющего поле, то многократное испускание искр оказалось бы невозможным.

Встреча ШМ с массивными металлическими предметами — например с отопительными батареями, водопроводными трубами — иногда оканчивается

взрывом или ее исчезновением. В нашей модели при взаимодействии ШМ с телами происходит искажение ее поля и сферически симметричного распределения зарядов. Следовательно, нет полной компенсации кулоновской силы и перепада давления. Это может приводить к распаду ШМ, который, в зависимости от ее энергии, наблюдается как взрыв или тихое угасание.

В случае встречи ШМ с диэлектриком она, как правило, отскакивает. Предположим, что ток проводимости между ШМ и телом приводит к переносу заряда на его поверхность и тем самым к компенсации наведенных на нем зарядов. Таким образом, поле наведенных зарядов, а вслед за ним и притяжение ШМ к диэлектрику исчезают. Вот почему встреча с диэлектриками не приводит к распаду молнии. Вместо этого она восстанавливает форму так, как об этом уже говорилось. Поскольку тело препятствует восстановлению формы сплюсщенной ШМ с одной стороны, то появляется импульс, направленный от тела, и ШМ отскакивает. То же самое может происходить, если небольшой проводник изолирован или покрыт краской.

ШМ движется на некоторой высоте от земли, пола, способна следовать по тропинке, дороге, ручью. Наблюдали, как она двигалась над рекой и, встретив мост на своем пути, поднялась и перелетела через него. Это свойство, называемое гидированием, выглядит весьма загадочно. Ясно, что в этом состоянии сумма всех вертикальных сил, действующих на ШМ, равна нулю, но как это получается?

С нашей точки зрения, ток, текущий через ШМ и вызванный перераспределением ее поля при нахождении вблизи земли, приводит к тому, что молния разогревается джоулевым теплом. Вследствие нагрева ее

плотность уменьшается и появляется выталкивающая сила, направленная вверх. Можно предположить, что она больше, чем кулоновская сила притяжения, тогда будет происходить всплытие молнии. Когда она поднимается вверх, все эти явления ослабевают и на какой-то высоте сумма вертикальных сил станет равной нулю.

Известно, что ШМ может выделять большую энергию, и ранее мы показали, что она обусловлена энергией внешнего электрического поля. В нашей модели взаимодействие молнии с внешним электрическим полем выглядит следующим образом. С одной стороны ШМ поле увеличивается, с противоположной — уменьшается. Поскольку поля не равны полю, соответствующему ЭДС, появляются токи сторонний и проводимости, и через ШМ течет сквозной ток. Если он очень велик, то и выделяется та большая энергия, которую наблюдатели принимают за энергию ШМ.

Исследования шаровой молнии, берущие начало в конце XIX в., сейчас быстро развиваются. Прогресс налицо и в получении ее лабораторных аналогов, и в теоретических исследованиях, и в изучении свойств природной ШМ.

Хочется надеяться, что данная публикация послужит побудительным мотивом для привлечения исследователей к изучению молнии, а также будет способствовать возникновению новых идей в теоретических представлениях о ней. Сбор наблюдений о шаровой молнии в природе по-прежнему актуален<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Этим специально занимается группа исследователей в Ярославле. Ее адрес: 150000, Ярославль, ул. Советская, 14, Госуниверситет. «Шаровая Молния», Григорьеву Александру Ивановичу.

# В России создано Океанографическое общество

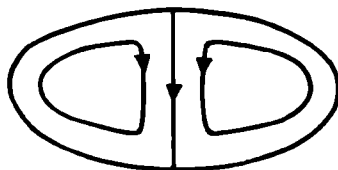
**А. Л. Берестов,**

доктор физико-математических наук,  
президент Океанографического общества  
Москва

**В** НОЯБРЕ 1994 г. Управление юстиции г. Москвы выдало свидетельство о регистрации Устава общественного объединения «Океанографическое общество», а в декабре эта новая организация была принята в Союз научных обществ России.

Тот факт, что уже много лет успешно действуют Географическое, Физическое, Астрономическое и другие научные общества, свидетельствует о том, что объединение по профессиональному признаку может не только содействовать развитию связей между учеными, но и помочь им выжить в условиях сокращения финансирования науки. Заметим, что во многих странах, в частности в США и Японии, давно активно работают именно океанографические общества, ставящие целью распространение знаний об океане, и объединение специалистов, работающих в этой области.

Несколько причин побудили к активизации усилий по созданию такого общества в нашей стране. Ныне российская океанология вступила в пору зрелости: новые открытия, технологии и новые идеи привели к пониманию того, что океан сам по себе и особенно его прибрежные зоны являются ключевыми при решении многих социально-экономических и естественнонауч-



*Эмблема Океанографического общества.*

ных проблем — таких, например, как устойчивое развитие приморских регионов, рациональное использование океанских ресурсов, динамика экосистем, разработка полезных ископаемых, глобальные изменения климата и т. д. В настоящее время в России существует множество научных учреждений, занимающихся проблемами океанологии и ее приложений, а количество специалистов, вовлеченных в такие исследования, трудно даже оценить — все это позволяет нам ощущать себя частью особого сообщества, не уступающего по численности геологам, физикам или биологам. Еще одна причина заключается в растущих затратах на исследования, связанных с использованием новейших технологий: это и эксплуатация современных океанографических судов, и настоятельная необходимость дистанционного зондирования океана из космоса, и обработка колоссальных массивов данных, и численное моделирование на суперкомпьютерах. Ясно, что в

условиях сокращения бюджетного финансирования нужно искать новые источники и пути увеличения ассигнований на науку.

Можно только удивляться, что океанографическое общество до сих пор не было создано, хотя эта идея давно носилась в воздухе и целиком поддерживалась и работающими в России учеными, и теми, кто уехал за рубеж. И вот небольшой коллектив (в который вошли А. С. Монин, Ю. А. Иванов, А. Л. Берестов, Ю. Г. Михайличенко, С. М. Шаповалов, А. И. Харламов и др.) в течение нескольких месяцев разработал устав, подготовил необходимые документы и зарегистрировал факт образования Океанографического общества. По договоренности с руководством Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН нашей общественной организации предоставлен юридический адрес Института; был найден и спонсор в лице акционерного общества «Медицина. Экология. Космос», согласившегося профинансировать регистрацию Общества.

Что оно может дать своим членам? В первую очередь в случае своего успешного развития оно поможет океанологам почувствовать себя объединенными. Оно поможет всем, кто продолжает заниматься наукой, усилить свой голос и влиять на принятие решений, касающихся будущего океанологии. Чем больший

авторитет будет завоеван Обществом, тем больше вероятность организации им поддержки науки.

Океанографическое общество ставит перед собой следующие основные задачи:

— организация подготовки квалифицированных ученых, инженеров и менеджеров, способных находить и реализовать нестандартные и всеобъемлющие решения проблем, касающихся взаимоотношений экономического развития и окружающей среды, изучения Земли, рационального и экологически грамотного использования природных ресурсов;

— поддержка и содействии реализации международных, национальных и иных программ в области

формирования устойчивого характера развития общества, наук о Земле, совершенствования технологий охраны окружающей среды и т. п.;

— сбор, анализ и распространение научной информации, содействие сотрудничеству ученых; проведение национальных и международных конференций, семинаров и других встреч по тематике Общества;

— просветительская и издательская деятельность;

— наконец, конкретная и уже начавшаяся работа по содействию реализации государственных научно-технических программ, в частности ГНТП «Комплексное исследование океанов и морей, Арктики и Антарктики».

В Океанографическом обществе допускается индивидуальное и коллективное членство. Оно может присуждать звание «Почетного члена», награждать дипломами, грамотами и медалями. Подробнее с Уставом можно ознакомиться в правлении Общества или в библиотеке ИО РАН (наши телефоны: 135-15-68, 124-77-33; факс: 124-59-83, e-mail: kharlamov@glas. arc. org.).

Сегодня для нас важно прежде всего — привлечение новых членов, это позволит Океанографическому обществу завоевать авторитет, с тем чтобы использовать его для реализации поставленных целей.

## НОВОСТИ НАУКИ

### Организация науки

#### «Не продается вдохновенье, но...»

В апреле с. г. журнал «Nature», гордость британской науки и журналистики, вместе с его издательством Макмиллан (основано в 1843 г.) был куплен немецким издательским концерном «Георг фон Хольцбринк» (Штутгарт). Новость вызвала широкий резонанс в научной прессе. Ранее этот концерн уже приобрел кон-

трольные пакеты нескольких американских издательств, в частности ему принадлежит журнал «Scientific American».

До смены владельца большая часть акций компании Макмиллан принадлежала семейству Макмилланов. Длительный период фирму возглавлял Г. Макмиллан, который с 1957 по 1963 г. был премьер-министром Великобритании.

Журнал «Nature», который в прошлом году отметил свое 125-летие, выходит отдельными изданиями также в США, Японии,

Китае и (в сокращенном виде) в России, его общий тираж составляет около 55 тыс. экз. С учетом рекламы до последнего времени это было достаточно доходное издание. Переходный период для «Nature» осложняется предстоящим уходом на пенсию сэра Джона Мэддокса, который возглавлял журнал начиная с 1966 г. (с семилетним перерывом).

Nature. 1995. V. 374. P. 293, 664 (Великобритания); Science. 1995. V. 268. P. 360 (США).

Физика

Археология.  
Антропология

## Новая структура транзисторов на полимерах

Как известно, транзисторы обычно реализуются на неорганических полупроводниках типа Si, GaAs. В последнее же время возрастает интерес к использованию органических полупроводников, что объясняется их структурной гибкостью и легко изменяемыми электронными свойствами. До сих пор в таких транзисторах использовались эффе́кты, вызываемые объемным электрическим полем, однако малая подвижность носителей в органических материалах обуславливает низкое быстроедействие этих приборов.

Й. Янг и А. Дж. Хигер (Y. Yang, A. J. Heeger; UNIAХ Corporation, Санта-Барбара, штат Калифорния, США) предприняли попытку решить эту проблему, предложив отличную от прежней геометрию прибора, напоминающую ламповый триод. Структура прибора представляет собой сэндвич: тонкая пленка полупроводникового полимера помещена между двумя металлическими электродами, а третий электрод — слой пористого металлического полимера — вживлен внутрь полупроводника и выполняет роль сетки в вакуумной лампе.

Такая конструкция прибора позволяет уменьшить длину пути носителей заряда и обеспечивает короткое время отклика.

Nature. 1994. V. 372. № 6504. P. 344 (Великобритания).

## Снова про Этци

Изучение мумии чело́века, найденной в 1991 г. на леднике в Тирольских Альпах, дает все новые открытия<sup>1</sup>.

Этци, получивший свое прозвище по названию хребта, где его обнаружили, жил в самом начале бронзового века, примерно 5 тыс. лет назад и, по-видимому, хорошим здоровьем не отличался. Об этом, в частности, говорят рентгеновские снимки, сделанные Д. цур Недденом (D. zur Nedden; Инсбрукский университет, Австрия).

Обработавший снимки У. Мерфи (W. Murphy, глава онкологического центра им. М. Д. Андерсона при Университете штата Техас, Хьюстон, США) установил, что у Этци было всего 11 пар ребер вместо обычных 12, что ныне встречается весьма редко. На некоторых ребрах сохранились признаки переломов.

От современного нам человека Этци отличают мощные надбровные дуги; его большеберцовые кости длиннее и уже, а зубов мудрости нет вообще. Кроме того, между передними зубами — необычно большие пробелы. Все эти черты могут иногда встречаться и у нынешних людей, но лишь порознь, а не разом у одного индивидуума.

Обнаружены свидетельства, что Этци, которому к моменту гибели исполнилось около 35 лет, страдал артритом шейных позвонков, поясничного отдела и правого бедра. Переломы ребер произошли, очевидно в более раннем возрасте, так как успели сростись. Такие травмы могли возникнуть при тяжелом падении, в результате боевых ранений или нападения крупного зверя. Следует отметить, что специалисты сумели провести различия между травмами, полученными при жизни, и повреждениями, которые были нанесены трупу, лежащему в двигающемся леднике, а также во время изъятия его из горно-ледяной могилы.

На одном из пальцев ноги есть следы постоянного обморожения, длившегося месяцами или даже годами. Значит, Этци не был новичком в горах и, скорее всего, был не пастухом, а охотником.

Станным выглядит тот факт, что его артерии и другие кровеносные сосуды были обызвествлены. Обычно такое заболевание ныне приписывают несбалансированной диете; люди же древние, как полагали специалисты, питались «правильнее» и могли избежать ряда сердечно-сосудистых заболеваний. Однако, судя по состоянию Этци, это не абсолютно верно. Мерфи даже считает, что, проживи его необычный «пациент» подольше, он скончался бы от сердечной недостаточности.

Изучение уникальной мумии продолжается.

New Scientist. 1994. V. 144. № 1956. P. 10 (Великобритания).

<sup>1</sup> Подробнее см.: Мащенко Е. Н. Мумия «ледяного человека» из неолита // Природа. 1994. № 2. С. 50—53.

## Можно ли нормировать загрязнения, или «Зачем советскому человеку слон?»

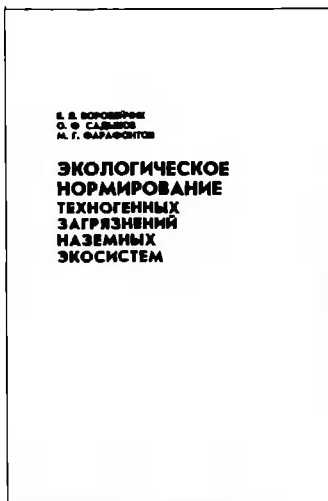
С. В. Багоцкий,

кандидат биологических наук  
Москва

**Б**ЕЗ СОМНЕНИЯ, книга, о которой пойдет речь, привлечет внимание самых разных специалистов. Она интересна и для экологов (как сухопутных, так и водных), и для технологов, и для экономистов, и для юристов, и для менеджеров, и для политиков. Ибо обсуждаемый в ней предмет относится к числу сверхактуальных. Каковы допустимые пределы антропогенной нагрузки на природные системы? Как эти пределы можно определить? В каком виде должны быть заданы нормативы воздействия на окружающую среду? На эти вопросы в настоящее время нет обоснованных ответов. Но обсуждать их необходимо.

Книга состоит из двух частей: «Теория экологического нормирования» и «Опыт реализации экологического нормирования».

Первая часть носит в значительной степени философский характер. И начинается с обсуждения философского вопроса, что такое «хорошая экосистема». Приводя различные взгляды, авторы склоняются к тому, что «хорошая экосистема» — понятие относительное. Для кого хороша — для человека или для какого-то другого вида?



Е. Л. Воробейчик, О. Ф. Садьков, М. Г. Фарафонов. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. 280 с.

Если существуют критерии, по которым мы можем отличить большого человека от здорового, то понятие «здоровой» и «больной» экосистемы бессмысленно. Она может быть признана «здоровой» или «больной» лишь с точки зрения человека. При этом авторы всячески призывают не путать антропоцентризм с технократическим подходом к природе. Последний осуждается, а первый рассматривается как единственная надежная основа для нашей деятельности.

Думаю, что позиция

авторов неприемлема как с философской, так и с практической точек зрения. Отказ от представлений об объективной экологической норме приведет нас к необходимости каждый раз отвечать на вопрос Аркадия Райкина: «А зачем советскому человеку слон?» Далеко не всегда наши знания помогут нам дать обоснованный ответ. И правильную линию поведения по отношению к слону мы сумеем сформировать лишь в том случае, если будем убеждены, что долговременные интересы человечества совпадают с долговременными интересами большинства из ныне живущих видов, т. е., условно говоря, с общим интересом биосферы. И поэтому за уничтожение слонов природа нас (так же, как и другие виды) рано или поздно накажет, хотя и непонятно как. Следование нормам биосферы — в интересах человека, а это значит, что такие нормы объективно существуют. Более того, они более наглядны и очевидны, чем долговременные интересы человечества, которые еще неизвестно в чем заключаются.

Впрочем, почти тут же авторы приводят различные критерии «хороших экосистем» (по А. П. Левичу, С. С. Шварцу и др.). Многие из этих критериев нельзя признать удачными. Например, в плане этих критериев болотные экосистемы никак нельзя признать

© Багоцкий С. В. Можно ли нормировать загрязнения, или «Зачем советскому человеку слон?».



хорошими. Так что же, осушать болота?

К слову, насчет критериев и параметров. Это, как справедливо подчеркивают авторы, чрезвычайно важная проблема. И очень важно научиться выделять ключевые параметры, определяющие состояния экосистемы, и коррелятивные, свидетельствующие о происходящих изменениях. Это положение иллюстрируется в книге в примере вурдалаков, вредоносность которых заключается в том, что они пьют кровь, а коррелятивные параметры — отсутствие тени и причмокивание — позволяют безошибочно их узнать.

Вкратце очерчены подходы к нормированию загрязнений окружающей среды, принятые в странах Запада и в СССР. При этом справедливо подчеркивается эффективность экономического регулирования. Однако авторы обходят вопрос о том, может ли «чистая» промышленность развитых стран обойтись без «грязной» промышленности стран слаборазвитых, в число которых, к сожалению, ныне вошли страны бывшего социалистического лагеря. И шире: возможно ли вообще достигнуть экологического благополучия в одной отдельно взятой стране?

В книге справедливо отмечено, что «существующая у нас в стране практика регламентации природопользования не объединена в единую систему. Набор норм и нормативов сложился в основном по авральному способу и поэтому охватывает только такие сферы воздействия, где возникают наиболее острые конфликты» (с. 49). Иными словами, единой политики в области нормирования природопользования у нас нет. Хотя концепции есть.

Авторы рассматривают концепции, развивавшиеся С. С. Шварцем, Н. С. Строгановым, А. П. Левичем, Д. А. Криволицким, Ю. Г. Пузаченко и другими исследователями. Среди них следует особо отметить взгляды Ю. А. Израэля, который предлагал разделить все экосистемы на три категории: уникальные (заповедные), широко распространенные (естественные), сильно преобразованные (искусственные). В экосистемах первой категории нагрузка должна исключать выпадение любого вида; в экосистемах второй допустимы некоторые изменения видового состава; наконец, экосистемы третьей группы допустимо искусственно переделывать в соответствии с нашими интересами.

Здесь существенна мысль, что сохранение видового состава экосистемы требует гораздо более жестких экологических нормативов, чем сохранение экосистемы в целом. Это обстоятельство необходимо учитывать не только на заповедных территориях, но и во всех ситуациях, когда в центре внимания стоит охрана какого-то вида. Сравнительно небольшое загрязнение окружающей среды может сдвинуть тонкий баланс конкурентных отношений и привести к исчезновению вида. Это было продемонстрировано в опытах Г. Ле Бланка с двумя видами дафний. Существенно то, что с помощью токсикологических экспериментов невозможно измерить изменение относительной конкурентоспособности в реальном биогеоценозе.

Это означает, что наряду с экосистемными нормативами должны существовать и популяционные. В одних случаях (специализи-

рованный вид с жесткими биотическими связями) эти нормативы будут жестче, чем экосистемные и организменные; в других (мало-специализированный, быстро эволюционирующий вид с гибким поведением, подобный крысе) — очень мягкими: экосистема разрушится, а крысе все ни почем.

Главным нормативом, используемым в настоящее время, служит Предельно Допустимая Концентрация (ПДК) того или иного вещества. Авторы предлагают заменить ПДК Предельно Допустимыми Экологическими Нагрузками (ПДЭН). Во второй части книги подробно описывается процедура определения ПДЭН Среднеуральского медеплавильного завода по отношению к лесному биогеоценозу. Это длительная, сложная, дорогостоящая процедура, и боюсь, что определенные таким образом ПДЭН унаследуют главный недостаток ПДК. Этот главный недостаток заключается в том, что само существование ПДК как государственного норматива освобождает предприятия от каких-либо размышлений об экологических последствиях своей деятельности. В лучшем случае директор заботится лишь о соблюдении ПДК, в худшем — не думает и об этом.

Наверное, излишне убеждать читателя в том, что ПДК как государственный норматив, может быть, и имеет санитарно-гигиенический смысл, но экологического смысла не может иметь в принципе. Экосистемы — разные, и устанавливать единую экологическую ПДК имеет такой же смысл, как предписывать из Москвы всем председателям колхозов, что и когда сеять.

Думаю, что будущее за принципиально другим

подходом. Нужно не нормировать выбросы или концентрации загрязняющих веществ, а ввести строгую экономическую ответственность за нанесенный экологический ущерб. Реальным инструментом такой ответственности может служить договор об охране водоема (или об охране воздушного бассейна, или чего-то еще). Этот договор государство заключает с экономически сильным предприятием-водопользователем. Согласно договору, предприятие берет на себя экономическую ответственность за поддержание должного экологического состояния водоема. Четкие, не допускающие превратных толкований критерии удовлетворительного экологического состояния должны быть однозначно сформулированы. В случае, если состояние экосистемы водоема перестанет удовлетворять сформулированным в договоре требованиям, предприятие будет обязано выплатить государству круглую сумму, вне зависимости от того, по чьей вине произошло ухудшение состояния водоема.

На реального виновника экологического безобразия охраняющее водоем предприятие может подать в суд и взыскать с него выплаченную государству сумму. За охрану водоема предприятие получит от государства деньги, которые вправе расходовать по собственному усмотрению.

Подобный механизм охраны экосистем создаст социальный и экономический заказ на исследования, позволяющие оценить реальные ПДЭН для конкретных природных объектов. Эти исследования будут оплачиваться предприятиями, охраняющими водоем, и, надо думать, оплачиваться щедро. Вот тогда идеи и разработки, описанные в рецензируемой книге, и найдут свое применение.

Разумеется, внедрение подобного механизма возможно лишь в цивилизованном государстве, где к закону относятся серьезно и уровень коррупции чиновников находится в определенных границах.

Подобный подход применим для загрязнений, последствия которых сказыва-

ются через длительное время. Но для таких вещей вообще трудно оценить безопасные концентрации. Поэтому самая разумная политика в данном случае — полное запрещение, подобно тому, как в конце концов был запрещен ДДТ.

Рецензируемая книга заслуживает очень высокой оценки и по богатству приведенного материала, и по глубине идей, и, наконец, по культуре языка. Все, о чем говорят авторы, свидетельствует, что разного рода модификации ПДЭН — это тупиковый путь экологического нормирования. И очень жаль, что они так и не решились окончательно поставить точки над «i».

В конце рецензии принято перечислять мелкие недостатки. Наверное, они есть. Но искать их неинтересно. Книга — фундаментальная и заслуживает серьезного и принципиального разговора, который, как я надеюсь, будет продолжен в специальной литературе.

#### Поправка

В январском номере «Природы» на с. 69 в подписи под рисунком, представляющим спектр Мандельштама—Бриллюэна, неправильно указано место, где выполнена работа. Следует читать: Работа выполнена в Бирмингемском университете, Великобритания.

## Портрет антигероя (Взлет и падение Тер-Оганезова)

В. А. Бронштэн,  
кандидат физико-математических наук  
Москва

Р. А. Мак-Катчен  
Вашингтон

Теперь Вартан Тигранович Тер-Оганезов — фигура почти забытая. Лишь время от времени в историко-научной литературе встречаются упоминания о его статье «За искоренение до конца вредительства на астрономическом фронте» («Мироведение», 1937, № 6). Эта публикация содержит чудовищные обвинения в адрес директора Пулковской обсерватории Б. П. Герасимовича (в том же году расстрелянного) и других пулковских «вредителей», процесс над которыми нанес страшный удар отечественной астрономии<sup>1</sup>.

Иногда имя В. Т. Тер-Оганезова всплывает в связи с так называемым «делом Стратонова», высланного на одном из «философских пароходов» в 1922 г., о чем уже рассказывалось<sup>2</sup>, и лишь изредка — в связи с идеологическим давлением

на советскую астрономию<sup>3</sup>. А между тем Тер-Оганезов имеет по этой части весьма значимые «заслуги».

Влияние Тер-Оганезова на науку (не только астрономию) подкреплялось его служебным положением. В 20-е и 30-е годы он занимал ответственные посты в Наркомпросе (первоначально был даже заместителем П. К. Штернберга по научному отделу), в Комитете по заведению учебных и учебными учреждениями ЦИК СССР и в ряде других советских учреждений.

### НАЧАЛО КАРЬЕРЫ

В. Т. Тер-Оганезов родился 10 октября 1890 г. в Тифлисе, в семье небогатого армянского дворянина Тигран-бека Тер-Оганесянца. Астрономией заинтересовался еще в гимназии и поступил на физико-математический факультет Петербургского университета. Стал членом Русского астрономического общества, занимался в студенческом

астрономическом кружке известного астронома А. А. Иванова. Под руководством С. П. Глазенапа выполнил в 1913—1914 гг. две работы по методике обработки наблюдений двойных звезд, так и оставшиеся единственными его научными публикациями, которыми он, однако, необычайно гордился. Все остальные его публикации (их насчитывается более 50) — это статьи философского, идеологического и даже политического содержания, а также научно-популярные книги, брошюры и очерки.

Преодолев не без шероватостей весь требуемый курс, Тер-Оганезов по рекомендации С. П. Глазенапа был оставлен при университете для подготовки к профессорскому званию. Но тут грянула Октябрьская революция.

Непосредственного участия в тех событиях Тер-Оганезов не принимал, однако, как указывает в своей автобиографии (1950 г.), уже в декабре 1917 г. «был введен А. В. Луначарским в состав руководящих работников Наркомпроса. Мне было поручено руководство всеми научными учреждениями и высшими учебными заведениями страны, включая Академию наук и университеты», — пишет он. Какой внезапный и мощный взлет!

© Бронштэн В. А., Мак-Катчен Р. А. Портрет антигероя (Взлет и падение Тер-Оганезова).

<sup>1</sup> См.: Успенская Н. В. Вредительство... в деле наблюдения солнечного затмения // Природа. 1989. № 8. С. 86—98. McCutcheon R. A. The 1936—1937 Purge of Soviet Astronomers // Slavic Review. 1991. V. 50 №1. P. 100—117.

<sup>2</sup> Бронштэн В. А. Изгнание Стратонова // Природа. 1991. № 1. С. 124—128.

<sup>3</sup> Казютинский В. В. Публичная «казнь» релятивистской космологии (события 30—40-х годов) // На рубежах познания Вселенной. М., 1900. С. 277—300; Бронштэн В. А. «Раковая опухоль» // Там же. С. 301—310.

**ОРГАНИЗАТОР СОВЕТСКОЙ НАУКИ?**

Став членом советского правительства, Тер-Оганезов в марте 1918 г. переезжает вместе с ним в Москву и поселяется в гостинице «Метрополь» (где прожил затем много лет). Его деятельность в 20-е годы широка и разнообразна. Вот как он сам описывает ее:

«Принимал непосредственное участие в организации институтов: Гидрологического, Рентгенологического, Физико-технического, Радиового, Астрономического, Геофизического, Биологического и многих других. Участвовал в организации и реорганизации университетов: Среднеазиатского, Горьковского, Казанского и других. Был председателем оргкомитетов по учреждению университетов: Белорусского, Воронежского и других. Руководил реорганизацией учебных планов МГУ. Подготавливал проекты и проводил через правительственные органы: о переходе на новый стиль, на поясное время, о переводе часовой стрелки и др. Участвовал в мероприятии «Развитие естественных производительных сил», [задании], поставленном В. И. Лениным перед Академией наук. Был одним из инициаторов рабфаков при вузах, одним из организаторов и членом Государственного ученого комитета».

Что это — хлестаковщина? Не совсем. Документы, как это ни странно, подтверждают, что Тер-Оганезов действительно в какой-то мере причастен к появлению некоторых из перечисленных институтов. Зафиксировано его участие в создании Химического и Астрономо-геодезического

институтов. Он нередко бывал председателем или докладчиком на совещаниях Наркомпроса, где обсуждались вопросы об организации новых научных учреждений, и, как правило, поддерживал инициативы крупных ученых<sup>4</sup>. В августе 1924 г. Тер-Оганезов вместе с академиком С. Ф. Ольденбургем был принят председателем Совнаркома А. И. Рыковым и от имени ряда ведущих ученых убеждал его в необходимости научного использования природных заповедников и вообще охраны природы в стране<sup>5</sup>.

Впрочем, основным местом работы Тер-Оганезова, начиная с 1918 г. и до конца его дней, была кафедра математики сначала Горной академии, а затем Московского геологоразведочного института, где он последовательно занимал должности доцента, профессора и заведующего кафедрой.

**ДЕЛО ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ГЛАВНОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ**

В 1920 г. астрофизик В. В. Стратонов внес на рассмотрение Наркомпроса проект организации на юге России большой астрофизической обсерватории, оснащенной современными телескопами и приборами. Проект поддержали многие российские астрономы, в их числе — академик А. А. Белопольский, члены-кор-

респонденты А. А. Иванов и С. Н. Блажко, профессора А. А. Михайлов, В. Г. Фесенков, С. В. Орлов, В. А. Костицын, К. Д. Покровский и многие другие. Вносились интересные предложения по тематике работы будущей обсерватории, директор Пулковской обсерватории А. А. Иванов обещал помочь с подготовкой молодых специалистов.

Короче говоря, все были за, и лишь один человек оказался против — член коллегии Наркомпроса Тер-Оганезов. Почему? Это осталось загадкой. Ведь все другие проекты такого рода он поддерживал. Более того, даже в конце 30-х годов он ставил себе в заслугу, что в 20-е годы боролся со Стратоновым. Если бы дело заключалось в том, что кто-то не доверял Стратонову, то Тер-Оганезов должен был бы выступать лишь против его кандидатуры в председатели Оргкомитета.

Научный отдел Наркомпроса, возглавляемый минералогом профессором Д. Н. Артемьевым, не послушал Тер-Оганезова. Оргкомитет Главной российской астрофизической обсерватории во главе с В. В. Стратоновым благополучно прошел утверждение, были организованы экспедиции в южные районы страны с целью выбора места для ее постройки, начато издание «Трудов» обсерватории. В 1923 г. возник Государственный астрофизический институт (ГАФИ).

Но директором его стал не Стратонов. К этому времени его уже выслали из Советского Союза. Спустя четыре года заместителем директора ГАФИ был назначен Тер-Оганезов. Он начал с того, что уволил Стратонова (который продолжал поддерживать связь

<sup>4</sup> Организация науки в первые годы Советской власти (1917—1925). Сб. документов. Л., 1968. С. 263—272.

<sup>5</sup> Иванова Л. В. формирование советской научной интеллигенции (1917—1927 гг.). М., 1980. С. 334.



*Вартан Тигракович Тер-Оганезов (1890—1962).*

с институтом и получал там зарплату). Еще через два года он уволил и заведующего теоретическим отделом В. А. Костицына, который уехал в заграничную командировку и не вернулся. Для того времени это была обычная реакция. Но Тер-Оганезов уже тогда противопоставил себя большинству авторитетных астрономов, таких как В. Г. Фесенков, С. В. Орлов и другие. Но это было только начало.

#### ТЕР-ОГАНЕЗОВ — ФИЛОСОФ

В большинстве публикаций, где так или иначе обсуждаются философские воззрения Тер-Оганезова, говорится преимущественно о его идеологической борьбе в 30-х — 50-х годах против теории расширяющейся Вселенной и релятивистской космологии.

Но философские выступления Тер-Оганезова начались гораздо раньше. В

1922 г. он печатает на страницах журнала «Под знаменем марксизма» статьи «Несколько мыслей о диалектике». По признанию Энгельса, говорится в статье, Маркс и Энгельс нигде не высказывали своих взглядов на диалектику Гегеля со всей полнотой. Кто же должен это сделать? Идеологи пролетариата, отвечает Тер-Оганезов. И тут же подвергает жестокой критике книгу одного из таких идеологов, ведущего партийного деятеля, впоследствии академика, Н. И. Бухарина. По мнению Тер-Оганезова, Бухарин со своей задачей не справился, а потому выступает сам как теоретик и предлагает «свежее» определение диалектики: это — наука о законах развития. В качестве примера, взятого из природы, он излагает «блестящую и в то же время правдоподобную» теорию Джорджа Дарвина об отделении Луны от Земли. Затем он дает ей философское истолкование: любая система развивается от состояния неустойчивого равновесия под действием внешних сил к состоянию устойчивого равновесия. И далее: «Процесс развивается от состояния, когда система находится под наибольшим влиянием среды, к состоянию, когда влияние среды на систему минимально».

В том же журнале Тер-Оганезов подверг жестокой критике книгу известного философа и богослова П. А. Флоренского «Мнимость в геометрии» (спустя 11 лет ее автор был репрессирован). В другой рецензии Тер-Оганезов замечивается на первое в то время лицо в партии — на Г. Е. Зиновьева, издавшего книгу «История РКП (большевиков)». Не глядя на

высокое положение ее автора (Сталин в те годы занимал в партийной иерархии лишь третье место, уступая Зиновьеву и Каменеву), Тер-Оганезов сурово критикует автора книги за множество ошибок, поверхностный подход и «схематизм».

#### ВТОРЖЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

В 1930 г. Тер-Оганезов одну за другой занимает ряд ключевых должностей в астрономических учреждениях и журналах. Весной 1930 г., после разгрома Русского общества любителей мироведения (РОЛМ)<sup>6</sup>, он переводит орган РОЛМ — журнал «Мироведение» — в Москву и занимает пост его ответственного редактора. Журнал резко меняет свое лицо — из научно-популярного издания для любителей астрономии превращается в боевой орган, пропагандирующий коммунистическую идеологию и воинствующий атеизм, предъявляющий к советским астрономам требование: все их научные работы пропозировать этой идеологией, беспощадно бороться с «буржуазным мировоззрением», с любыми проявлениями идеалистической идеологии. На страницах журнала развертывается критика ряда научных теорий и даже отдельных высказываний не только зарубежных, но порой и крупнейших советских ученых<sup>7</sup>. Так, выдающийся ма-

<sup>6</sup> Бронштэн В. А. разгром Общества любителей мироведения // Пирода. 1990. № 10. С. 122—126.

<sup>7</sup> Бронштэн В. А. Журнал «Мироведение» в московский период (1930—1937) // Историко-астрономические исследо-

тематик и механик академик А. Н. Крылов был обвинен Тер-Оганезовым в идеализме только за то, что призывал педагогов научить молодежь учиться. Это, по мнению Тер-Оганезова, противоречило принципам политехнического обучения (?!).

Одним из первых действий Тер-Оганезова на посту редактора «Мироведения» было открытое письмо советских астрономов римскому Папе Пию XI, в котором римская католическая церковь обвинялась в преследованиях Бруно, Галилея и других ученых. Нет надобности говорить, что многие достижения физики и астрономии тех лет Тер-Оганезов принимал весьма настроенно, а порой и просто враждебно.

В 1931 г. он занимает пост председателя Московского общества любителей астрономии (МОЛА) и на базе этого общества за полтора года организует Всесоюзное астрономо-геодезическое общество (ВАГО). Состоявшийся в январе 1934 г. Первый Всесоюзный астрономо-геодезический съезд избирает его первым заместителем председателя ВАГО — в этой должности он пробыл 21 год.

Каким образом Тер-Оганезову удалось занять сразу несколько важных, ключевых позиций в советских астрономических организациях? На этот вопрос невозможно ответить без предположения, что у него был некий покровитель во властных сферах. А посылку в 1938 г. началось падение Тер-Оганезова с утратой одной за другой

всех достигнутых позиций, сама собой приходит мысль, что к тому времени такого покровителя уже не было. Весьма вероятно, что этим человеком был заместитель наркома просвещения, историк М. Н. Покровский, умерший в 1932 г. Известно, что он благоволил Тер-Оганезову. Это по его заданию в 1918 г. молодой Тер-Оганезов разработал проект реорганизации Академии наук в Ассоциацию наук. Благодаря А. В. Луначарскому проект не прошел. Но критические выступления Тер-Оганезова в адрес Академии наук на страницах журнала «Мироведение» публиковались не раз.

#### НАЧАЛО ПАДЕНИЯ

Шестой номер «Мироведения» за 1937 г., в котором была опубликована печально известная статья Тер-Оганезова «За искоренение до конца вредительства на астрономическом фронте», оказался последним. Распоряжением отдела печати ЦК ВКП(б) журнал был закрыт, формально — объединен с «Наукой и жизнью».

Тер-Оганезов приписал это (в письме к Н. А. Морозову от 5 августа 1939 г.) «проискам врагов народа».

Комитет по заведованию учеными и учебными учреждениями, членом которого он состоял, в апреле 1938 г. был ликвидирован, часть его функций и учреждений (в их числе ВАГО) была передана Академии наук СССР. Тер-Оганезов лишился твердой опоры в Комитете, а в Академии наук он авторитета не имел.

Примерно в это же время решением ВАК Тер-

Оганезову были присвоены ученая степень кандидата физико-математических наук и ученое звание профессора. Против этого решения выступили известные математики академик С. Л. Соболев и профессор А. Ф. Бермант, опубликовавшие статью в газете «Правда» под названием «Либералы из ученой комиссии» (31 января 1939 г.). С официальным протестом выступила Группа математики Академии наук СССР. Но ВАК отклонил оба протеста и подтвердил прежнее решение.

Между тем весной 1938 г. в Московском отделении ВАГО проходили перевыборы правления, которое до этого в течение семи лет возглавлял Тер-Оганезов. И здесь против него организовалась сплоченная группа членов общества, называвшая себя «антитеровцами». В ее числе были такие известные молодые ученые, как Б. А. Воронцов-Вельяминов, В. В. Федьинский, Б. Ю. Левин, К. П. Станюкович. Возглавлял группу известный библиограф и редактор С. А. Шорыгин.

Незадолго до этого В. В. Федьинский обратился в ЦК ВКП(б) с письмом, в котором пытался привлечь внимание к неудовлетворительной работе Общества, несмотря на то, что во главе его стоит партийный председатель (Тер-Оганезов). Письмо подписало около 30 членов Общества. Предложили ознакомиться с ним и Тер-Оганезову. Он, конечно, задержал его у себя, а затем на партийно-комсомольской группе устроил «проработку» двум комсомольцам, подписавшим письмо.

Увидев, что против него объединилась довольно большая группа, Тер-Огане-

зов попытался найти опору в партийно-комсомольской части Московского отделения ВАГО. Членов партии тогда там было немного, комсомольцев — несколько десятков. Но, несмотря на их поддержку, кандидатура Тер-Оганезова была провалена на выборах 1938 и 1939 гг., а в 1940 г. даже отведена из списка кандидатов в правление.

Можно только удивляться мужеству «антитерровцев», осмелившихся в 1938 г., в разгар большого террора, выступить против не только Тер-Оганезова, заявлявшего, что он проводит «партийную линию», но и против поддержавшей его партийно-комсомольской части ВАГО. Удивительно, что никто из «антитерровцев» не был потом репрессирован.

После провала в Московском отделении ВАГО Тер-Оганезова вывели из редколлегии «Астрономического журнала» и из состава Астрономического совета АН СССР.

## ПОСЛЕДНЯЯ ПОЗИЦИЯ

Последней позицией Тер-Оганезова была должность первого заместителя председателя правления (с 1944 г. — Центрального совета) Всесоюзного астрономо-геодезического общества. Переизбрать его мог только очередной съезд, а все попытки созвать его и восстановить журнал «Мирозведение» оканчивались неудачей. Наконец, в январе 1955 г. в Ленинграде состоялся Второй съезд ВАГО. Тер-Оганезов из-за болезни не присутствовал. Это облегчило задачу его противникам.

А в их числе были не только прежние «антитерровцы» (Б. А. Воронцов-Вельяминов, В. В. Федынский и другие). К ним присоединились известные астрономы К. Ф. Огородников, В. П. Цесевич, Б. В. Кукаркин. И, несмотря на поддержку В. А. Амбарцумяна и ряда других делегатов съезда (преимущественно геодезистов), кандидатура Тер-Ога-

незова была забаллотирована. В том же году он был выведен из состава редколлегии «Бюллетеня ВАГО» — последнего астрономического «островка», на котором еще удерживался.

Надо сказать, что Тер-Оганезов перенес свое «отлучение от астрономии» стоически, регулярно ходил на собрания ВАГО и держался так, словно ничего не произошло.

Когда 13 апреля 1962 г. он скончался, ни одно астрономическое издание не опубликовало некролога — настолько одиозен он был в астрономических кругах. Краткое извещение о его кончине поместила «Московская правда», а многотиражка Московского геолого-разведочного института «Разведчик недр» — небольшой, но довольно теплый некролог.

Это напоминает конец пути Т. Д. Лысенко. Наука нетерпима к тем, кто пытается насиловать ее. Будем надеяться, что все это — в прошлом.

Над номером работали

Ответственный секретарь  
Л. П. БЕЛЯНОВА

Научные редакторы  
И. Н. АРУТЮНЯН  
О. О. АСТАХОВА  
М. Ю. ЗУБРЕВА  
Г. В. КОРОТКЕВИЧ  
Т. Ю. ЛИСОВСКАЯ  
М. С. ПОКРОВСКАЯ  
Н. А. ПОТАПОВА  
К. Л. СОРОКИНА  
Н. В. УЛЬЯНОВА  
Н. В. УСПЕНСКАЯ  
О. И. ШУТОВА

Литературный редактор  
М. Я. ФИЛЬШТЕЙН

Художественные редакторы  
Л. М. БОЯРСКАЯ, Е. В. СЕНИЦЫНА

Заведующая редакцией  
И. Ф. АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор  
Е. Е. БУШУЕВА

Компьютерный набор  
А. Г. ЕВСТИГНЕЕВ

Корректоры  
Т. Н. МОРОЗОВА  
Р. С. ШАЙМАРДАНОВА

В художественном оформлении  
номера принимали участие  
Д. В. СКОПИН, В. С. КРЫЛОВА

Издательство «Наука» РАН

Адрес редакции:  
117810, Москва, ГСП-1  
Мароновский пер., 26  
Тел.: 238-24-56, 238-23-33

Сдано в набор 19.05.95

Подписано в печать 27.06.95

Формат 70x100 1/16

Бумага типографская № 2

Офсетная печать

Усл. печ. л. 10,32

Усл. кр.-отт. 240,1 тыс.

Уч.-изд. л. 15,1

Тираж 8969 экз.

Заказ 610

Ордена Трудового Красного

Знамени

Чеховский полиграфический

комбинат

Комитета Российской Федерации

по печати

142300, г. Чехов

Московской области

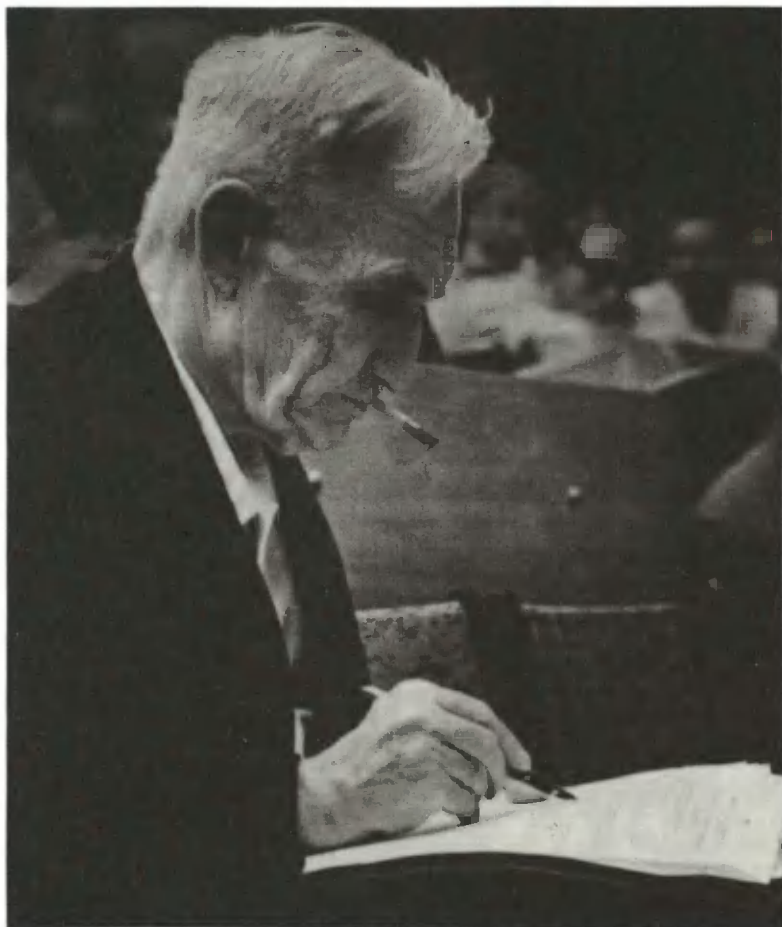
тел. (272) 71-336

факс (272) 62-536



# ПРИРОДА

# 7<sup>95</sup>



«Уже к концу 30-х годов имя Игоря Евгеньевича (даже у тех, кто не знал его лично) было окружено ореолом — не в сверхъестественном, а просто в человеческом смысле. В нем, наряду с Ландау, советские физики-теоретики видели своего заслуженного и признанного главу, и все мы — принципиального, доброго и умного человека, великого оптимиста, доброго и часто удачливого „пророка“». Эти слова принадлежат А. Д. Сахарову и взяты из его ранее не публиковавшейся статьи, которая открывает № 7 «Природы», целиком посвященный 100-летию со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма. Читателю предстоит встретиться с «новым» Таммом — знакомым и незнакомым, поскольку об отдельных этапах его биографии, таких как членство в РСДРП(м), утрата родных и близких в 1937-м, работа над термоядерной бомбой, — говорить было не принято. Но самое интересное — это дневники и письма, т. е. жизнь Тамма, описанная им самим.

Индекс 70707



Индекс 70707