

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

12 17



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

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

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



«Наука»

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

В НОМЕРЕ:**3 ОТ РОМАНТИКИ ДО ПРАКТИКИ**

60 лет в космосе

Ю.М. Батулин**Первые спутниковые научные исследования (4)**

4 октября 1957 г. началась космическая эра. Вслед за первым, простейшим спутником менее чем через месяц последовал запуск второго, в шесть раз более тяжелого и несшего на себе, помимо сложных физических приборов, первое живое существо в космосе — собаку Лайку. Так возможность проводить физические и медико-биологические исследования непосредственно в космическом пространстве была доказана на практике.

Ю.И. Логачев**Радиационные пояса Земли: открытие и первые исследования (12)**

Неожиданное открытие радиационных поясов Земли вызвало некоторую растерянность ученых, но интенсивные попытки понять природу нового явления увенчались успехом буквально через месяц. Кто внес основной вклад в разгадку тайны феномена и почему, к некоторому неудобству, открытию присвоили имя только одного участника эпопеи?

Л.М. Зеленый**Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий (22)**

Сегодня космические исследования стали мощным самостоятельным направлением науки, и юбилей дают повод вспомнить, что было сделано, и проанализировать новые задачи. В русле традиций международного сотрудничества такие обсуждения полезно проводить на встречах ученых, подобных Международному форуму, организованному 3–4 октября Российской академией наук и Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос».

М.В. Ковальчук, В.И. Ильгисонис, В.М. Кулыгин**Плазменные двигатели и будущее космонавтики (33)**

Перспективы развития космонавтики напрямую связаны с развитием ракетных двигательных установок. Новые разработки в области плазменных ракетных двигателей с учетом результатов многолетних исследований по термоядерному синтезу и физике плазмы позволяют рассчитывать на существенное увеличение тягово-энергетических характеристик таких двигателей по сравнению с традиционными электрореактивными.

45 Н.В. Астахова, Е.А. Лопатников**Марганцевые руды Японского моря (экономическая зона России)**

В железомарганцевых образованиях Японского моря содержание марганца в два-три раза выше, чем в их океанических аналогах. В отличие от последних, морские железомарганцевые корки залегают на значительно меньшей глубине, вблизи крупных городов, их добыча регламентируется только законами РФ, что позволяет рассматривать такие образования в качестве потенциального источника марганцевого сырья.

52 Д.Я. Фащук**Черноморский шпрот: донный траловый промысел и его последствия**

Шпрот — один из самых массовых промысловых видов рыб Черного моря. Для его добычи в течение многих лет применялись донные тралы. Как же отразились на состоянии морских экосистем десятки тысяч тралений, ежегодно выполнявшихся в районах промысла?

Вести из экспедиций**62 В.В. Бобров****Мангровые леса
К 30-летию Российско-Вьетнамского
Тропического центра****Научные сообщения****71 М.В. Вечерский, Т.А. Кузнецова,
А.А. Степаньков****Нитрогеназная активность
в бактериально-микотических
сообществах, ассоциированных
с еловыми лубоедами****Времена и люди****75 Р.Н. Щербаков****«В ту пору мы были всецело
поглещены новой областью...»
К 150-летию со дня рождения
М.Складовской-Кюри****87 Новые книги****88****Тематический и авторский
указатели за 2017 год**

CONTENTS:**3 FROM ROMANTIC TO PRACTICE**

60 Years in Outer Space

Yu.M.Baturin**Satellite First Scientific Researches (4)**

October 4, 1957 the Space Age began. Less than a month passed from the launch of the first simple sputnik and the second one, six times heavier, followed it. It carried out not only the complicated physical instruments, but also the first living creature in space, a dog Laika. That proved the possibility to conduct physical, medical, and biological experiments in the outer space.

Yu.I.Logachev**Earth's Radiation Belts:
Discovery and First Explorations (12)**

Unexpected discovery of the radiation belts around the Earth somehow confused the scientists, but their intensive attempts to understand the nature of the new phenomenon were succeeded practically in a month. Who were the main contributors to unveiling the mystery of the new phenomenon and why the discovery was named after just one of the participating scientists?

L.M.Zeleniy**Sputnik: 60 Years along the Path
of Discoveries (22)**

Today, space exploration has become a powerful independent branch of science, and anniversaries give an occasion to remember everything that has been done and to analyze new tasks. So, it is useful to hold different meetings and scientific discussions like the International Forum, organized on 3-4 October by the Russian Academy of Sciences and the State Space Corporation Roscosmos.

**M.V.Kovalchuk, V.I.Ilgisonis,
V.M.Kulygin****Plasma Thrusters and the Future
of Space Exploration (33)**

The prospects of space exploration are directly related to the development of rocket propulsion systems. New developments in the area of plasma thrusters given the results of the multiyear researches on thermonuclear fusion and plasma physics allow one to expect a substantial increase in the thrust force and power characteristics of such thrusters in comparison with traditional electric rocket engines.

45 N.V.Astakhova, E.A.Lopatnikov**Manganese Ores of the Sea of Japan
(the Russian Economic Zone)**

In ferromanganese formations of the Sea of Japan, the content of manganese is two to three times higher in comparison to their ocean analogues. In contrast to the latter, marine ferromanganese crusts lie at a much smaller depth, near large cities; their extraction is regulated only by the laws of the Russian Federation, which makes it possible to treat such formations as a potential source of manganese raw materials.

52 D.Ya.Fashchuk**Sprat of the Black Sea:
Bottom Trawl Fishery
and Its Consequences**

Sprat is one of the most abundant commercial fish species of the Black Sea. For its harvesting bottom trawls were used for many years. How did the state of marine ecosystems affect the tens of thousands of trawls carried out annually in the fishing areas?

Notes from Expeditions**62 V.V.Bobrov****Mangroves**

To 30th Anniversary
of the Russian-Vietnamese Tropical Center

Scientific Communications**71 M.V.Vecherskii, T.A.Kuznetsova,
A.A.Stepan'kov****Nitrogen-Fixing Activity
of Fungal-Bacterial Complexes
Associated with Bark Beetles****Times and People****75 R.N.Shcherbakov****"At that Time We Have Been Entirely
Absorbed by New Field
of Knowledge..."**

To the 150 anniversary since the birth
of M.Sklodowska-Curie

87**New Books****88****Subject and Author Index for 2017**

ОТ РОМАНТИКИ ДО ПРАКТИКИ

60 лет в космосе

При всей противоположности взглядов на советское наследие, вновь оказавшееся в фокусе дискуссий в год столетия Октябрьской революции, по одному вопросу расхождений нет — успех наших космических первопроходцев общепризнан предметом законной гордости страны. Прорыв в космос заставил миллионы людей на всей Земле по-иному взглянуть на небо, почувствовать мирную силу науки, увидеть реальную почву для мечтаний о дальних мирах и встречах с инопланетным разумом. На фоне романтических устремлений не обходилось и без скептиков, задающих сакраментальный вопрос об оправданности связанных с освоением космического пространства затрат на отвлеченные, как тогда казалось, идеи. И на него в очередной раз получен ясный ответ: при изучении фундаментальных научных проблем в итоге решаются такие практические задачи, о которых раньше даже не догадывались. Плоды современной космической индустрии — спутниковая связь, трансляция, навигация и др. — прочно укоренились в нашей обыденной жизни; стало рутинным и регулярное дистанционное зондирование наземных, океанических и воздушных систем планеты в самых различных целях. Взгляд ученых обращен уже далеко за пределы околоземных орбит. К сожалению, сейчас нельзя утверждать, что Россия играет первую скрипку в космосе — это неудивительно, поскольку траты на космические программы США (где полет на Марс объявлен национальным приоритетом) более чем на порядок превышают наши; обгоняет нас в несколько раз по этому показателю не только Евросоюз, но и Китай. Каждый из серьезных космических игроков, к которым присоединилась и Индия, имеет свои амбициозные планы, но будущее, бе-

зусловно, за объединенными усилиями всего человечества. И пока сохраняется отечественная школа космических исследований, мы можем претендовать на заметную роль в общем деле. За становлением этой отрасли знаний можно проследить по публикациям в «Природе». Заметка о запуске первого спутника появилась уже в ноябрьском номере 1957 г., а в дальнейшем на страницах журнала о новых успехах регулярно рассказывали как космонавты (среди них Г.С.Титов, А.Г.Николаев, П.Р.Попович, К.П.Феоктистов), так и ведущие ученые (М.В.Келдыш, Б.В.Раушенбах, Д.В.Скобельцын, В.Л.Гинзбург, И.С.Шкловский, Р.З.Сагдеев — и это далеко не полный список). К юбилейным датам редакция готовила целый номер журнала (а иногда и не один), посвященный космической науке, или хотя бы подборки материалов. Подобную подборку, позволяющую вспомнить какие-то моменты пройденного пути и подискутировать о будущем, мы предлагаем вашему вниманию и сейчас.

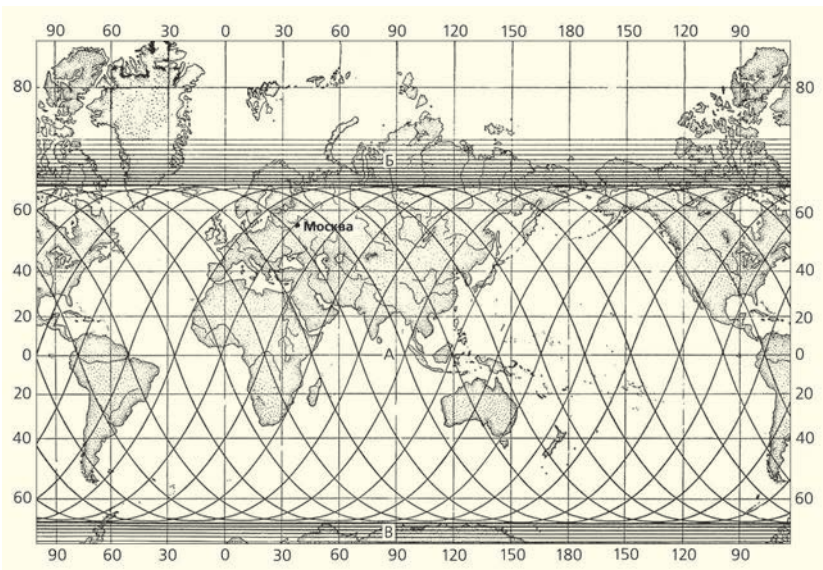


Иллюстрация из первого в журнале информационного сообщения «Советский искусственный спутник Земли» (Природа. 1957. №11) показывает схематическую карту движения аппарата и зоны (А, Б, В), из которых было возможно визуальное наблюдение за ним (зона радионаблюдений охватывала весь земной шар).

Первые спутниковые научные исследования

Ю.М.Батурин

Институт истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН (Москва, Россия)

4 октября 1957 года — день, который всегда будут помнить в течение всей истории человечества. С этого дня началась космическая эра. Это событие позволило создать новую науку — космические исследования. После простой возможности детектировать радиосигналы в ионосфере с помощью примитивного оборудования Первого спутника следующим шагом был запуск менее, чем через месяц, второго спутника, в шесть раз тяжелее первого и несшего на себе, помимо сложных физических приборов, первое живое существо в космосе — собаку Лайку. Главной задачей запуска первых спутников было практическое доказательство возможности проводить физические и медико-биологические исследования непосредственно в космическом пространстве.

Ключевые слова: простейший спутник, «Explorer», космические исследования, космос.

Четвертого октября 1957 г. в 22 ч 28 мин по московскому времени запуском первого искусственного спутника Земли началась космическая эра человечества. О первом спутнике много писали, подчеркивая его военно-политическое значение. Научной функции этого полета уделялось значительно меньше внимания. Действительно, о какой науке на спутнике стоит говорить, если аппарат нес только примитивный радиопередатчик, транслирующий сигнал «бип-бип-бип»?



Юрий Михайлович Батурин, член-корреспондент РАН, доктор юридических наук, главный научный сотрудник Института истории естествознания и техники имени С.И.Вавилова РАН, профессор Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, летчик-космонавт России, Герой России, лауреат Премии правительства РФ (2009). Область научных интересов — история космонавтики, постановка научных экспериментов на борту пилотируемых космических аппаратов, международное космическое право.

Простейший спутник был не так прост

На самом деле два радиопередатчика не просто излучали сигналы длительностью 0.4 с (в сообщении ТАСС называлась иная длительность — 0.3 с) попеременно на волнах 7.5 и 15 м. Длительность сигналов изменялась при повышении (более 50°C) или понижении (менее 0°C) температуры и при падении давления ниже 0.35 кгс/см² благодаря срабатыванию сдвоенного термореле и контрольных термо- и барореле. Таким образом на Земле получали грубые данные о состоянии атмосферы в гермообъеме [1]. Состав аппаратуры спутника реле не ограничивался: туда входили еще антенно-фидерное устройство, блок электропитания из трех батарей на основе серебряно-цинковых элементов, дистанционный переключатель и вентилятор простейшей

системы терморегулирования, а также система связи спутника с ракетой-носителем.

Простейший спутник представлял собой контейнер сферической формы диаметром 58 см. Его корпус состоял из двух полуболочек со стыковочными шпангоутами, соединенных между собой 36 болтами. Герметичность стыка обеспечивалась резиновой прокладкой. После сборки контейнер заполнялся осушенным азотом до давления 1.3 кгс/см². В верхней полуболочке располагались две уголкового антенны. Антенна на волну 7.5 м имела штыри длиной 2.4 м, антенна на волну 15 м — 2.9-метровые штыри, а также пружинный механизм, разводящий и те, и другие штыри на угол 35° от продольной оси контейнера. Снаружи верхняя полуболочка была покрыта защитным экраном, а на ее внутренней поверхности находился кронштейн для крепления радиопередатчика. Материал сферы — алюминий-магниево-цинковый сплав АМГБТ толщиной 2 мм. Вес спутника составлял 83 кг.

Целями запуска Первого спутника были:

- изучение прохождения через ионосферу радиоволн, излучаемых передатчиками спутника;
- экспериментальное определение плотности верхних слоев атмосферы по торможению спутника;
- проверка расчетов и основных технических решений, принятых для запуска аппарата в космос;
- исследование теплового режима и других условий работы аппаратуры.

И эти первые для искусственных космических объектов научные задачи были успешно решены.

Как принимались решения

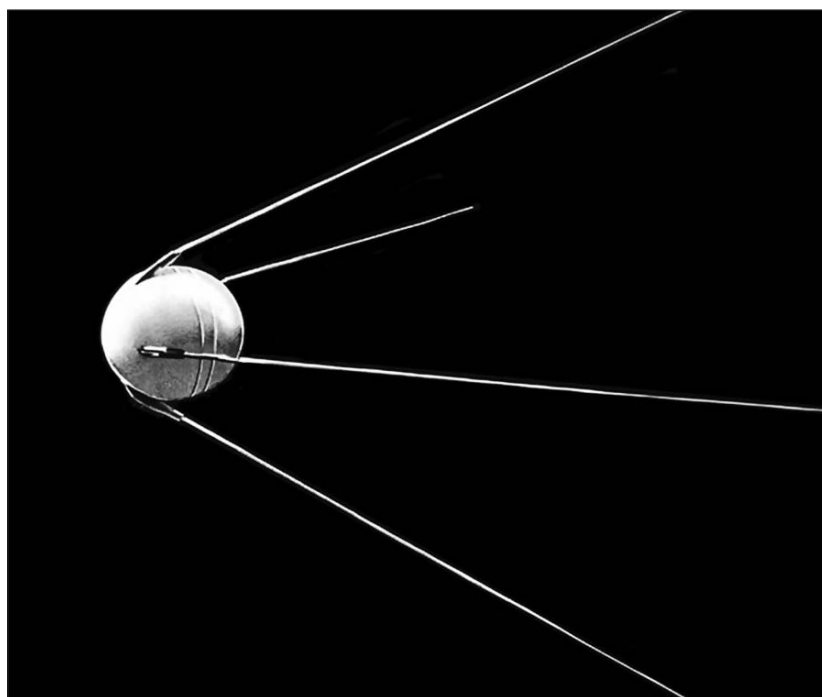
История спутника началась сразу после войны. В мае 1945 г. оказавшийся в США В.фон Браун подготовил доклад для американской армии о возможности создания искусственного спутника Земли (ИСЗ). На уровень государственного руководства проблема вышла в 1952 г.: для президента Г.Трумэна была составлена специальная записка «О проблеме искусственного спутника Земли», причем президент подробно обсуждал ее со своим личным научным консультантом — физиком, бригадным генералом У.Грэмом. Трумэн затребовал более подробную информацию, такой материал был подготовлен, но доложен был уже президенту Эйзенхауэру 24 сентября 1953 г. В сентябре 1954 г. были сформулированы предложения фон Брауна по малому спутнику. Впоследствии военные остановились на этом проекте в качестве кандидата в программу Международного геофизического года, но от него потом отказались в пользу проекта «Vanguard».

В СССР М.К.Тихонравов, на основе идеи «ракетного пакета» еще в 1948 г. пришел к выводу: достигнутая технологическая база дает техническую возможность вывести на орбиту искусственный спутник Земли. В марте 1950 г. он сделал на научной конференции публичный доклад, в котором затронул перспективу создания ИСЗ вплоть до полета на нем человека. Создать искусственный спутник С.П.Королев предложил 16 марта 1954 г. на совещании у академика М.В.Келдыша. Тот, в свою очередь, получил одобрение этого предложения у президента Академии наук СССР А.Н.Несмеянова. 27 мая 1954 г. Королев обратился к министру вооружения Д.Ф.Устинову с докладной запиской «Об искусст-

венном спутнике Земли», подготовленной Тихонравовым. В августе 1954 г. Совет Министров СССР утвердил предложения по проработке научно-теоретических вопросов, связанных с космическим полетом.

Осенью 1950 г. на Первом международном астрономическом конгрессе в Париже была создана Международная федерация астрономии, одной из первых инициатив которой стало проведение с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г. Международного геофизического года (МГГ) — совместной программы ученых 67 стран. Президент Эйзенхауэр принял решение о запуске научного спутника в качестве части американского вклада в программу МГГ, чтобы помочь картографированию Земли — проекту, который еще в октябре 1954 г. принял Международный совет научных союзов. США предложили ряд геофизических исследований и заявили о возможности запуска своего спутника к началу 1958 г.

В начале августа 1955 г. М.В.Хруничев, В.М.Рябиков и С.П.Королев направляют первому секретарю ЦК КПСС Н.С.Хрущеву и председателю Совета Министров СССР Н.А.Булганину записку в связи с заявлением американцев о планах запуска спутника. И уже 8 августа 1955 г. на заседании Президиума ЦК КПСС было принято постановление «О создании искусственного спутника Земли» [2, с.66]. Полгода спустя вышло Постановление ЦК КПСС «Об участии Академии наук СССР в международных конференциях по проведению Международного геофизического года», в котором Академии разрешалось делать сообщения



Первый спутник.

«в общем виде о научных исследованиях на искусственном спутнике Земли» [2, с.71].

В начале 1956 г. Совет Министров СССР вынес решение «О создании объекта “Д” — большого научного спутника, который предполагалась запустить в 1957–1958 гг. [3, с.31]. Спутник должен был нести аппаратуру для геофизических измерений и весить 1200 кг. Головной организацией было определено ОКБ-1 Королева (ныне Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королева). Поскольку оказалось, что работы по объекту «Д» идут с отставанием от графика (об этом Президиум Академии наук СССР вынес 14 сентября 1956 г. специальное постановление [3, с.52–54]), Президиум ЦК КПСС принял предложение ОКБ-1 и Академии наук «о проведении двух пробных пусков упрощенных искусственных спутников Земли» [3, с.56]. Первый из них получил индекс «ПС» (Простейший спутник). Его планировали отправить в полет даже до начала Международного геофизического года, но реально это можно было сделать лишь после успешных испытаний ракеты Р-7, что произошло только 21 августа 1957 г.

«Баскетбольная» спутниковая программа

Совет национальной безопасности (СНБ) США первоначально согласовал выделение 20 млн долл. на спутниковую программу «Vanguard», которую предполагалось осуществить в рамках МГГ. Но стоимость программы быстро начала расти и к апрелю 1957 г. достигла 100 млн долл. При этом предполагалось, что по меньшей мере один из шести спутников будет успешно выведен на орбиту. (В 1955 г., т.е. до денежной реформы 1961 г., изготовление первого научного спутника весом 1.5–2 т без учета стоимости ракеты оценивалась в СССР в 250 млн руб. [3, с.24]). Президент Эйзенхауэр пребывал в нерешительности относительно программы в МГГ (и вообще участия в нем). Министр обороны США Ч.Уилсон также не был впечатлен проектом. «“Чертов апельсин”, выбрасываемый на ветер», — отзывался он о научном спутнике в своем ближнем кругу. «У этих спутников, какими бы достоинствами они ни обладали, слишком много лоббистов и слишком мало банкиров», — сказал он президенту [4, р.224–225]. 3 мая 1957 г. президент получил соответствующий меморандум с подробным изложением ситуации, заставивший его вынести вопрос о научной спутниковой программе на обсуждение СНБ, которое состоялось через неделю.

Примечателен диалог Эйзенхауэра и помощника министра обороны по науке У.Холадея. Выслушав мнения участников, президент заметил, что изготовление спутника будет легче и дешевле, если не ставить на него такое большое количество научной аппаратуры, как планировалось. (Обратим внимание на схожую логику — президента

США, с одной стороны, и Академии наук СССР и ОКБ-1, с другой. Но в СССР это поняли на год раньше американцев). Холадей уточнил, что диаметр проектируемого спутника уже пришлось уменьшить с 30 дюймов (76.2 см) до 20 (50.8 см), и при этом научная аппаратура становится «если не золотой, то уж точно хромированной». Президент возразил, что, несмотря на уменьшение диаметра спутника до 20 дюймов, он все еще остается «размером больше баскетбольного мяча», о котором шла речь на заседании СНБ, когда вопрос о спутнике ставился первый раз [4, р.324–325].

Подводя итог, президент подчеркнул, что уже не остается возможности выйти из начатой спутниковой программы и он не видит иного выхода, как обратиться в соответствующие комитеты Конгресса и попросить выделить дополнительные средства.

Фон Браун и Ван Аллен

В.фон Браун со своей командой, состоящей преимущественно из немецких ракетчиков, прибывших после окончания Второй мировой войны в США, работал в Хантсвилле (штат Алабама), в военном агентстве, занимающемся разработкой баллистических ракет (Редстоунский арсенал). Заместитель фон Брауна по научным вопросам (директор отдела исследовательских проектов), тоже немец, Э.Штулингер (воевал на восточном фронте, ранен под Москвой, в 1943 г. переведен в Пенемюнде под началом фон Брауна), хотя и был физиком по образованию, аспирантуру заканчивал по кафедре биологии и особенно интересовался будущими биологическими исследованиями на спутниках, которые предлагал фон Браун. Он даже написал посвященную шефу поэму о слабой маленькой клетке морского ежа, которая, летая в невесомости, подверглась воздействию космических лучей и начала делиться, открывая постепенно человеку путь к его дерзкой мечте — жить в космосе, «возможно, через десять или одиннадцать лет» [5, р.268–269].

В 1956 г. Штулингер побывал по приглашению Дж.Ван Аллена на физическом факультете Университета штата Айова. Он рассказал об исследованиях Ван Аллена, которые тот планирует проводить на спутниках, когда они появятся, фон Брауну. В частности, Ван Аллен собрал и обобщил большое количество данных по интенсивности космического излучения в зависимости от высоты, полученных в экспериментах на высотных ракетах. Фон Браун был впечатлен и через Штулингера пригласил Ван Аллена приехать с визитом в Хантсвилл. 13 февраля 1957 г. Ван Аллен ответил Штулингеру подробным письмом, в котором высказал большую заинтересованность в участии Университета штата Айова в программе фон Брауна и перечислил эксперименты, которые хотел бы поставить на борту спутника. Среди них:

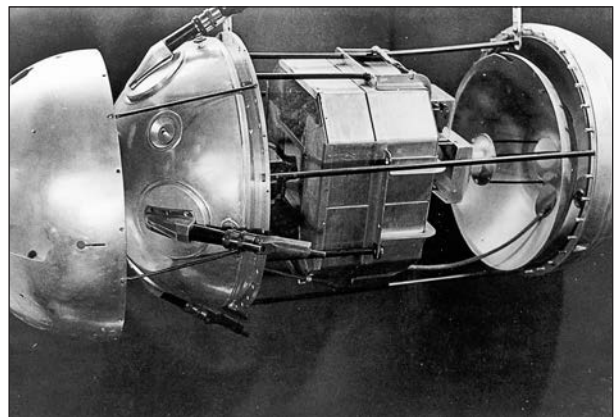
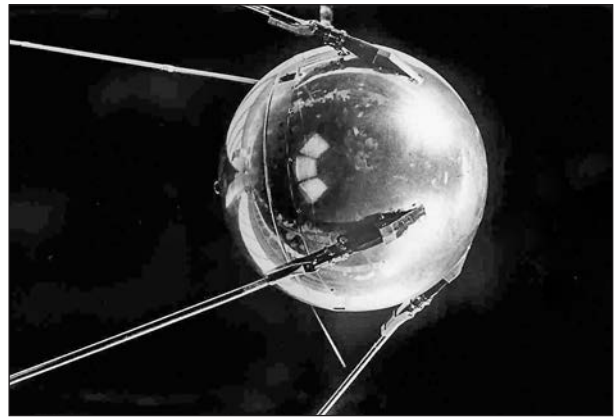
- изучение космических лучей;
- вариации во времени коротковолнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца;
- соударения с микрометеоритами и микрометеоритная эрозия;
- изучение плотности атмосферы на больших высотах;
- излучения в энергетическом балансе Земли;
- облачный покров и слежение за погодой;
- ионосферные измерения с использованием двух бортовых передатчиков, работающих на разных частотах [6, с.69].

Последний пункт был в точности выполнен на первом ИСЗ. Остальные в значительной части пересекались с советской научной спутниковой программой.

Ван Аллен угадал правильно. Хотя фон Брауну долго не давали заказ на запуск первого американского спутника после взрыва на стартовой позиции ракеты-носителя со спутником «Vanguard» 6 декабря 1957 г. (поразительно, но сам спутник уцелел и даже подавал сигналы из кустов, куда был отброшен; теперь он выставлен в Национальном музее авиации и космонавтики Смитсоновского института в Вашингтоне, округ Колумбия), было принято решение о запуске объекта RTV-7, который готовил фон Браун. Название «Explorer» появилось уже после запуска. «Explorer-1» массой 8,3 кг (научная аппаратура 4,5 кг) был запущен 31 января 1958 г. (на советской территории уже наступило 1 февраля). Научной аппаратурой спутника занимался Ван Аллен. На «Explorer-1» был размещен счетчик Гейгера, датчик попадания микрометеоритов и ультразвуковой микрофон, регистрировавший соударения. Всего были успешно запущены 14 аппаратов «Explorer», восемь запусков окончились неудачей.

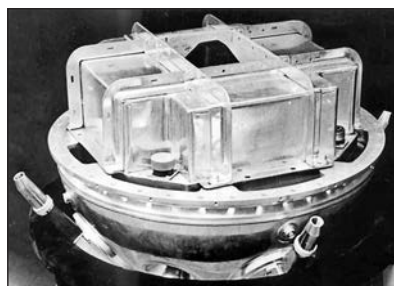
Космическая эра наступила на два дня раньше

17 сентября 1957 г., в день столетия со дня рождения К.Э.Циолковского, который американская разведка назвала вероятным днем запуска спутника, Королев, выступая с докладом, посвященным

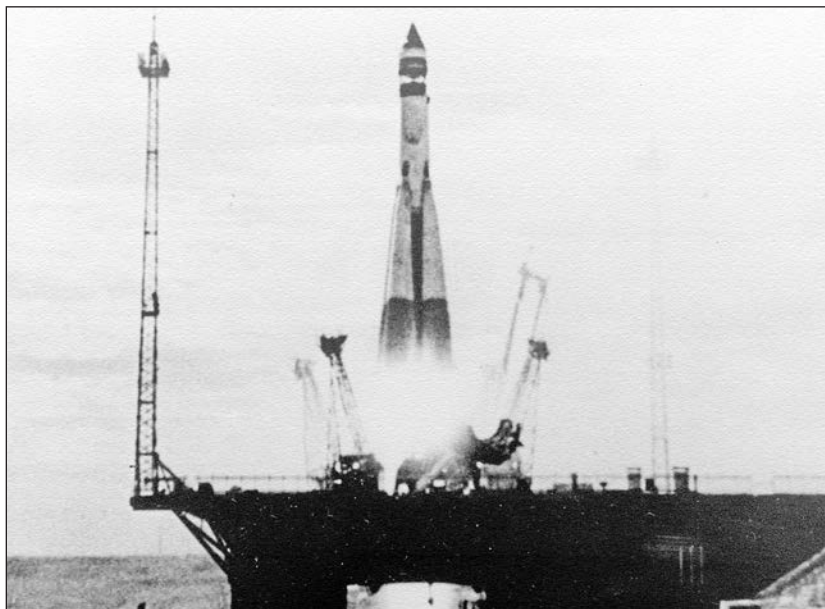


Простейший спутник — вид снаружи и внутри.

ученому, в Колонном зале Дома союзов, произнес одну знаменательную фразу: «В ближайшее время с научными целями в СССР и США будут произведены первые пробные пуски искусственных спутников Земли». И действительно, 26 сентября 1957 г. Президиум ЦК КПСС, а затем в тот же день и Совет Министров СССР принимают текстуально совпадающие (за исключением одного слова) постановления с одинаковым названием «О запуске искусственного спутника Земли» [3, с.59–60]. В постановлении определялось: «Запуск спутника произвести в середине октября с.г.» Вскоре, как тогда говорили, «инстанции» утвердили и точную дату — 6 октября.



Узлы простейшего спутника: радиопередатчик, блок источников питания, вентилятор системы терморегулирования и коммутационный блок.



Старт ракеты-носителя с первым искусственным спутником.

Но случилось так, что Королев без всякого согласования с политическим руководством в Москве, своей властью прямо на Байконуре сдвинул сроки пуска. Причиной тому был листок экспресс-информации в сборнике новостей науки и техники, в котором говорилось, что на совещании по координации запусков ракет и спутников, которое происходило в Вашингтоне по линии МГГ, на 6 октября намечен американский доклад «Спутник над планетой». Королев позвонил в КГБ. Ему сказали, что никаких сведений о том, что американцы запустят на днях спутник, советская разведка не имеет. Королев знал, что Дж.Хаген, руководитель проекта «Vanguard», заявил как-то неопределенно: «Быть может, мы предпримем испытания до исхода этого года...» И несмотря на то, что работы шли по очень напряженному графику, Королев принимает решение: сдвинуть старт на два дня. Пуск ракеты-носителя «Спутник» (это был пятый пуск ракеты Р-7) с первым ИСЗ состоялся 4 октября 1957 г.

При старте ракеты было отмечено запаздывание выхода на тягу основного двигателя бокового блока «Г». Тем из наблюдавших пуск, кто повидал уже старты ракет, даже показалась, что ракета вот-вот взорвется. Однако на последней секунде временного контроля блок вышел на режим. На 16-й секунде полета отказала система опорожнения баков, следствием чего был повышенный расход керосина. Из-за этого двигатель выключился на секунду раньше. Как результат, спутник оказался на орбите на 90 км ниже расчетной.

Через 295 с после старта спутник вышел на орбиту с перигеем 228 и апогеем 947 км и временем одного оборота вокруг Земли 96 мин 10 с.

В тот же день мир узнал, что Советский Союз запустил первый искусственный спутник Земли,

начав отсчет космической эры. Полет первого спутника получил невероятный мировой резонанс. Практически вся мировая пресса говорила об этом событии. Буквально за один день международный статус СССР неизменно вырос. Русское слово «спутник» сразу вошло в языки всех народов мира.

Первые 24 ч после сообщения о советском спутнике обстановка в Белом доме была совершенно спокойной, пока не стала известна общественная реакция на это событие. Тогда вспомнили, что Эйзенхауэра много раз предупреждали о пропагандистском значении запуска спутника, но он каждый раз отмахивался.

Одним из следствий запуска Советским Союзом первого спутника было то, что в Соединенных Штатах всерьез задумались

о привлечении ученых к формированию государственной политики на высшем уровне. Глава государства учредил должность специального помощника президента по вопросам науки и техники и перевел консультативный комитет по науке в непосредственное подчинение Белому дому. В 1958 г. было образовано Национальное агентство по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) [7].

Без чертежей

Уже 10 октября по личной просьбе Хрущева осуществить следующий запуск к 40-летию Октябрьской революции в ОКБ-1 приступили к изготовлению второго спутника. Создавали его так, как совершенно недопустимо в ракетно-космической отрасли, но к счастью, это произошло в первый и последний раз. Рабочих чертежей практически не было, за исключением трех сборок, без которых было не обойтись. Конструкторы и инженеры КБ непрерывно находились в цехе, объясняя рабочим, что надо делать, и контролируя их. Нечто похожее показали киношники в недавнем художественном фильме «Время первых», совершенно неправдоподобно расположив инженеров с кульманами в цехе, где собирался космический корабль «Восход-2». Макетирование проводилось одновременно с изготовлением летного образца спутника. Все делалось с лета: идеи, минуя стадию документирования, превращения в чертежи и схемы, обсуждения и утверждения, сразу воплощались в «железе». М.В.Келдыш однажды в субботу вечером, сам сидя за рулем, повез ученых и инженеров в КБ, потому что срочно надо было решить вопрос об изменении разме-



Первый космонавт — собака Лайка.

щения приборов, освободив пространство для Лайки, чтобы она могла выгнуть спину.

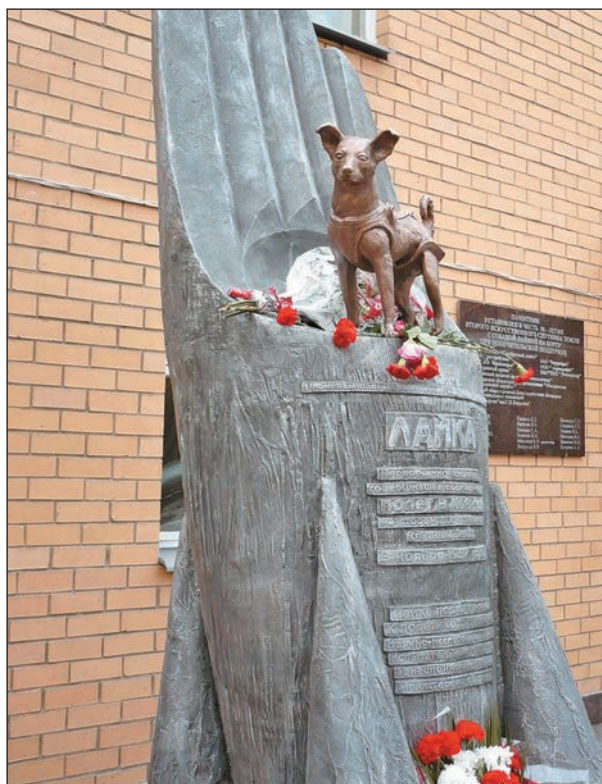
Второй спутник массой 508 кг был запущен 3 ноября 1957 г. На нем, помимо научной аппаратуры, предназначенной для изучения ультрафиолетового излучения Солнца и космических лучей, впервые выполняло полет высокоорганизованное живое существо — собака Лайка. От эксперимента с Лайкой зависел ответ на вопрос: сможет ли человек полететь в космос? И человек отправился в космос в 1961 г., а не «через десять-одиннадцать лет», как мечтал Штулингер.

Подготовка к этому полету продолжалась около года. Собак приучали к ношению ассенизационной одежды, к новой пище и способу ее принятия, постепенно уменьшали размеры клеток, приближая их к объему кабины спутника (диаметр 64 и длина 80 см). Собак вращали на центрифуге, тренировали на вибростенде, испытывали в барокамере. Наконец, отобрали трех — Альбину, Лайку и Муху. После долгих обсуждений было решено отправить в полет Лайку — двухлетнюю светлую самку массой 6 кг [8]. Светлая масть Лайки способствовала более четкому различению деталей ее поведения на фотографиях и кадрах киноплёнки во время ее подготовки к полету.

Возвращать запущенные объекты из космоса еще никто не умел. Лайку отправили на верную гибель, но научные результаты стоили этой жертвы. Имя Лайки указано на памятной доске с именами погибших космонавтов, установленной в Звездном городке. Люди поставили памятник Лайке в Москве, а также памятники другим верным друзьям человека, которые помогли им выйти в космос: Звездочке в Ижевске, Белке и Стрелке в Челябинске, Чернушке в Татарстане, Лайке, Белке и Стрелке в Греции, на Крите. Существует также общий памятник собаке-космонавту в парке Кекенхоф (Лисс, Голландия). В их честь выпускались почтовые марки в разных странах, создавались песни и фильмы.



Аналог аппарата «Спутник-2».



Памятник легендарной Лайке, установленный в 2008 г. в Москве, на территории Института военной медицины (скульптор — Павел Медведев).

Научные результаты

На первом и втором спутниках получены интереснейшие данные.

Было изучено поведение и состояние подопытного животного на наиболее трудном с биологической точки зрения этапе полета — при выведении спутника на орбиту и далее в условиях невесомости. Сразу после старта частота сердечных сокращений у Лайки возросла в три раза. В дальнейшем, когда перегрузки не только продолжались, но и нарастали, частота сердцебиений уменьшилась. Анализ кардиограммы не показал каких-либо болезненных признаков. Отмечалась типичная картина учащения сердцебиений, так называемая синусовая тахикардия. По завершению эксперимента медики пришли к выводу, что Лайка переносила условия космического полета удовлетворительно.

Исследование ионосферы при пусках первого и второго спутников дали ученым новые данные распределения электронов и ионов в верхних слоях земной атмосферы и позволило определить порядок величины концентрации электронов на больших высотах (Институт радиотехники и электроники АН СССР, Научно-исследовательский институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Министерства связи СССР и НИИ-4 Министерства обороны). Анализ этих данных позволил прийти к выводам о плотности нейтральных частиц на больших высотах и о плотности межпланетного газа. Получены данные о прохождении радиоволн в ионосфере на разных высотах и их затухании.

В результате работ (Научно-исследовательский институт ядерной физики Министерства высшего образования СССР) по изучению вариаций первичного космического излучения были получены новые экспериментальные данные по космическим лучам на больших высотах вплоть до 700 км (без спутников зависимость интенсивности космических лучей от высоты была известна до 200 км). Полученные данные позволили также уточнить структуру магнитного экватора.

Астрономический совет Академии наук СССР вел наблюдения за спутниками, определял параметры орбиты и прогнозировал дальнейшее движение спутников. Были получены их первые фотографии. По изменению блеска даны оценки вращения ракеты-носителя и второго спутника при орбитальном полете.

Проведены измерения температуры в элементах конструкции спутников (ОКБ-1 Госкомитета по оборонной технике, НИИ-1 Госкомитета по авиационной технике и НИИ-4 Министерства обороны). Полученный экспериментальный материал позволил разработать методы расчета температур в конструкции космических аппаратов.

На основании радиопеленгаторных измерений и оптических наблюдений проводилось вычисление параметров орбиты спутников и их из-

менений во времени (Отделение прикладной математики АН СССР, ныне Институт прикладной математики имени М.В.Келдыша РАН; НИИ-4 Министерства обороны). Элементы орбиты определялись с точностью значительно выше ожидавшейся. По торможению спутника впервые с высокой точностью были получены опытные данные по плотности атмосферы на высотах 200–250 км. Впервые были осуществлены радиоизмерения доплеровского эффекта при продолжительном космическом полете.

Лишь один эксперимент оказался неудачным: в ходе исследования коротковолнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца не удалось получить четкой регистрации излучений [9].

Первый спутник находился на орбите до 4 января 1958 г., совершив 1440 оборотов. Второй спутник совершил 2570 оборотов вокруг Земли и прекратил существование 14 апреля 1958 г. Между этими двумя датами 31 января и 26 марта 1958 г. и американцы запустили свои первые два спутника «Explorer-1 и -3» («Explorer-2» не вышел на орбиту), опередившие программу «Vanguard» с ее неудачами. 17 марта 1958 г. наконец был запущен и спутник «Vanguard-1» (диаметр 16,3 см, масса 1,5 кг).



В память о начале космической эры на площадке 1 космодрома Байконур установлена стела по проекту испытателей космодрома Е.Н.Корнилова и В.В.Евтеева с надписью: «Здесь гением советского человека начался дерзновенный штурм космоса (1957 г.)».

Несколько пренебрежительное сравнение с «апельсином», которое любили использовать в Советском Союзе (вспомним ставшее крылатым выражение Чарльза Уилсона), относится именно к «Vanguard-1», а вовсе не к подготовленному под руководством фон Брауна «Explorer», первому американскому спутнику, кстати, имевшему форму прямой трубки (точнее, «карандаша») длиной около 2 м и диаметром 15 см, а не сферы.

Эксперименты, проведенные на «Explorer-1 и -3» подтвердили гипотезу Ван Аллена. Оба они обнаружили существование внутреннего радиационного пояса, в котором плотность заряженных частиц увеличивалась с высотой. Второй советский спутник также был оборудован счетчиком Гейгера и фактически обеспечил первое наблюдение внутреннего радиационного пояса, но, как мы знаем, советским ученым было разрешено рассказывать о научных результатах спутниковых

исследований только «в самом общем виде». В мае 1958 г. на научной сессии Ван Аллен объявил об открытии радиационного пояса, который с тех пор и носит его имя. Внешний радиационный пояс был обнаружен годом позже на значительно больших высотах.

15 мая 1958 г. СССР запустил «Спутник-3» (объект «Д») с богатым комплектом научно-исследовательской аппаратуры. Он успешно работал до 6 апреля 1960 г., т.е. в течение 692 сут, более чем в два раза превысив расчетное время. Среди прочего он подтвердил и, благодаря более совершенному научному оборудованию, уточнил структуру радиационного пояса.

Такова увлекательная и драматическая история начала спутниковых научных исследований, которые потом стали проводить и с помощью межпланетных станций, и на пилотируемых космических объектах. ■

Литература / Reference

1. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева. Б.м., 1996: 88–90. [S.P.Korolev Rocket and Space Corporation «Energia». 1996: 88–90. (In Russ.)]
2. Советская космическая инициатива в государственных документах. 1946–1964 гг. Под ред. Ю.М.Батурина. М., 2008. [Soviet Space Initiative in State Papers. 1946–1964. Yu.M.Baturin (ed). Moscow, 2008. (In Russ.)]
3. Вестник Архива Президента Российской Федерации. Советский космос. Специальное издание к 50-летию полета Юрия Гагарина. М., 2011. [Bulletin of Archive of the President of the Russian Federation: Soviet cosmos. A Special Issue Devoted to the 50th Anniversary of the flight of Yuri Gagarin. M., 2011. (In Russ.)]
4. Exploring the Unknown. Selected documents in the History of the U.S. Civil Space Program. V.I: Organizing for Exploration. J.M.Logsdon, L.J.Lear, J.Warren-Findley, R.A.Williamson, D.A.Day (eds). Washington D.C., 1995.
5. Exploring the Unknown. Selected documents in the History of the U.S. Civil Space Program. V.VI: Space and Earth Science. J. M.Logsdon, S.J.Garber, R.D.Launius, R.A.Williamson (eds). Washington D.C., 2004.
6. Exploring the Unknown. Selected documents in the History of the U.S. Civil Space Program. V.V: Exploring the Cosmos. J. M.Logsdon, A.P.Snyder, R.D.Launius, S.J.Garber, R.A.Newport (eds). Washington D.C., 2001.
7. Батурин Ю.М. Космическая дипломатия. Звездный городок, 2006. С.15–23, 33–38. [Baturin Yu.M. Space Diplomacy. Star City, 2006: 15–23, 33–38. (In Russ.)]
8. Башилова Е.Ю. «Так что решили — будем запускать...». Космос. Время московское: Сборник документов. М., 2011: 223–226. [Bashilova E.Yu. «So we have taken a decision to launch...». Space. Moscow time. Set of documents. Moscow, 2011: 223–226. (In Russ.)]
9. Записка А.Несмеянова, М.Келдыша, С.Королева и других от 1 марта 1958 г. в ЦК КПСС. Вестник Архива Президента Российской Федерации: Советский космос. М., 2011: 80–82. [The note by A.Nesmeyanov, M.Keldysh, S.Korolev et al. of March 1st, 1958, to KPSS CK. Bulletin of Archive of the President of the Russian Federation: Soviet cosmos. Moscow, 2011: 80–82. (In Russ.)]

Satellite First Scientific Researches

Yu.M.Baturin

S.I.Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS (Moscow, Russia)

October 4, 1957 is the date that will live in fame for all the human history. This was the day on which the Space Age began. This event enabled to create a new science — space research. After the simple possibility to detect radiosignals at the ionosphere with the Sputnik-1 facilities, the next step was the launch of Sputnik-2 less than a month later. It was six times heavier than the Simplest sputnik and carried complicated physical instruments and moreover, the first living creature in space — dog Laika. The first satellites were mainly designed to prove possibility of conducting physical, medical, and biological researches directly in the outer space.

Keywords: the simplest sputnik, "Explorer", space research, outer space.

Радиационные пояса Земли: открытие и первые исследования

Ю.И.Логачев

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Неожиданное открытие радиационных поясов Земли, кроме некоторой растерянности ученых, вызвало шквал объясняющих гипотез и анализ уже существовавших представлений о движении заряженных частиц в магнитных полях. Возникли попытки связать новое явление с давно известными полярными сияниями, магнитными бурями и солнечными частицами. Такой натиск не мог не привести к нахождению истины (захваченные магнитным полем Земли частицы действительно связаны с перечисленными явлениями), и буквально через месяц природа нового явления прояснилась. Кто внес основной вклад в разгадку тайны феномена и почему, к некоторому неудобству, открытию присвоили имя только одного участника эпопеи?

Ключевые слова: «Спутник-1», «Спутник-2», внешний и внутренний радиационные пояса Земли.

Нет сомнения, что созданные в войну 1939–1945 гг. ракеты рано или поздно полетели бы в космос. Начало этому положил «Спутник-1», запущенный в СССР 60 лет назад. Через месяц вывели на орбиту «Спутник-2», потом в дело вступили США («Explorer-1 и -3», а также «Vanguard-1»), затем были «Спутник-3», «Explorer-4», а впоследствии и многие другие. К настоящему времени в космосе побывало более 10 тыс. различных аппаратов — научных, военных и прикладных.

Про первый спутник написано немало, но гораздо менее известны следующие пять, результаты которых принесли важное открытие: были обнаружены радиационные пояса Земли. Неожиданно оказалось, что за пределами своей атмосферы Земля, находящаяся, как ожидалось, в совершенно пустом космическом пространстве, окружена интенсивными потоками заряженных частиц, которые захвачены магнитным полем планеты. Эти пояса радиации имеют сложную пространственную структуру и испытывают сильные вариации, связанные с активностью Солнца. К настоящему времени радиационные пояса хорошо изучены, понята физика явления, найдены источники частиц (это космические лучи; частицы, ускоренные во время вспышек на Солнце; частицы из ионосферы и атмосферы Земли), определена их важность и связанные с ними опасности для человечества. Пояса радиации исследовались многими различными аппаратами, в том числе и для реше-



Юрий Иванович Логачев, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Участник исследований радиации в космосе начиная с первых полетов искусственных спутников Земли, соавтор открытия внешнего радиационного пояса Земли.

ния прикладных задач, без которых мы уже не можем обойтись. Достаточно перечислить телерадиотрансляторы на геостационарной орбите, навигационные системы (GPS и Глонасс), метеоспутники, аппараты для поисков полезных ископаемых из космоса. Важная задача — обеспечение радиационной безопасности космических полетов, в частности при планировании освоения Луны и полетов человека на Марс.

Календарь первых космических событий

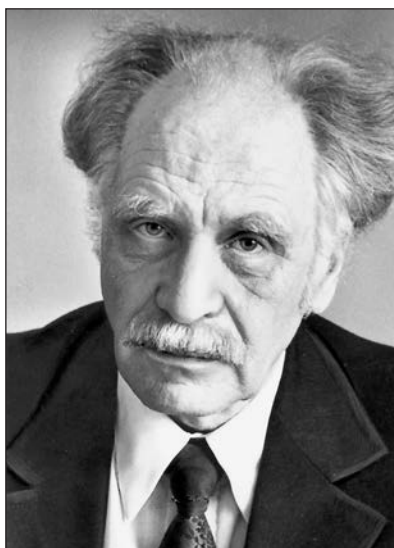
О том, что Земля постоянно облучается заряженными частицами высокой энергии — космическими лучами, ученые узнали в 1912 г. После открытия будущего нобелевского лауреата В.Гесса исследователи все время стремились забраться повыше — поближе к их возможному источнику. В 30-е годы для изучения космических лучей в стратосферу запускались аэростаты, шары-зонды, а сразу после окончания войны — ракеты (сначала немецкие

ФАУ, затем США и СССР стали делать свои ракеты). Интерес представляли не только космические лучи: для измерения ультрафиолетового излучения Солнца тоже нужно уйти выше слоя озона, эффективного УФ-поглотителя. Магнитное поле Земли и ионосфера также требовали измерений на больших высотах. Уже в 50-е годы идея создания искусственных спутников активно обсуждалась научным сообществом, особенно в связи с намечавшимися исследованиями в Международном геофизическом году (МГГ, 1957–1958).

В СССР подготовка экспериментов на спутниках началась в середине 1956 г. На совещании в Академии наук СССР ведущие специалисты по физике верхней атмосферы Земли, магнитного поля, ионосферы и космических лучей получили задание подготовить предложения-проекты экспериментов на искусственных спутниках Земли. Собранные заявки охватывали широкий спектр исследований от атмосферы до микрометеоров (и космической радиации в том числе), причем предполагалось все измерения проводить на одном аппарате. У каждого эксперимента были свои требования, и столь большой набор приборов нуждался в длительной подготовке спутника. Забегая чуть вперед, скажем, что запуск такого спутника (он оказался уже третьим) состоялся лишь 15 мая 1958 г.

Между тем было известно, что США также готовят к полету космический аппарат. В ситуации жесткой конкуренции возникло естественное желание быть первыми. Успешный запуск баллистической ракеты в СССР в августе 1957 г. подтолкнул руководителей спутниковой программы не дожидаться готовности основного научного аппарата, а запустить более простой, лишь бы обогнать США. Цель, как все знают, была достигнута, первым спутником в космосе стал советский.

На борту следующего, «Спутника-2», вышедшего на орбиту через месяц после «Спутника-1» (3 ноября 1957 г.), кроме научной аппаратуры находилась собака по имени Лайка. Она была гвоздем проекта, весь полет задумывался для ответа на вопрос: смогут ли летать в космос люди? Но была и научная программа, которая включала изучение ультрафиолетового излучения Солнца (под руководством С.Л.Мандельштама) и космических лучей (экспериментом руководил С.Н.Вернов). Хотя запуск «Спутника-2» был приурочен к 40-летию Великой Октябрьской революции, его работа освещалась менее шумно, а результаты были опубликованы только в научных журналах, причем значительно позднее.



С.Н.Вернов (1910–1982).



Дж.Ван Аллен (1914–2006).

Следующими успешными, как теперь говорят, миссиями, стали аппараты США «Explorer-1 и -3», запущенные 31 января и 26 марта 1958 г. с приборами для изучения космических лучей (научный руководитель эксперимента Дж.Ван Аллен). 15 мая наконец стартовал наш «Спутник-3» с большим набором измерительной аппаратуры. Полеты перечисленных спутников не только положили начало научным исследованиям космоса, но и помогли сделать важное геофизическое открытие — обнаружить радиационные пояса Земли.

Результаты полетов спутников «Explorer-1, -3» были представлены общественности 1 мая 1958 г. на заседании Академии наук США. В период с мая по август 1958 г. новое явление бурно обсуждалось, чему способствовала проводившаяся в Москве 29 июля — 9 августа V Генеральная ассамблея Международного геофизического союза, посвященная итогам МГГ. Доклады и обсуждения результатов полетов «Explorer-1, -3» и «Спутника-3» помогли выяснить в общих чертах картину захваченных магнитным полем Земли энергичных заряженных частиц, обсудить их источники. Эксперименты «Спутника-3» показали, что повышенная радиация характерна для двух четко разделенных областей: экваториальной и приполярной, названных впоследствии внутренним и внешним радиационными поясами. Радиация в экваториальной области, по данным «Спутника-3», состоит главным образом из протонов с энергией 100 МэВ (приборы американских спутников «Explorer-1, -3» не могли идентифицировать природу частиц), приполярные районы заполнены в основном электронами с энергией 100 кэВ (спутники «Explorer-1, -3» на эти широты не залетали, наклон их орбит был не очень большим, рис.1).

В период заседания Ассамблеи МГГ научный лексикон обогатился новыми понятиями: захва-

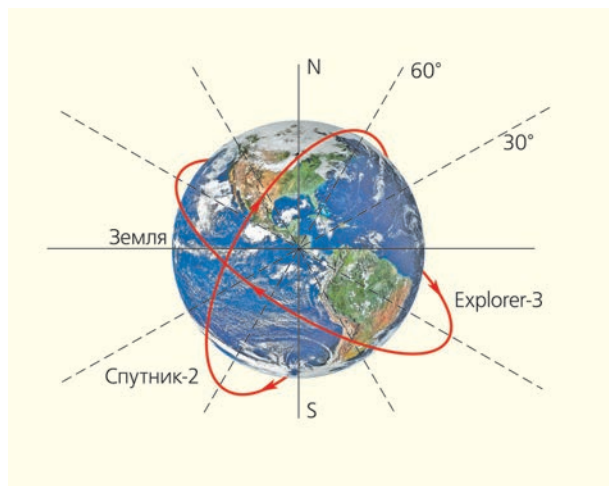


Рис.1. Орбиты двух спутников Земли — советского и американского. Наклон плоскости орбиты «Спутника-2» к плоскости экватора Земли — 65°, спутника «Explorer-3» — 33°. Перигеи орбит находятся на широтах места запуска, апогеи — в противоположном полушарии. Масштабы орбит и Земли почти соблюдены.

ченные магнитным полем заряженные частицы, нейтроны альbedo космических лучей, проникновение солнечных частиц в магнитное поле Земли и их захват; именно тогда был введен общепринятый ныне термин «радиационные пояса Земли». И это несмотря на то, что ученым еще не были известны данные следующего американского спутника «Explorer-4» (запущенного 26 июля 1958 г.), который был укомплектован более широким набором аппаратуры по сравнению с предыдущими. Впереди было и очень важное событие — создание искусственных поясов радиации в магнитном поле Земли с помощью атомного взрыва небольшой мощности (американский эксперимент «Argus» в августе 1958 г.).

Первые полеты — первые неожиданности

При подготовке наших экспериментов на спутниках сроки были сжатыми, дело новым, а ракетчики выдавали очень жесткие лимиты на вес, габариты и энергопотребление приборов. В этих условиях, естественно, нам пришлось ограничиться простейшими устройствами, способными регистрировать заряженные частицы: детекторами служили газоразрядные счетчики; электроника в то время уже появилась более легкая — полупроводниковая. На первых спутниках США были практически такие же приборы. Особенность газоразрядных счетчиков (счетчиков Гейгера) состоит в том, что они не различают вид частиц (их заряд или массу), вызвавших разряд, а регистрируют только факт попадания частицы в счетчик, делая это непрерывно и сообщая исследователям число

разрядов в единицу времени. «Мертвое время» счетчиков, пока идет разряд, составляет десятки микросекунд, так что счетчик может надежно считать до 10^4 частиц/с.

Значительная разница в экспериментах Вернова и Ван Аллена состояла в траекториях запущенных спутников и, соответственно, в обследованных областях пространства. Прибор Вернова был установлен на «Спутнике-2» с наклоном орбиты к земному экватору около 65°, тогда как американские «Explorer-1, -3» имели около 33° (рис.1). Информация с советского аппарата передавалась каждый день с трех витков, проходящих над территорией СССР. «Спутник-2» совершал каждый день 14 оборотов вокруг Земли, период обращения составлял 103 мин, на каждом витке аппарат смещался по долготе на 26°, так что витки покрывали всю поверхность Земли. Передатчики на «наших» витках работали непрерывно, но их сигнал регистрировался советскими приемными станциями, расположенными только в пределах границ страны, а поскольку запоминающих устройств на спутнике не было, данные с остальной, большей, части витков были нам недоступны. На остальных 11 витках спутник молчал.

Как потом стало ясно, это несовершенство эксперимента лишило нас очень важной информации, фактически приоритета обнаружения повышенной радиации на больших высотах над значительной частью поверхности Земли.

На «Спутнике-2» было установлено два идентичных прибора, которые показывали практически одинаковые результаты, согласующиеся с имеющимися представлениями о потоках космических лучей на различных широтах и высотах до 300–600 км. Было ощущение полного восторга: все отлично работает и дает ожидаемый результат. Но 7 ноября 1957 г. на одном из витков были зарегистрированы флуктуационные возрастания скоростей счета приборов (рис.2). Участок повышен-

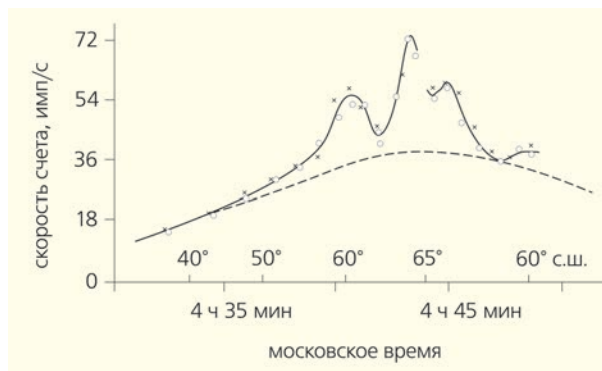
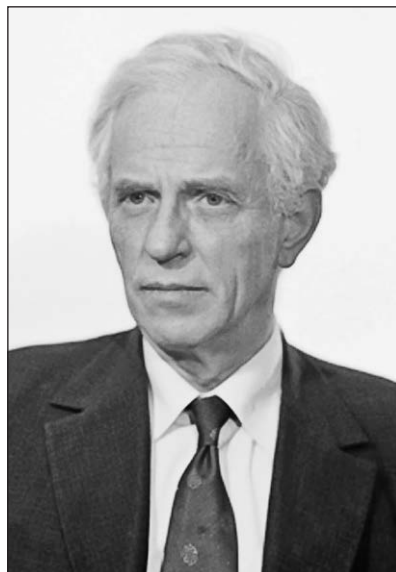


Рис.2. Данные «Спутника-2». Интенсивность космической радиации на одном из витков при пролете над северными районами СССР 7 ноября 1957 г. Как теперь ясно, это был сброс частиц из внешнего радиационного пояса во время слабого магнитного возмущения.

ного счета продолжался 13 мин и приходился на высокие геомагнитные широты (в районе перигея орбиты спутника, на высоте до 300 км). Мы пообсуждали различные, вплоть до фантастических, источники зарегистрированной повышенной радиации и остановились на протонах от слабой солнечной вспышки. Но в первой публикации результатов полета «Спутника-2» [1] даже этого сказано не было, упоминался только сам факт: надежно зарегистрировано 50%-е возрастание скорости счета приборов на одном из витков полета спутника на высоких широтах. То, что в статье не обсуждался обнаруженный эффект, можно объяснить узкой целенаправленностью наших устремлений: все, что в стороне от главного направления — изучения космических лучей, — откладывалось на потом... Все были перегружены «неотложными» проблемами, и мелкие неожиданности отвлекали внимание. Поэтому мы и ограничились вариантом солнечных космических лучей, которые в принципе могут проникнуть на высокие широты, особенно при возмущенном магнитном поле. О возможностях ускорения частиц в магнитосфере Земли серьезно не говорили, а о сбросе захваченных частиц даже не упоминали. Обнаруженное возрастание потока было небольшим, длилось недолго. Сильных вспышек в это время не наблюдалось, поэтому решили, что оно вызвано небольшой вспышкой на Солнце, о наличии которых к тому времени было уже хорошо известно.

Приборы Ван Аллена сразу после запуска оказались в экваториальных областях повышенной радиации, скорость счета частиц быстро нарастала и даже попадала в режим перегрузки, приборы зашкаливали, счетчики переставали работать. Ван Аллен с коллегами правильно интерпретировали ситуацию и зафиксировали наличие потоков радиации в экваториальных районах Земли на высотах, больших 500 км. О его докладе 1 мая 1958 г. [2] мы тогда не знали, в СССР эти результаты на первых порах стали известны только по краткой публикации в «Scientific American» (май 1958 г.); более подробные сведения приведены в работах [3–5]. В этих сообщениях, как и в советских, нет никакого упоминания о частицах, захваченных магнитным полем Земли. Авторы предполагали: зарегистрированные ими частицы имеют авроральное происхождение, проникая каким-то образом от высоких широт в экваториальную область.

Ошибочная интерпретация авторами первых измерений энергичных заряженных частиц на спутниках говорит о том, что обе группы, совет-



А.Е.Чудаков (1921–2001).

ская и американская, были не готовы к восприятию обнаруженного нового явления. Однако результаты, доложенные Ван Алленом, всколыхнули научную общественность, начались бурные обсуждения в различных научных коллективах, в основном на Западе (в Советский Союз в те времена информация, даже чисто научная, просачивалась с трудом). Результаты же полета «Спутника-2» стали известны специалистам только в июне 1958 г. (когда вышла статья [2]), да и то в основном русскоязычным читателям. Такое катастрофическое отставание в популяризации своих достижений было характерно для советского периода, оно объясняется рядом причин, среди которых секретность стоит не на последнем месте.

Важный этап в понимании нового явления приходится на май 1958 г., когда был запущен наш «Спутник-3». На нем установили более информативный по сравнению с предыдущим прибор для изучения радиации в космосе. Необходимость такой модификации осознал А.Е.Чудаков. Он усомнился, что зарегистрированное на «Спутнике-2» возрастание обусловлено протонами. Счетчик там находился под алюминиевым кожухом и оболочкой аппарата общей толщиной $\approx 2\text{--}3$ г/см², и до него, по идее, могли добраться лишь протоны с энергией $>30\text{--}50$ МэВ. Для солнечных событий небольшой мощности такие протоны маловероятны, а электроны не очень больших энергий (≤ 1 МэВ) тоже тормозятся, не достигают счетчика. Их тормозное излучение счетчиком хотя и регистрируется, но с очень малой эффективностью. Получается, что мы засекали космические лучи (энергичные протоны) и небольшое добавочное число тормозных квантов от значительного потока электронов с энергией <1 МэВ.

Чтобы проверить эту гипотезу, для уже почти готового научного аппарата был срочно подготовлен минимально экранированный сцинтилляционный счетчик (кристалл NaJ(Tl) размером 40×40 мм), место для которого выкроили снаружи спутника. Так как этот счетчик был установлен «вдгонку», в уже скомпонованную конструкцию, информацию о потоках частиц с него пришлось транслировать через сигнальный радиопередатчик «Маяк», который на первых спутниках передавал только «бип-бип-бип». В полете «Спутника-3» модулированный радиосигнал «Маяка» уже нес полезную информацию нашего прибора. Регистрировались скорости счета энерговыделений в кристалле счетчика, больших 35 кэВ, и полная ионизация в кристалле фотоумножителя сцин-

тилляционного счетчика позволяла оценивать среднюю ионизацию частиц в кристалле, т.е. в какой-то степени судить о природе детектируемых частиц. Отметим, что на всех первых американских спутниках («Explorer-1, -3, -4») определение природы частиц не проводилось.

Сигнал «Маяка» мог приниматься по всему земному шару — как в полярных широтах, так и в экваториальных районах — простейшими, даже радиоловительскими, станциями. Обработка записей нескольких приемников, расположенных в разных точках планеты, позволила установить, что повышенная радиация наблюдается в двух различных областях: экваториальной и высокоширотной зонах. Кроме того, оказалось, что выделенные зоны сильно различаются не только по расположению в пространстве, но и по составу частиц. Экваториальная зона занимает интервал в пределах меньше 45° северной и южной широты и заполнена в основном протонами со средней энергией около 100 МэВ, тогда как приполярная располагается выше 45° северной и южной геомагнитной широты и содержит электроны с энергией около 100 кэВ. Позднее, как уже упоминалось, эти зоны назвали внутренним и внешним радиационными поясами Земли.

Дальнейшее изучение внутреннего и внешнего поясов показало их существенное различие, разную природу, пространственные и временные характеристики. Самое важное отличие — стабильность структуры поясов и их источников. Частицы внутреннего пояса — протоны, их источник стабилен: это космические лучи; источники электронов внешнего пояса разнообразны, чаще всего это ускоренные частицы в самой магнитосфере, во время магнитных бурь, связанных с солнечной и геомагнитной активностью [6–8].

Проведенные исследования и их обсуждение на различных собраниях ученых подкреплялись новыми экспериментами в космосе. Результаты спутника «Explorer-4», траектория которого уже частично захватывала внешний радиационный пояс (наклон плоскости орбиты у экватора составлял 51°), подтвердили существование двух зон повышенной радиации, разделенных небольшой щелью [9].

Следующий важный этап в понимании природы обнаруженной радиации — эксперимент «Argus». Для заполнения ловушки частицами использовался ядерный взрыв в верхних слоях атмосферы Земли. Возникший тонкий пояс захваченных частиц существовал несколько недель — его регистрировал «Explorer-4». Операцию «Argus» можно рассматривать как заключительный эксперимент, проявивший в общих чертах феномен существования захваченной радиации в магнитосфере Земли. Последующие эксперименты и теоретические исследования были нацелены на детальное изучение радиационных поясов, о чем имеется обширная литература, например [10–13].

От гипотез к осмыслению нового явления

Процесс понимания новых результатов, полученных на первых спутниках, любопытен сам по себе и важен для осмысленной расстановки акцентов в приоритетах открытия радиационных поясов.

В последние перед открытием радиационных поясов годы ученые уже понимали, что полярное (а иногда и более южное) свечение ночного неба вызвано заряженными частицами, возбуждающими атомы атмосферы Земли. Естественно, подозрение пало на Солнце, так как приход частиц от него к тому времени был уже установлен. Чтобы проследить траекторию движения солнечных частиц в магнитном поле Земли, проводились многочисленные расчеты.

Норвежский ученый К.Стёрмер вычислял траектории входящих в магнитное поле Земли солнечных и космических лучей [14]. Он обнаружил, что в земном поле возможны замкнутые траектории, но не обратил на них внимания, поскольку расчеты запрещали заряженным частицам попадать в область этих траекторий извне. Возможный источник — нейтроны — не рассматривался, хотя нейтроны могли свободно залетать в найденные каверны и, распадаясь там на протоны и электроны, заполнять их. Помимо космических лучей Стёрмер занимался и проблемами геофизики, в его работах говорится о магнитном отражении заряженных частиц, приходящих от Солнца, и о существовании периодических траекторий в магнитном поле Земли. Это не совсем то, что рисуют сейчас, иллюстрируя движение частиц внутри каверны с отражением их на севере и юге (рис.3), но в обсуждениях на V Ассамблее МГГ книга Стёрмера [15] и его численные результаты были упомянуты много раз, и концепция устойчивого захвата обсуждалась, может быть, впервые на международной конференции. Сегодняшний просмотр работ Стёрмера показывает, что он многое подготовил для правильного понимания геомагнитных явлений.

Предположения о стабильном захвате частиц в магнитном поле Земли было также выдвинуто Н.Кристофилосом еще в 1957 г., но соответствующие работы не публиковались до 1959 г. [16, 17], по-видимому, из-за секретности — в связи с подготовкой проекта «Argus», инициатором которого он был. До этого проекта Кристофилос работал с установками для получения управляемых термоядерных реакций и распространил идею удержания частиц в магнитных ловушках лабораторных размеров на масштабы Земли. Он предположил, что магнитное поле Земли способно захватывать и удерживать энергичные частицы и что ядерный взрыв может служить приемлемым источником для заполнения геомагнитной ловушки частицами. И действительно, «Explorer-4» зарегистрировал пояса частиц, образованных в результате каждого из трех взрывов операции «Argus». Наиболее



К.Стёрмер (1874–1957).



Н.Кристофилос (1916–1972).



Ф.Сингер (р.1924).

интересным результатом этих взрывов было появление частиц на магнитной оболочке с $L = 2$ (L — расстояние магнитной оболочки от центра Земли в экваториальной плоскости, выраженное в радиусах Земли), сохранявшейся устойчивой в течение нескольких недель. Искусственные пояса имели поперечные размеры около 100 км, они не дрейфовали по радиусу, расширение их было незначительным (рис.4). Результаты операции «Argus»

опубликованы в августе 1959 г. [17] и в более поздней книге Кристофилоса [18].

В 1957 г. Ф.Сингер (США) для объяснения магнитных бурь предположил, что главная фаза бури обусловлена долготным дрейфом частиц, захваченных магнитным полем Земли [19]. Эта идея уже содержала некоторые представления, которыми сейчас описываются основные явления в радиационных поясах Земли.

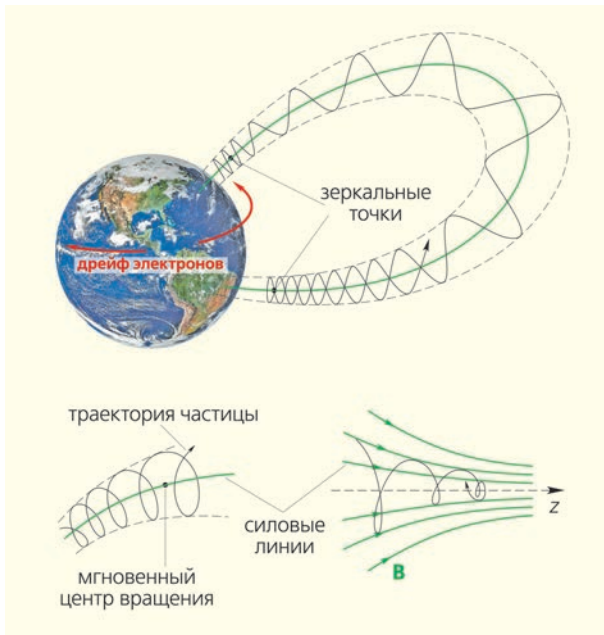


Рис.3. Траектории частиц, захваченных в ловушку магнитного диполя Земли. Движение заряженной частицы в геомагнитной ловушке (вверху). Внизу показаны траектория перемещения частицы по спирали на силовой линии магнитного поля (слева) и процесс отражения частицы в сильно неоднородном магнитном поле (магнитная пробка, справа).

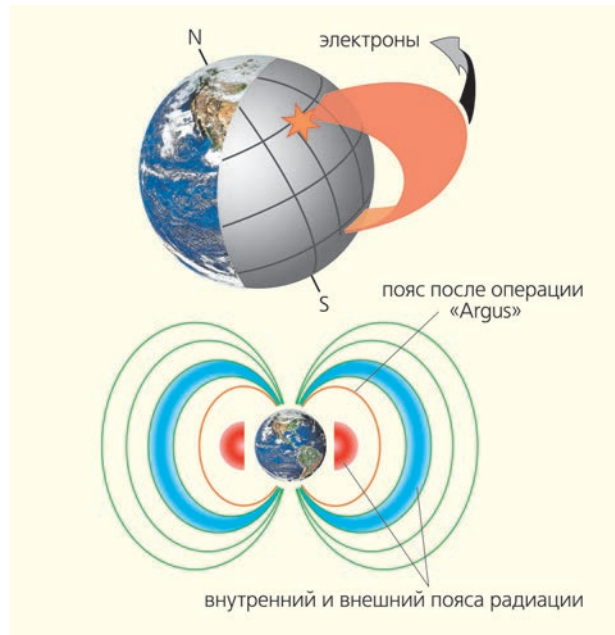


Рис.4. Движение частиц после их импульсной инъекции в магнитное поле Земли. Начальный период долготного дрейфа частиц после атомного взрыва (вверху). Электроны дрейфуют в одну сторону, протоны (и другие положительно заряженные частицы) — в другую. Примерное расположение пояса электронов после операции «Argus» (внизу).

Приведенные примеры показывают: к 1957 г. были группы исследователей, в основном геофизиков, которые серьезно обсуждали природу частиц в магнитосфере Земли для объяснения полярных сияний, выясняли траектории солнечных и космических частиц в магнитном поле Земли и были готовы к восприятию новых открытий. Исследователи космических лучей (Вернов и Ван Аллен) этими вопросами не занимались, и успехи геофизиков были им неизвестны. Разобщенность геофизиков и физиков-космиков — одна из причин непонимания полученных последними результатов.

Первые же тесные встречи-обсуждения с участием специалистов разного профиля произошли в июле 1958 г. в Москве во время V Ассамблеи МГТ, где присутствовали ученые США (Е.Рэй, Ф.Сингер и др.) и СССР (С.Н.Вернов, А.Е.Чудаков, С.Л.Мандельштам, В.И.Красовский и др.). На специально организованных лекциях коллеги-сотрудники Ван Аллена и Вернов с Чудаковым сделали доклады о результатах полетов всех спутников Земли («Спутника-2», «Explorer-1 и -3» и «Спутника-3»). Результаты этих экспериментов были не только поняты и приняты научной общественностью, но и сразу подтверждены операцией «Argus» и измерениями искусственно созданных поясов спутником «Explorer-4» [20].

На ассамблее обсуждалась и количественно анализировалась идея, что протоны внутреннего пояса появляются в процессе распада нейтронов, образующихся при реакциях взаимодействия высокоэнергичных частиц космических лучей с ядрами атомов атмосферы Земли и вылетающих из нее (их назвали нейтронами альbedo космических

лучей). При распаде нейтронов образуются протоны и электроны, которые попадают в магнитную ловушку и захватываются там (рис.5). В СССР эта гипотеза впервые прозвучала на семинаре в Физическом институте АН СССР уже 6 июня 1958 г., когда Вернов рассказывал о расчетах по нейтронному источнику протонов*. На V ассамблее МГТ доклад был повторен. Докладывали на эту тему и другие исследователи — Ф.Сингер и П.Келлог. С.Н.Вернов и А.Е.Чудаков представили также доклады на X съезде Международного астрономического союза (Москва, август 1958 г.) и на 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1958 г.) [6].

Первая публикация по протонам от распада нейтронов альbedo принадлежит, по-видимому, Сингеру [21]. И это несмотря на то, что Вернов рассматривал идею нейтронов альbedo на две недели раньше Сингера, как известно из переписки М.И.Панасюка с Сингером, где тот признает первенство Вернова**. Потом были и другие публикации, например [22, 23].

Таким образом, можно констатировать, что к концу лета 1958 г. научное сообщество узнало о существовании вокруг Земли областей повышенной радиации и о том, что эта радиация разделена на две зоны, внутреннюю (экваториальную) и внешнюю (приполярную). Внутренняя зона заполнена в основном протонами с энергией 100 МэВ, внешняя — электронами с энергией от 100 кэВ. Было установлено, что эти частицы захвачены магнитным полем Земли, и найден возможный источник наполнения поясов частицами — распад нейтронов альbedo космических лучей. Существенно, что захват и длительное удержание частиц были сразу подтверждены искусственными радиационными поясами в операции «Argus». Возникшее на V ассамблее МГТ очень удачное название открытого явления — «радиационные пояса Земли» — в печати, вероятно, впервые появилось в работах Сингера [21], опубликованных почти сразу после окончания конференции.

О приоритете и сотрудничестве

До сих пор в истории физики стоит вопрос: кого же считать автором открытия радиационных поясов Земли? Суммируем различные сведения и соображения, которые могут помочь составить некоторое представление о вкладе различных групп и отдельных ученых в обнаружение и объяснение этого явления.

Прежде всего — о самом открытии. Оно не могло не произойти, будучи таким же неизбежным, как

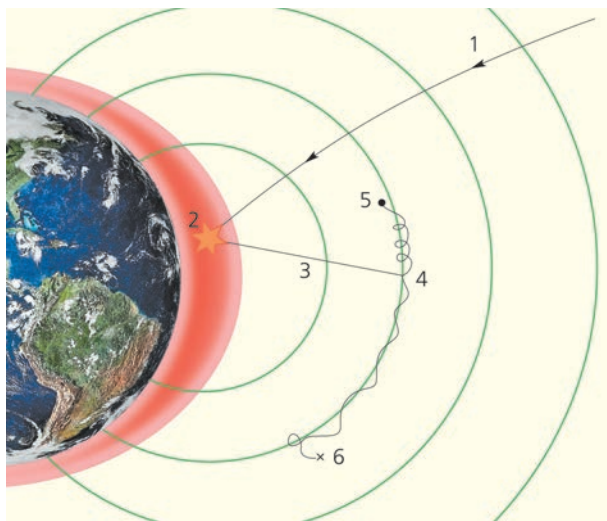


Рис.5. Нейтронный источник протонов во внутреннем поясе (нейтронное альbedo). Модель образования внутренней зоны радиации: протоны галактических космических лучей (1) испытывают столкновения в атмосфере (2) и рождают нейтроны (3), которые, выходя из атмосферы, распадаются (4), создавая захваченные электроны (5) и протоны (6).

* Доклад С.Н.Вернова «Возможный механизм создания “земного излучения” под действием космических лучей» на семинаре ФИАН 6 июня 1958 г. Текст доклада существует.

** М.И.Панасюк, частное сообщение.

открытие Америки. Развитие ракетной техники, вызванное общим прогрессом, а не только политическими и военными запросами, неминуемо привело бы к попаданию приборов в области повышенной радиации, и кто первый залетел бы туда, тот и открыл бы. Но просто попасть в пояса радиации недостаточно, нужно зарегистрировать потоки частиц и понять, что именно зарегистрировано...

В нашем случае ситуация оказалась несколько сложнее: столкнулись с поясами одни исследователи, а разгадали эффект другие.

Первыми обнаружили частицы поясов в СССР, вторыми в США, но никто сначала не понял природу явления. Мы зарегистрированные частицы сочли солнечными, а не магнитосферными и не сразу уделили им должное внимание. Потом исправились, решили подробнее исследовать обнаруженный казус и на «Спутник-3» поставили прибор, решивший эту проблему. Американцы тоже сначала заподозрили Солнце, впрыснувшее частицы в полярные районы, где раньше Ван Аллен наблюдал что-то подобное [24]. Правда, для переноса частиц от полюсов к экватору механизма не нашлось... Причина недоразумений — сосредоточенность мыслей на одной задаче — изучении космических лучей. Проблем геофизики для физиков-космиков просто не существовало, мысли были далеко и высоко, а магнитное поле Земли было помехой, хотя иногда оно и использовалось как магнитный спектрометр, помогавший определить энергетический спектр и состав космических лучей [25]. Может быть, виновата загруженность другими проблемами. Трудно поверить, что физикам-космикам не хватало знаний предшествующих исследований по траекториям частиц в магнитном поле Земли.

Доклад Ван Аллена 1 мая 1958 г. [2], возбудивший научное общество, стал толчком к пониманию процессов в геомагнитном поле. Результаты и обсуждения предшествующих исследований позволили уже ко времени открытия V ассамблеи МГТ в июле 1958 г. сформулировать концепцию захвата и удержания частиц в магнитном поле Земли. И в своей специальной лекции на ассамблее Вернов и Чудаков рассказывали о внешнем поясе, о составе частиц в обоих поясах, о границах поясов. В докладе же от группы Ван Аллена не было даже упоминаний о стабильных потоках захваченных магнитным полем частиц, говорилось только об обнаруженной ими «радиации». Вероятно, его сотрудники-докладчики не осознали природы нового явления и не успели или не решились в отсутствие руководителя (Ван Аллена на ассамблее не было) перестроиться...

Обоснованно ли именовать Ван Аллена автором открытия радиационных поясов? Почему сложилось подобное мнение? Причин несколько.

Прежде всего, Ван Аллен первым широко оповестил о своих результатах, затем последовало много публикаций, хотя нигде до полета «Explorer-4» по реальной физике явления он не высказывался. Ис-

тинную природу феномена поняли другие. Работа Ван Аллена с уже установившейся терминологией была опубликована лишь в конце 1959 г. [26]. Данные СССР нигде за границей до июля 1958 г. не докладывались, первая публикация была представлена в печать только 4 мая 1958 г. Результаты «Спутника-3» международная общественность узнала тоже только на V ассамблее МГТ.

Вторая причина — неосведомленность исследователей о работах в смежных областях науки. Основное внимание уделялось космическим лучам. В 1958 г. под руководством Вернова велись работы на ШАЛ-установке в МГУ (исследовались так называемые широкие атмосферные ливни частиц), создавалась большая ШАЛ-установка в Якутске, проводились опыты на Памире, наблюдения на шарах-зондах и многие другие исследовательские работы. Такое обилие экспериментов и привело к потере ориентации, не было сразу нащупано главное направление исследований, осознание ситуации пришло позднее. Когда все устоялось, Вернов признал: «Если бы физики в то время знали больше о геофизике и геофизики лучше знали физику, мы могли бы сделать гораздо больше открытий».

Третья причина — изолированность СССР, плохая связь и недостаточный обмен информацией с зарубежными учеными. Этому состоянию способствовала напряженность отношений с США и секретность, связанная со всем, что касалось военно-промышленного комплекса, поставляющего ракеты-носители. Не исключено, что запоздалая публикация результатов «Спутника-2» была вызвана согласованием материалов статьи с соответствующими инстанциями. Может быть, поэтому статья и попала в журнал только 4 мая 1958 г., хотя в тот день все соавторы уже около двух недель были на полигоне, готовили к запуску «Спутник-3» и физически не могли сами послать статью в журнал.

Все вместе привело к тому, что Вернов со своими спутниковыми результатами просто не был известен широкой научной и массовой общественности, тогда как Ван Аллен — у всех на слуху и в блеске новых перспективных исследований. Естественно, научная общественность и признала последнего автором открытия радиационных поясов Земли. А вы кому бы отдали пальму первенства в этих условиях?

В заключение хотелось бы все-таки зафиксировать, что, несмотря на споры о приоритетах обнаружения радиационных поясов Земли, открытие внешнего радиационного пояса безусловно принадлежит СССР. Внешний пояс был впервые зарегистрирован на «Спутнике-3», сообщение на V ассамблее МГТ было сделано, когда данных с американского «Explorer-4», который тоже залетал во внешний пояс, еще не было. Повторим, что «Спутник-3» получил очень важные результаты: определил природу частиц внешнего пояса (электроны с энергией 100 кэВ), установил внутреннюю и внешнюю границы внешнего радиацион-

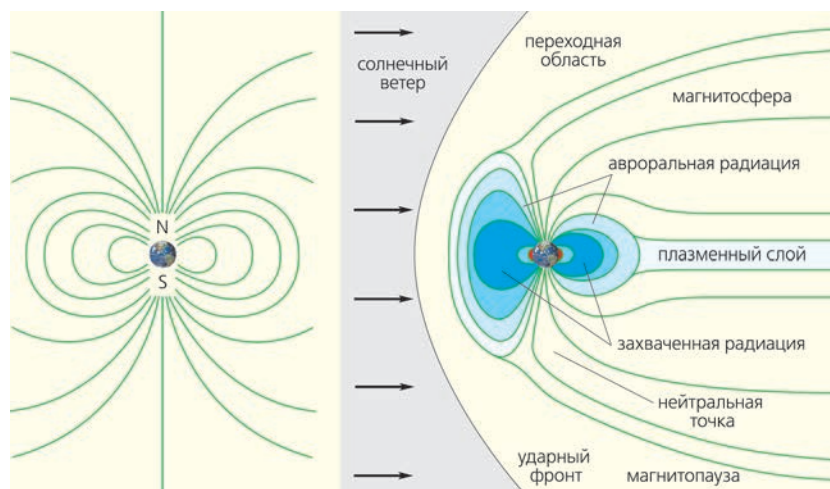


Рис.6. Представление об околоземном пространстве до (слева) и после (справа) открытия радиационных поясов Земли.

ного пояса, его изменчивость под действием геомагнитной активности, положения максимумов интенсивности частиц. Для внутреннего пояса «Спутник-3» также нашел состав частиц, его границы на всех долготах в Северном и Южном полушариях по всему земному шару. Таких данных о внешнем поясе к моменту V ассамблеи еще ни у кого не было. Конечно, открытие внешнего пояса в определенной степени вторично, но тем не менее это достойный результат.

Вообще-то у СССР был шанс первым открыть радиационные пояса Земли. Вот выдержка из воспоминаний Сингера, опубликованная в сборнике ИКИ к 50-летию запуска «Спутника-1» [27].

Вернов потерял право первооткрывателя радиационного пояса из-за секретности русских. Частицы радиационного пояса были зарегистрированы в эксперименте Вернова на «Спутнике-2» на шесть месяцев раньше, чем их зарегистрировал прибор Ван Алена на «Explorer-1». Однако эллиптическая орбита «Спутника» значительно проникла в пояс лишь в Южном полушарии, а русские ни с кем не стали делиться телеметри-

ческим кодом (Прим. автора: С.Н.Вернов этого кода не знал, передачу вели другие службы, и код был засекречен). Во время Конгресса по космическим лучам в Москве в 1959 г. в гостиничном номере (по-моему, это было в гостинице «Москва») профессор Гарри Мессел, известный исследователь космических лучей и глава Физической школы в Университете Сиднея, рассказал мне, как все происходило. Он записывал сигнал со «Спутника-2» каждый раз, когда тот пролетал над Австралией, однако кода ему не дали. Когда же они наконец попросили у него копию записанных данных, он послал их к черту (как это мог сделать только Гарри Мессел).

Гарри, украинец из Канады, рассказывал эту историю с большим юмором. Конечно, если бы они получили данные наблюдений вплоть до апогея орбиты «Спутника-2», расположенной на высоте 1680 км, сомнений бы не осталось.

Есть и другие «если бы». Они связаны даже не столько с секретностью, сколько с необычайной срочностью проведения всех работ. Можно пожалеть о нашей близорукости, но ведь легко судить задним числом о том, как бы надо было сделать. И все-таки за три месяца обсуждений ученые всего мира смогли понять новое явление природы. Изучение радиационных поясов Земли показало важность совместных работ и бесперспективность разобщенности. Каким было наше представление о магнитном поле Земли и окружающем Землю пространстве до открытия радиационных поясов и какова реальная картина, известная в настоящее время, демонстрирует рис.6.

Но самое главное — полет первых спутников указал путь к дальнейшему прогрессу науки. Был сделан начальный шаг к полному освоению Солнечной системы и, помечтаем, Вселенной. ■

Литература / Reference

1. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. Доклады АН СССР. 1958; 120(6): 1231–1233 и Сб. «Искусственные спутники Земли». 1958; 1: 5–8. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Logachev Yu.I., Chudakov A.E. Measurements of the spaceradiation on the Earth's artificial satellite. Doklady AN SSSR. 1959; 120(6): 5–8. (In Russ..)]
2. Van Allen J.A. Transcript of 1958 lecture, I.G.Y. Satellite Rep. 1961; 13.
3. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Preliminary reports: Satellites 1958 Alpha and 1958 Gamma. Trans. Amer. Geophys. Union. 1958; 39(4): 767–769.
4. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Preliminary reports: Satellites 1958 Alpha and 1958 Gamma. IGY Satellite Rep. Ser. 1958; 3: 73–92.
5. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Observation of high intensity radiation by satellites 1958 alpha and gamma (Explorers I and III). Jet Propulsion. 1958; 28(9): 588–592.
6. Вернов С.Н., Чудаков А.Е. Изучение космических лучей с помощью ракет и спутников в СССР. Труды 2-й Международной. конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). М., 1959;

- 1: 267–271. [Vernov S.N., Chudakov A.E. The study of cosmic rays with rockets and the satellites in the USSR. Proceedings of the 2nd International conference on the peaceful uses of atomic energy (Geneva, 1958). Moscow, 1959; 1: 267–271.]
7. Vernov S.N., Chudakov A.E. Terrestrial corpuscular and cosmic rays. Space Research. H.Kallmann Bijl (eds). Amsterdam, 1960; 751–796.
 8. Vernov S.N., Vakulov P.V., Gorchakov E.V. et al. Study of the cosmic-ray soft component by the 3rd Soviet Earth satellite Planet and Space Science. 1959; 1(2): 86–93.
 9. Van Allen J.A., McIlwain C.E., Ludwig G.H. Radiation observations with satellite 1958-e. J. Geophys. Res. 1959; 64(2): 271–286.
 10. Hess W.N. The Radiation Belt and Magnetosphere. Blaisdell Publishing Company, 1968.
 11. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М., 1968. [Tverskoy B.A. Dynamics of the Earth's Radiation Belts. Moscow, 1968. (In Russ.)]
 12. Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве. М., 1972. [Shabanskiy V.P. Phenomena in near-earth space. Moscow, 1972. (In Russ.)]
 13. Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al. Anthropogenic space weather. Space Sci. Rev. 2017. DOI 10.1007/s11214-017-0357-514.
 14. Stormer C. On the trajectories of electric particles in the field of magnetic dipole with applications to the theory of cosmic radiation. Astrophysics. 1930; 1: 237.
 15. Stormer C. The Polar Aurora. Cambridge, 1955.
 16. Christofilos N. The Argus experiment. Proc. Natl. Acad. Sci. 1959; 45: 1144–1152.
 17. Christofilos N.C. The Argus experiment. J. Geophys. Res. 1959; 64(8): 869–875.
 18. Christofilos N. Sources of Artificial Radiation Belts. Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field. D. Reidel, Holland, 1966.
 19. Singer S.F. A new model of magnetic storms and aurorae. Trans. Amer. Geophys. Union. 1957; 38: 175.
 20. Van Allen J.A., McIlwain C.E., Ludwig G.H. Satellite observations of electrons artificially injected into the geomagnetic field. J. Geophys. Res. 1959; 64(8): 877–891.
 21. Singer S.F. Trapped albedo neutron theory of the radiation belt. Phys. Rev. Lett. 1958; 1: 181–183.
 22. Kellogg P.J. Possible explanation of the radiation observed by Van Allen at high altitude In satellites. Nuovo Cimento. 1959; 11(1): 48–66.
 23. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Иваненко И.П. и др. Возможный механизм создания «земного корпускулярного излучения» под действием космических лучей. Доклады АН СССР. 1959; 124(5): 1022–1025. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Ivanenko I.P. et al. The possible mechanism of creation of «terrestrial corpuscular radiation» under the action of cosmic rays. Doklady an SSSR. 1959; 124(5): 1022–1025. (In Russ.)]
 24. Van Allen J.A. Direct detection of Auroral radiation with rocket equipment. Pric. Nat. Acad. Sci. 1957; 43: 57–62.
 25. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Добротин Н.А. и др. Определение знака заряда первичных частиц космических лучей по измерениям азимутальной асимметрии в стратосфере в районе экватора. Доклады АН СССР. 1949; 68: 253–255. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Dobrotin N.A. et al. Determination of the sign of the charge the primary particles of cosmic rays by measuring azimuthal asymmetries in the stratosphere near the equator. Doklady AN SSSR. 1949; 68: 253–255. (In Russ.)]
 26. Van Allen J.A. The geomagnetically trapped corpuscular radiation. J. Geophys. Res. 1959; 64: 1683–1689.
 27. Ф.Сингер. Эпоха до запуска спутника и его ранние открытия. Первая космическая... М., 2007: 216–223. [F.Singer. The era before the satellite launch and its first discoveries / The first space... Moscow, 2007: 216–223. (In Russ.)]

Earth's Radiation Belts: Discovery and First Explorations

Yu.I. Logachev

Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Unexpected discovery of radiation belts around the Earth resulted in a number of new hypotheses explaining movements of charged particles in magnetic fields, as well as re-analyses of the existing beliefs. Attempts were made to relate the new discovery with well-known natural phenomena such as polar aurora, geomagnetic storms, and solar energetic particles. As expected, these research efforts led to the truth (particles captured by the magnetic field of the Earth are indeed related to the abovementioned phenomena), and within just one month the nature of the new discovery became quite clear. Who were the main contributors to unveiling the mystery of the new phenomenon and why the discovery was named after just one of the participating scientists?

Keywords: «Sputnik-1», «Sputnik-2», Earth's external and internal radiation belts.

Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий

Л.М.Зеленый

Институт космических исследований РАН (Москва, Россия)

В рамках празднования шестидесятилетия наступления космической эры Российская академия наук и Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос» 3–4 октября провели Международный форум «Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий». В подготовленном специально для читателей «Природы» тексте изложены основные тезисы выступления автора. Как дерзкая мечта воплотилась в жизнь, как Спутник стал не только техническим, но и культурным явлением, что последовало за ним и какие эксперименты нас ожидают в будущем? Полный вариант доклада будет опубликован в сборнике трудов форума, который планируется к изданию в 2018 г.

Ключевые слова: первый спутник, космические исследования, Федеральная космическая программа России, планетные исследования, Солнечная система, магнитосферные исследования, астрофизика, Луна, Марс, Венера, международное сотрудничество, космос.

Третьего-четвертого октября весь мир, и в том числе Российская академия наук, отмечали шестидесятилетие со дня запуска первого искусственного спутника Земли, «Спутника-1», как его называют за рубежом. С этого дня (даже с точного времени 22:28:34 04.10.1957 по Москве) отсчитывают космическую эру человечества, в которой космосу принадлежит огромная роль: и в быту, и в науке, и в культуре, во всем мировоззрении человечества.

Один из интересных вопросов сегодня: что стало основой успеха СССР в космосе, хотя в 1950-х годах наша страна не была одной из самых развитых индустриальных держав? Что стало движущей силой — требования обороны или мечта? И что стоит за современными космическими исследованиями?

Мечта, теория, воплощение...

В России еще задолго до революции возникло такое явление, как философия русского космизма. К ее представителям относятся Николай Федорович Федоров, Николай Александрович Морозов, отчасти академик Владимир Иванович Вернадский, Александр Леонидович Чижевский и, безус-



Лев Матвеевич Зеленый, академик, доктор физико-математических наук, директор Института космических исследований (ИКИ) РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций.

ловно, Константин Эдуардович Циолковский. Именно последний был тем, кого мы бы сегодня назвали визионером: он планировал будущее человечества исходя из того, что люди не останутся вечно на Земле. Вместе с тем Циолковский много занимался техническими вопросами, стал одним из основоположников практической космонавтики и одним из первых заговорил об искусственных спутниках Земли. Эта его «визионерская» работа повела в космос многих людей из поколения Сергея Павловича Королева, его старших коллег, которые фактически на голом энтузиазме начали разрабатывать в 1920–1930-х годах в Советском Союзе ракетные двигатели. Достаточно вспомнить энтузиастов Группы изучения реактивного движения (ГИРД), которую возглавлял в 30-х годах Фридрих Артурович Цандер. Ее члены и стали основными разработчиками советской ракетной техники. В шутку они расшифровывали на-

звание своей организации как «Группа инженеров, работающих даром».

Кроме Циолковского и Королева, роль которых хорошо известна, надо вспомнить о математике, академике, вице-президенте и президенте Академии наук СССР Мстиславе Всеволодовиче Келдыше. Еще когда я учился в школе, об их работах в космонавтике никто толком ничего не знал. Имя Королева вообще не упоминалось, он был «зашифрован» как «главный конструктор», а Келдыш, хотя и был гораздо более публичной фигурой, но до определенного момента не ассоциировался с космической деятельностью, в газетах фигурировал лишь безымянный «главный теоретик космонавтики». Их содружество, их работы действительно дали науке очень много. К сожалению, узнали мы об этом только после их ухода из жизни.

Математик Келдыш, инженер Королев, но как же без физики?! И физики тоже поучаствовали в становлении отечественной космонавтики; известно, что ракетостроение стало развиваться для того, чтобы обеспечить средства доставки ядерных зарядов на территорию «вероятного противника». Но для таких целей не были нужны столь мощные ракеты, какой была Р-7. В мемуарах академика Андрея Дмитриевича Сахарова я нашел очень интересный материал: трижды Герой Социалистического Труда и «отец водородной бомбы», а позже один из главных диссидентов и противников советской власти в 1950-х годах занимался расчетами термоядерного устройства.

В частности, он рассчитывал массу термоядерного заряда, под который «подгонялась» масса ракеты. По его первоначальным расчетам бомба получалась очень тяжелой, около 5 т, и вот под такую огромную бомбу стали делать ракету, знаменитую Р-7. Потом оказалось, что он сильно преувеличил в своих расчетах требуемую массу, но ракета уже была сделана, и ее мощности оказалось достаточно, чтобы вывести в космос первый спутник, а потом и корабль Юрия Гагарина, и в целом она оказалась востребованной именно для космонавтики, не только для оборонных целей. И Борис Евсеевич Черток, «правая рука Королева», пишет об этом: «Я не могу судить о том, в какой мере Андрей Сахаров лично определил конструкцию заряда, но, безусловно, именно то, что делал Сахаров, потребовало создания такой мощной ракеты, какую мы разработали под шифром Р-7. И имя Сахарова тоже должно упоминаться в истории космонавтики!». Ошибка гениального человека может дать полезный результат! Первый успешный старт ракеты Р-7 состоялся в августе 1957 г., всего за несколько месяцев до запуска первого спутника.

Вся эта работа делалась на оборонном предприятии и была строго засекречена. Но 1955 г. — время после смерти Сталина, когда в Советском Союзе уже появилась определенная открытость, и по личной инициативе генерального секретаря Н.С.Хрущева было решено, что СССР примет учас-

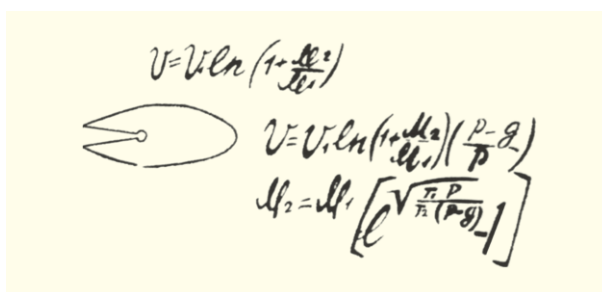


Схема движения искусственного спутника Земли и формула Циолковского (автограф).

тие в проведении Международного геофизического года (он планировался на 1957–1958 гг.) и, в частности, выведет в космос искусственный спутник Земли с «научной аппаратурой для исследования физических свойств околоземного космического пространства». Политические и оборонные цели совпали с научными. В одном из документов есть фраза: «...разрешить Академии наук провести в открытом порядке подготовительные



М.В.Келдыш и С.П.Королев.



А.Д.Сахаров и И.В.Курчатов.

работы по привлечению радиолюбителей и астрономов добровольных обществ и обсерваторий для наблюдения за полетом Спутника». Иными словами, с самого начала космическая деятельность понималась в контексте международного сотрудничества и пропаганды науки.

Но объявление, что в рамках Международного геофизического года СССР собирается запустить

искусственный спутник Земли, никто не воспринял тогда всерьез, потому что наша страна все еще оставалась в очень сложном экономическом положении после конца Великой Отечественной войны. К запуску готовились и в США, поэтому мировая общественность ждала результатов скорее из-за океана.

Старт «космической гонке» был дан. В СССР строился тяжелый аппарат с большим комплексом научной аппаратуры (научной программой руководила Академия наук, председателем был тогда еще вице-президент Келдыш), но его не успевали сделать к осени 1957 г., а время не ждало — были сведения, что в США аппарат к запуску готов. Поэтому уже в середине 1957 г. было принято решение

отложить намеченный запуск тяжелого научного спутника (он был запущен позже, 15 мая 1958 г., третьим) и сделать «простейший» аппарат массой всего несколько десятков килограммов. Эта идея Королева была одобрена ЦК партии.

Главным прибором первого спутника был радиопередатчик, передававший знаменитые сигналы «бип-бип-бип». Его сделал Константин Иосифович Грингауз, ставший в будущем сотрудником ИКИ (ИКИ в то время еще не существовал), и именно он был последним человеком, чья рука коснулась Спутника.

Итак, первый спутник был запущен 4 октября 1957 г. с территории Казахстана, и он существовал на орбите несколько месяцев, пока в январе 1958 г. не сгорел в атмосфере, выполнив 1400 витков.

Сообщение ТАСС было опубликовано в «Правде» на следующий же день, но не представляло собой ничего особенного — материал стоял в одном ряду с другими. Видимо, советское правительство еще не до конца осознавало важность этого события. По контрасту с этим международный резонанс в тот же день поражает. Спутник оказался на первых полосах крупных зарубежных изданий. «New York Times» писала: «Советы запустили искусственный спутник...».

Кто-то тут же сочинил ехидное стихотворение:

*О маленький Спутник, летящий высоко,
С московским сигналом «бип-бип»,
Расскажи всему миру о том, что это небо
теперь принадлежит Коммунистам,
А дядюшка Сэм все проспал...*

Но американские коллеги (впрочем, тогда еще их так не называли), конечно, не спали, они тоже работали, и весьма серьезно. В США было некое соревнование между армией и военным флотом,

Общество по распространению политических и научных знаний РСФСР
Московский Дом научно-технической пропаганды
имени Ф. Э. Дзержинского
Москва, Цирк, ул. Карла, 7

10
МАРТА

ВОСКРЕСНОЕ ЧТЕНИЕ

10
МАРТА

**ЗНАЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ
ЗЕМЛИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ
ПРЕДСТОЯЩЕГО МЕЖДУНАРОДНОГО
ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ГОДА**

(Проводится совместно с секцией астрономии Центрального аэроклуба СССР)

С сообщениями выступают:

<p>1. Председатель секции астрономии Н. А. БАРБАРОВ Проблемы, подлежащие исследованию атмосферы Земли и космического пространства</p> <p>2. Заместитель председателя секции, доктор филозофических наук, профессор В. В. ДОБРОВАЛОВ Теоретические основы создания искусственных спутников Земли</p>	<p>3. Председатель Научно-технического комитета по реактивной технике, конструктор И. А. МЕРКУЛОВ Способы запуска и принципиальная конструкция искусственных спутников Земли</p> <p>4. Председатель Научно-технического комитета по космической медицине, кандидат биологических наук П. К. ИСАКОВ Условия пребывания подопытных животных на искусственных спутниках Земли</p>
---	--

Демонстрация научно-популярных кинофильмов

Вход свободный Начало в 12 час. Справки по телефонам: БФ-10-07 и К 5-93-13

Афиша популярной лекции в Московском доме научно-технической пропаганды 10 марта 1957 г.

делалось реально два аппарата, и после успеха СССР фактически приоритет был отдан проекту, который вел Вернер фон Браун, чего изначально американское правительство не очень хотело.

Полет второго спутника Земли, отправленного в космос через месяц после первого, уже активно освещался в газетах. Правительство быстро поняло громадную пропагандистскую роль исследований космоса, и последующие годы стали «золотыми» для космической науки, когда нашим предшественникам не было отказа в финансах, лишь бы они могли двигаться вперед.

Второй спутник тоже стал знаменитым — на нем в космос была отправлена собака Лайка. Она оказалась первым живым существом в космосе: многочисленные запуски с собаками и другими животными, проводившиеся до этого, выполнялись на геофизических ракетах, которые возвращались на Землю. Так начинались космические медицина и биология.

Академия наук подключилась к космической тематике практически с самого начала. Выше уже говорилось про подготовку приборов для третьего спутника; материалы, которые предоставили первые два, анализировали ученые Академии. Подписи на документах ставят Келдыш, Королев и Александр Николаевич Несмеянов — тогда президент Академии.

В мае 1958 г. отправился в полет третий спутник — тот самый, который должен был лететь первым. Это уже серьезный научный аппарат с большим количеством научных приборов. Примерно тогда же, но чуть раньше (31 января 1958 г.), наши американские коллеги запустили свой первый спутник — «Explorer-1», его конструктором был Джеймс Ван Аллен. Первое, что удалось сделать, — и это стало огромным успехом космической науки, который наши коллеги, а тогда соперники активно пропагандировали, — были обнаружены радиационные пояса Земли, области, где захватываются заряженные частицы с очень высокими энергиями. С этого результата и началась эпоха «великих космических открытий».

А спутник стал частью повседневной жизни, важной частью культуры. Проводились научные чтения, посвященные науке на первых космических аппаратах; множество людей выходило на улицы, чтобы понаблюдать за тем, как небо прочерчивает маленькая рукотворная звездочка. Само слово «спутник» стало жить своей жизнью и превратилось в имя нарицательное, без изменений вошло во многие языки. В английском языке на его основе появилось много новых слов. Так, например, космические аппараты, запуск которых окончился неудачей, стали именоваться *flor-nik* и *karut-nik*. Далеко не все неологизмы действительно стали употребляться широко, но есть один пример, который сегодня стал историей литературы, — это слово «битник». Оно было придумано журналистом Гербом Каеном в статье в «San

Francisco Chronicle» от 2 апреля 1958 г. Он добавил русский суффикс «-ник» к английскому выражению «поколение бита» (Beat Generation), чтобы назвать ту часть молодежи, которая в целом вела себя асоциально и не принимала традиционных культурных ценностей США.

Хронологию дальнейших запусков можно проследить по многим источникам: практически сразу же начались полеты к Луне, конструкторы стали прорабатывать экспедиции на Марс и Венеру, физики задумались над исследованием околоземного пространства; полным ходом пошла подготовка к первому пилотируемому запуску, триумфом стал полет Белки и Стрелки — первых живых существ, вернувшихся из космоса на Землю. Параллельно руководители и ракетной промышленности, и Академии задумались над организацией космических исследований. 5 мая 1963 г. в своем письме в «директивные органы» Келдыш, уже президент Академии наук СССР, выдвигает предложение о создании в ее системе Объединенного института космических исследований, основной задачей которого стало бы систематическое исследование космического пространства. Спустя два года, 15 мая 1965 г., Постановлением Совета министров СССР создается Институт космических исследований АН СССР. Еще годом ранее был создан Институт медико-биологических проблем, тоже в составе Академии наук, — головная организация по медицинскому обеспечению космических полетов, биологическим экспериментам в космосе. Разворачивались большие космические программы, которые предусматривали систематическое исследование космоса (а вернее, разных объектов и явлений), так что довольно скоро космическая наука превратилась в то, что мы понимаем под ней сегодня: целый «букет» или «куст» направлений, в развитии которых участвует не только физика, но и химия, геология, биология, математика, вычислительные науки. А наблюдения в космосе, в свою очередь, стали для этих дисциплин источником новых открытий, которых, находясь на Земле, мы бы не сделали.

Все краски Вселенной

На знаменитой гравюре, впервые опубликованной в труде Фламариона, изображен средневековый монах, который пробивает головой небесный свод и видит совершенно другое небо и другую Землю. Именно такую роль для нас сыграл первый спутник. Благодаря ему мы получили новое представление о космосе.

В каждом диапазоне электромагнитного излучения, от радио- до гамма-лучей, есть свои интересные процессы. Очень важно взглянуть на Вселенную во всем этом спектре. Но до запусков космических аппаратов мы не могли это сделать, поскольку атмосфера и ионосфера задерживает



Гравюра из труда К.Фламариона «Атмосфера: популярная метеорология» (1888).

практически все излучения, приходящие из космоса (что, безусловно, замечательно для жителей Земли). В полной мере нам доступен только видимый и частично — радиоволновой диапазон.

Это же касается и заряженных частиц — магнитное поле Земли очень сильно влияет на их распространение. Благоприятное обстоятельство с точки зрения живых организмов, потому что такие частицы высоких энергий для нас опасны, но разочаровывающее для науки: огромный комплекс явлений выпадает из поля зрения ученых на Земле.

После выхода в космос открытия посыпались как из рога изобилия. Многие из того, что было теоретически предсказано, удалось «пощупать» (как это было с радиационными поясами Земли или потоками солнечного ветра). С другой стороны, были неожиданности — самой «громкой» из них, вероятно, стало открытие в конце XX в. темной энергии. Постепенно человек приспособился к достаточно длительному пребыванию в космосе. Юрий Гагарин сделал в космосе один виток вокруг планеты, а недавно из экспедиции вернулись космонавты, которые провели на орбите уже почти полтора года. Космос в целом враждебен человеку, но усилиями медиков удалось нейтрализовать негативное влияние космической среды, по крайней мере на околоземной орбите. Одновременно стало понятно, сколь сильно само наше существование связано не только с родной планетой, но и с космическим пространством: начиная от приспособленности человека к многочисленным циклам солнечной активности и заканчивая гипотезой о том, что вся вода или часть ее была принесена на Землю кометами.

Даже краткий обзор всех важных результатов, достигнутых за 60 лет космической эры, займет весьма толстую книгу. Поэтому в дальнейшем изложении, безусловно, будут большие пропуски. Но цель его более скромная. С одной стороны, я

хочу показать, насколько повлияла космическая техника на наши представления о мире; с другой — представить те вопросы и задачи, которые научное сообщество ставит перед собой сегодня.

Что касается исследований в разных диапазонах спектра, то самый простой пример здесь — Солнце. Если посмотреть на него в оптических длинах волн, то мы видим в целом довольно спокойную картину, которую лишь иногда «омрачают» пятна и протуберанцы. Но совершенно по-иному наше светило выглядит в радио-, рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах: мы увидим множество активных областей, вспышек и других явлений, отражающих бурные процессы на поверхности звезды.

То же происходит и с наблюдениями других звезд и галактик: если использовать только оптические и радиотелескопы, не удастся увидеть, в каких именно процессах происходит основное энерговыделение.

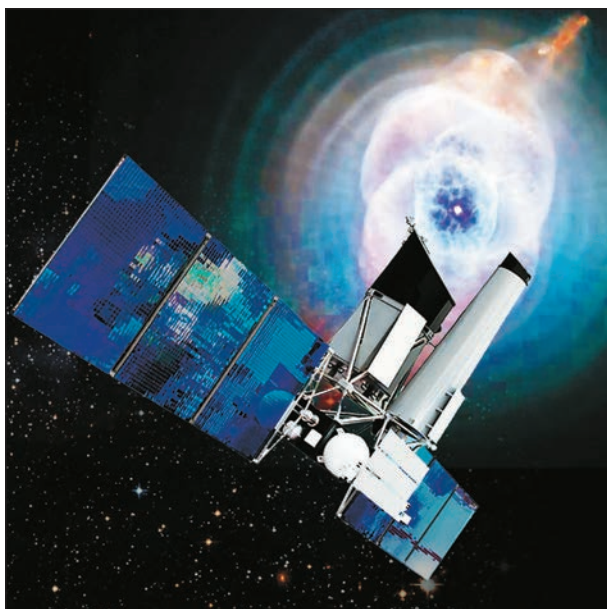
В космической программе России есть целый комплекс аппаратов под названием «Спектр», которые предназначены для изучения Вселенной в разных диапазонах.

Самый первый спутник из серии — «Спектр-Р» (или «Радиоастрон») — был успешно выведен в космос в 2011 г. Он проводит исследования в радиодиапазоне — казалось бы, в «обычном», земном, участке спектра, — но космическая техника позволила рекордно увеличить базу для работы в режиме интерферометра и, как следствие, — угловое разрешение (длина базы, когда аппарат максимально удален от нашей планеты, сравнима с расстоянием до Луны; такого на Земле достичь невозможно).



Аппарат «Спектр-Р» в НПО имени С.А.Лавочкина.

Фотография предоставлена НПО имени С.А.Лавочкина и Астрокосмическим центром Физического института имени П.Н.Лебедева РАН



Космический аппарат «Спектр-РГ».

Следующий космический аппарат — «Спектр-Рентген-Гамма» (запуск 2019 г.), который будет проводить обзор Вселенной в рентгеновском и гамма-диапазонах. Главные цели проекта — найти все достаточно массивные скопления галактик в наблюдаемой Вселенной, а также активные сверхмассивные черные дыры в ядрах далеких галактик. Благодаря этому будут исследованы процессы эволюции Вселенной и та роль, которую играла в ней темная энергия (ее действие можно наблюдать именно по распределению массы).

Наконец, международная космическая обсерватория «Спектр-УФ» (или «Всемирная космическая обсерватория — Ультрафиолет») будет работать в ультрафиолетовом диапазоне (запуск планируется в 2022–2023 гг.). В частности, так можно наблюдать физические процессы на молодых горячих звездах, физику формирования звезд и звездных скоплений.

Множественность (не)обитаемых миров?

Настоящему исследователю, разумеется, всегда хочется перейти от дистанционных наблюдений к непосредственным экспериментам. Пока мы не можем долететь до далеких и даже близких звезд (кроме, конечно, Солнца), но совершенно новые миры открываются и в нашей Солнечной системе. Эксперименты *in situ* (т.е. «на месте» — лат.) очень сильно изменили наши представления о том, как образовывались планеты у нашего светила и что происходило с ними на протяжении нескольких миллиардов лет существования Солнечной системы.

Начать следует с самой близкой планеты, фактически нашего первого естественного спутни-

ка — Луны. Полеты на Луну стали следующим объектом космической гонки после запуска первого космического аппарата и первого пилотируемого полета. Множество советских и американских аппаратов исследовали ее, и каждая страна многого добилась. Советский Союз первым провел фотосъемку обратной стороны земного спутника, осуществил три успешных доставки грунта с него, отправил на его поверхность два успешно и подолгу проработавших автоматических лунохода. У США состоялось шесть пилотируемых миссий на Луну в рамках знаменитой программы «Аполлон», провозглашенной президентом Джоном Кеннеди. Ирония для ученых состоит в том, что успех «Аполлонов» и доставки грунта исчерпали интерес к Луне политиков, в результате чего гонка была завершена, а с ней и запуски исследовательских аппаратов к Луне. Интерес к нашему спутнику надолго угас, внимание перешло на изучение околоземного пространства и пилотируемые полеты, где огромным достижением стала работа станции «Мир», которая во многом определила и сегодняшний успех Международной космической станции (МКС).

Но вернемся к Луне. В начале XXI в. интерес к ней снова вспыхнул, и это было связано с исследованиями аппаратов «Lunar Prospector» (США) и позднее «Chandrayaan» (Индия), которые показали, что поверхность нашего спутника не везде одинаковая: полярные области сильно отличаются от экваториальных областей. Подобное, в принципе, характерно для всех планет, но в полярных областях Луны было обнаружено присутствие водяного льда под поверхностью — а этого уже не ожидали; скорее, бытовало представление, что Луна должна быть совершенно «сухой». Позже наличие воды подтвердили исследования с борта американского аппарата «Lunar Reconnaissance Orbiter», на котором установлен российский нейтронный телескоп ЛЕНД. Именно он исследовал распределение водорода в верхнем слое лунного грунта и показал, что в отдельных местах доля воды по массе может достигать нескольких процентов.

Есть несколько моделей, объясняющих присутствие на Луне льда. Одна из них связывает его с активной бомбардировкой поверхности кометами, ядра которых, как в «холодильнике», сохранились в затененных кратерах на полюсах, куда не попадает свет Солнца. Это может быть интересным, поскольку такой лед способен сохранить предбиологические соединения, если они присутствуют в кометах.

Российская лунная программа в том виде, в котором она существует сейчас, нацелена на изучение именно полярных областей нашей космической соседки. Сейчас идет работа над посадочными аппаратами «Луна-25 и -27» («отсчет» идет от «Луны-24», последнего проекта советской лунной программы, доставившего на Землю лунный реголит в 1976 г.). «Луна-26» — орбитальный аппарат.



Орбитальная и посадочная станции, входящие в современную лунную программу России: «Луна-26» и «Луна-28». Последняя предназначена для криогенного забора образцов грунта Луны и их доставки на Землю.

Следующая задача, которая ставится, — доставка грунта из полярных областей земного спутника. Однако при этом важен не столько сам грунт, сколько летучие компоненты, присутствующие в нем, и сложной технической задачей становится их доставка на Землю в «нетронутом» виде.

Обсуждается также проект окололунной пилотируемой станции, которая могла бы стать прелюдией перед полномасштабным освоением спутника как полигона для исследовательских, а может быть, и каких-то технологических целей.

Россия в этих планах не одинока. До 2023 г. космические аппараты на наш спутник планируют отправить Индия, Китай, Южная Корея. Заинтересованы в исследовании и освоении Луны Европа, Япония и США.

Вторая планета Солнечной системы, которая представляет гипотетический интерес для освоения, хотя и в гораздо более далекой перспективе, — Марс. К сожалению, науке все еще не известно, есть ли жизнь на Марсе. Попытки поиска жизни прошлых лет, как мы сейчас понимаем, были обречены на неудачу, поскольку методы исследования не были достаточно чувствительными. Тем не менее некоторые обнадеживающие факты удалось обнаружить.

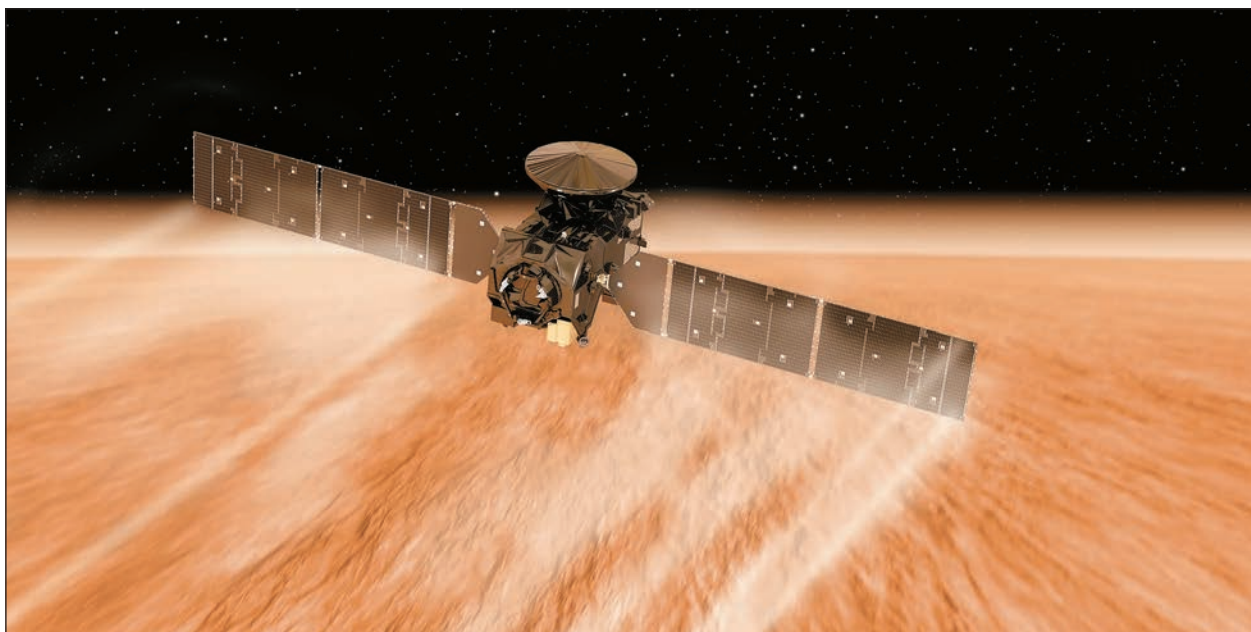
Уже более десятилетия назад на Марсе — и в полярных, и в экваториальных областях под поверхностью — была найдена вода (вернее, водяной лед). Но самое интересное открытие последних двух десятилетий — в атмосфере Марса есть метан. Как известно, этот газ довольно быстро — за несколько сотен лет — разлагается под действием ультрафиолета. Поэтому можно сделать вы-

вод, что его запас в атмосфере должен каким-то образом пополняться. Одна из очень заманчивых гипотез, объясняющих это несоответствие, — биологическая активность. Чтобы понять феномен, сейчас реализуется совместный российско-европейский проект «ЭкзоМарс», который включает несколько космических аппаратов. Первый из них — орбитальный зонд «Trace Gas Orbiter» (TGO) — был запущен в марте прошлого года, он успешно вышел на расчетную орбиту вокруг Марса и в настоящее время (до весны следующего года) находится в процессе выхода на рабочую низкую круговую орбиту. После этого он начнет первые исследования атмосферы.

Уже во время перелета приборы TGO проводили некоторые измерения, и первые результаты касаются набранной дозы радиации. Эти измерения проводил модуль «Люлин-МО» (Болгария и Россия) в составе нейтронного спектрометра ФРЕНД. Такие данные очень важны, поскольку космическая радиация — одна из основных угроз для пилотируемого полета на Марс.

Для второго этапа миссии в ИКИ РАН и в НПО имени С.А.Лавочкина готовится большая посадочная платформа с многочисленными научными приборами. Она доставит на планету марсоход, который делает Европейское космическое агентство, а затем начнет работать как автономная научная станция.

«ЭкзоМарс» рассчитан на период примерно до 2022–2023 гг., возможно, аппараты смогут проработать и дольше. Но уже сейчас мы думаем о продолжении этих исследований, и в частности возврате к Фобосу. Это малое тело Солнечной систе-



Аппарат «Trace Gas Orbiter» проекта «ЭкзоМарс-2016». Сейчас он находится у Марса в стадии торможения с помощью атмосферы, с целью выйти на круговую рабочую орбиту.

мы, спутник Марса, интересно прежде всего тем, что его вещество представляет собой «первородное вещество» Солнечной системы, не претерпевшее экзогенных изменений со времени появления планет. К сожалению, предыдущие миссии к Фобосу не дали результатов в этом отношении, хотя космический аппарат «Фобос-2», отправленный к Марсу в 1988 г., успел провести довольно интересные орбитальные измерения.

Венчать же это направление марсианских исследований должен проект по доставке грунта с Марса. Эта задача гораздо сложнее, чем доставка вещества Луны, из-за относительно большой массы Марса. Здесь не обойтись одним аппаратом — необходима перегрузка грунта на орбите. Вокруг этого проекта уже собирается большая международная кооперация, в которой Россия также предполагает участвовать.

Наконец, планета, которую часто называют сестрой Земли, — Венера. Она почти одинакового размера с Землей, имеет очень похожее внутреннее строение. До начала космической эры часто, и особенно в фантастической литературе (вспомним «Прыжок в ничто» А. Беляева или «Страну багровых туч» братьев Стругацких), ее представляли как вариацию на тему ранней Земли с непроходимыми джунглями и разнообразной живностью. Но действительность оказалась совсем другой. На Венере возник самораскачавшийся парниковый эффект, давление достигло почти 100 атм, температура поверхности почти 700 К, т.е. перед нами в буквальном смысле слова раскаленный ад.

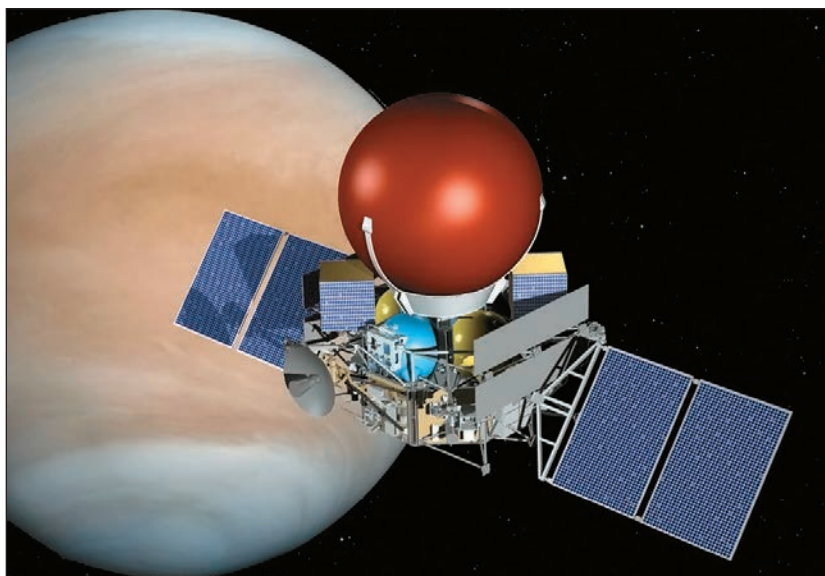
И тем не менее этот ад очень интересен для исследований. Во-первых, важно понять, говоря не-

сколько грубовато, как Венера «дошла до жизни такой» — почему парниковый эффект (который, кстати, действует и на Земле и благодаря которому температура на нашей планете в целом комфортна для жизни) на соседней с нами планете достиг таких невероятных масштабов. Во-вторых, интересно, что происходило и происходит внутри Венеры — как устроена эта планета и почему у нее, как и у Марса, нет магнитного поля. Наконец, понимание того, как работает «климатическая машина» Венеры (равно и как Марса), важно, чтобы понять, как устроена несравненно более сложная климатическая машина Земли.

Сейчас Венеру изучает японский орбитальный аппарат «Akatsuki», а совсем недавно на орбите вокруг планеты работал европейский зонд «Венера-Экспресс», на котором были установлены и российские приборы.

Но Венера, в отличие от Марса, обладает очень плотной атмосферой и толстым облачным слоем, поэтому исследования с орбиты нацелены в большей степени на загадки атмосферы. Понять же детально, что происходит на планете, можно только с помощью посадочных аппаратов или аэростатных зондов либо других более или менее долгоживущих аппаратов.

Венера интересует не только нас, но и исследователей из США, и относительно недавно была создана рабочая группа российских и американских ученых для обсуждения совместных интересов по исследованию Венеры. За основу взят российский проект посадочной станции «Венера-Д», которая должна продолжить успешную серию советских экспедиций к Венере. Были предложения по вклю-



«Венера-Д» у Венеры — возможный облик аппарата.

чению в него орбитального и посадочного аппаратов, возможно добавление аэростатов или атмосферных платформ, которые смогут довольно долго жить в плотной атмосфере Венеры (посадочный аппарат сможет работать все-таки в пределах нескольких часов). Это замечательный пример международного сотрудничества, пусть и в условиях непростой политической обстановки.

В последние десятилетия большое внимание обращалось на исследование малых тел Солнечной системы — в первую очередь астероидов, но также и комет. Огромный успех имел недавний проект Европейского космического агентства «Розетта» по исследованию кометы Чурюмова—Герасименко. Сама миссия названа в честь розеттского камня: так же, как он послужил для Шампольона ключом для расшифровки египетских иероглифов, она должна была стать для ученых ключом к пониманию зарождения жизни.

Получилось ли это, пока судить сложно, но очевидно, что результаты двухлетнего исследования (2014–2016) дали для науки очень и очень много. Например, стало понятно, что комета Чурюмова—Герасименко пришла к нам из весьма близких областей, тогда как комета Галлея, которую в 1986 г. исследовали, в частности, советские аппараты «Вега», — из гораздо более далекого облака Оорта, само существование которого пока представляется гипотезой, хотя и весьма обоснованной. Ключ к пониманию этого дало сравнение состава комет, в особенности соотношение дейтерия и водорода.

В космических исследованиях последних лет не были забыты и Меркурий, и планеты-гиганты Юпитер и Сатурн, а также их спутники, каждый из которых представляет собой отдельный мир. Философский вопрос, который можно задать сейчас, — какое новое знание в итоге мы получили?

В прошлом представления о зоне возможной обитаемости — т.е. зоне, где энергии Солнца достаточно, чтобы было возможно существование воды в жидком состоянии и могла зародиться жизнь, — были довольно скромны. Фактически туда входили только Земля и частично Марс. Но благодаря новым данным стало известно, что на спутниках планет-гигантов тоже существует жидкая вода, которую в этом состоянии поддерживает нагрев за счет приливных сил, так что зона обитаемости может простираться и за пределы земной орбиты. Океаны жидкой соленой воды открыли на трех галилеевых спутниках Юпитера и на Энцеладе — спутнике Сатурна. Условия там кажутся отнюдь не благо-

приятными для живых организмов, но даже на Земле бактерии существуют в местах, где, казалось бы, жизнь невозможна.

В связи с этим большое «брожение умов» вызывают открытия экзопланет. Сейчас их число достигает нескольких тысяч, и среди них уже довольно много похожих на Землю. Но ответить на вопрос, есть ли там жизнь, мы пока не можем. Тем не менее эта мечта может стать мощной движущей силой новых свершений.

Плазменная лаборатория в космосе

Возможность исследовать другие планеты — наверное, самый понятный из результатов, которые были получены благодаря первому спутнику. Однако космические исследования не заключаются только в планетологии, и если говорить о важнейших открытиях, то одним из них стало обнаружение магнитосферы Земли — той области, где поведение заряженных частиц контролируется магнитным полем нашей планеты. Это было сделано в самые первые годы космических исследований. Тогда же ученые поняли структурные особенности магнитосферы: наличие хвоста, границы (магнитной структуры, на которой останавливается солнечный ветер), ударной волны, тормозящей сверхзвуковой солнечный ветер, и др.

Концепция магнитосферы оказалась очень продуктивной, и позже выяснилось, что схожие (с учетом разных масштабов) магнитосферы есть у многих планет: у Меркурия, Сатурна, Юпитера — и не только у них, магнитосферы существуют и у далеких нейтронных звезд. Таким образом, исследуя околоземное пространство, можно получить представление о процессах, которые идут

у совсем других объектов. Если, говоря о планетах, мы имели в виду скорее «географические» открытия, то сейчас речь идет о физических — новых явлениях и процессах, которые сложно наблюдать где-либо еще.

Есть несколько фундаментальных процессов, которые исследованы в космосе, но важны также для плазмы в лаборатории и в термоядерных исследованиях. Это, например, токовые слои и пересоединение магнитного поля, бесстолкновительные ударные волны (этот термин был введен вторым директором ИКИ, академиком Роеальдом Зиннуровичем Сагдеевым), сильнейшие взаимодействия волн и частиц.

В последнее время стали активно изучаться феномены, связанные с проявлениями сильной нелинейности. Ранее более распространенной была квазинелинейная теория, которая включает слабую турбулентность, когда различные моды колебаний имеют разные фазы и слабо взаимодействуют между собой. Но взаимодействия между ними и эффекты оказались гораздо сильнее. Собственно, такая слабая турбулентность наблюдается довольно редко. Например, в магнитосфере внутри так называемых пограничных слоев на границе плазменного слоя возникают сильные нелинейные волны. Похожие структуры рождаются и в совсем другой области — внутренней магнитосфере, в ее радиационных поясах — уже за счет особенностей нелинейного взаимодействия частиц. Другими словами, исследования магнитосферы дают очень важные данные для нелинейной фундаментальной физики. Таким образом, космос постепенно становится настоящей лабораторией. Чем больше активных экспериментов мы будем проводить в ней, тем лучше поймем как принципиальные физические явления в плазме, так и взаимосвязи магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли и, в свою очередь, тем более изощренные физические опыты мы сможем там проводить.

Примером одного из таких активных экспериментов был советско-французский проект АРКАД (1971 г.). С о.Кергелен (территория Франции) пучки электронов запускались в магнитную трубку, второй конец которой «входил» в Землю около Архангельска, где и проводились наблюдения. Сейчас подобные работы планируется продолжать, но уже на новом уровне.

Интересное и отчасти парадоксальное положение вещей заключается в том, что такие исследования в космосе помогают решать и проблемы термоядерной энергетики. В частности, в космической среде большую роль играет пересоединение магнитных полей, когда силовые линии одного магнитного поля «соединяются» с силовыми линиями другого (например, полей солнечного ветра и Земли) и затем воссоединяются уже в иной комбинации. При этом качественно свойства пограничного слоя, возникающего на границе двух плазм, сходны со свойствами граничной области,

существующей при удержании горячей (в будущем термоядерной) плазмы в токамаке. В обеих системах создается сильный ток, текущий по плазме. Сравнение безразмерных параметров этих систем показывает: то, что наблюдается в космическом пространстве, близко к тем процессам, которые происходят в термоядерных установках. Именно такие безразмерные параметры важны для теории.

Если же говорить об эволюции космических экспериментов в магнитосфере, надо подчеркнуть, что во всем мире происходит переход от исследования больших масштабов ко все более и более мелким. В 1990-х годах были реализованы проекты «Geotail» (США) и многоспутниковый ИНТЕРБОЛ (международный проект, ведущая страна — Россия). В рамках второго в космос были выведены две пары спутник—субспутник, которые проводили исследования в авроральной и хвостовой областях магнитосферы, что дало ключ к пониманию многих глобальных плазменных процессов в системе Земля—Солнце.

Следующий этап развития относится к 2000-м годам. Совместный европейско-китайский проект «Cluster» (четыре аппарата) — «Double Star» (два аппарата) пытался изучать систему уже на более мелких, так называемых кинетических масштабах, определяющихся ларморовским радиусом ионов.

Самые новые достижения в этой области принадлежат американскому проекту «Magnetospheric Multiscale», или MMS (четыре аппарата), который исследует процессы уже на самых маленьких, электронных масштабах. И это очень важно, поскольку все явления, которые происходят в этой среде, мультимасштабны, но в лабораторных условиях на Земле далеко не всегда удастся изучить многие из них из-за конечного размера любых, даже самых маленьких измерительных зондов, помещаемых в лабораторную установку.

В помощь экспериментаторам приходят специалисты в области вычислительного моделирования. Сегодня магнитогидродинамическое моделирование достигло фантастических высот, оно может показать, например, все, что происходит от выброса корональной массы (солнечной плазмы) до его распространения в межпланетном пространстве и до процессов внутри магнитосферы Земли. Так мы переходим к тому уровню, который теперь называется космической погодой — это совокупность факторов, связанных с влиянием космического пространства на биологические и технологические системы Земли. Само понятие «космическая погода» возникло благодаря космическим исследованиям. С другой стороны, неблагоприятные «погодные условия» в космосе опасны в первую очередь для спутников и космонавтов на орбите, а в особо тяжелых случаях — и для электрических сетей, а также трубопроводов на Земле. Таким образом, эти исследования критически важны для поддержания нашей современной техносферы (особенно в полярных областях Земли).

Вместо заключения

Сегодня, в 2017 г., международная политическая ситуация очень далека от спокойной и даже просто стабильной. Еще более напряженной она была 60 лет назад: шла холодная война, которая в любой момент могла перейти в реальные боевые действия. Может быть, самое главное достижение первого спутника состоит в том, что он стал своего рода «громоотводом» напряжения между странами, превратил непримиримую вражду в соперничество между социалистической и капиталистической системами, а потом глобализировал саму проблему и перевел ее из плоскости только политической в область науки и техники, постепенно превратив в мирное соревнование. Таковым оно по сути остается и сегодня, несмотря на то, что все большую роль играет международное сотрудничество.

Американский историк Уолтер Мак-Дугал позже писал: «Запуск Спутника полностью изменил суть холодной войны». Цитата Келдыша: «Еще неизвестно, что имело большее значение для обороны страны: боевая межконтинентальная ракета или первый спутник».

Космос был и остается той сферой, где сотрудничество продолжается даже во времена охлаждения отношений. В 1975 г. был организован замечательный эксперимент стыковки советского и американского кораблей «Союз» и «Аполлон», историческим стало рукопожатие космонавта Алексея Леонова и астронавта Томаса Стаффорда. Космос оказался мостиком между враждующими странами. Можно сказать, что из этой стыковки позже вырос проект Международной космической станции, который имел и имеет огромное политическое значение.

В сентябре 2017 г. в Аделаиде на Международном астронавтическом конгрессе было подписано соглашение о создании на Луне космопорта «Dee Space Gateway», который станет шлюзом для изучения лунной поверхности и промежуточным этапом перед отправкой астронавтов на Марс. Переговоры велись между НАСА и ГК «Роскосмос», но это открытая площадка, где могут участвовать

и другие страны, в частности КНР. Я думаю, если объединить наши усилия по исследованию Луны автоматическими, а затем и пилотируемыми аппаратами, то уже к 2030-м гг. может начаться строительство международной астрофизической обсерватории на нашем спутнике.

...Тридцать лет назад, в 1987 г., при поддержке тогдашнего Генерального секретаря ЦК КПСС М.С.Горбачева, ИКИ РАН провел Международный форум «Сотрудничество в космосе во имя мира на Земле». Это было одно из замечательных событий перестройки, вдохновленное надеждой на новый этап развития космической деятельности и космической науки.

Последовавшие за ним десятилетия оказались для нашей страны и российской науки слишком тяжелыми, и год 1997 прошел без крупных научных событий. Но в 2007 г., в полувекковой юбилей первого спутника, Академия наук организовала и провела масштабный международный форум «Космос: наука и проблемы XXI века», в котором приняли участие выдающиеся ученые и инженеры, руководители ведущих космических агентств мира. И наконец, в прошедшем 2017 г. РАН и ГК «Роскосмос» снова организовали международный научный форум «Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий». Их инициаторами был ИКИ РАН, идею поддержали многие организации и вузы, связанные с исследованиями космоса.

Сегодня космические исследования стали мощным самостоятельным направлением науки, и очень важно регулярно проводить такие международные встречи ученых, чтобы понять, что было сделано и какие перспективы просматриваются впереди. Я выступаю с инициативой проводить раз в десятилетие такие форумы, подобные предшествовавшим (а может быть, уже в другом формате), которые станут своего рода вехами при анализе происходящего, а их материалы — вначале руководством к действию, а потом — историческими документами, фиксирующими развитие наших представлений о космосе. ■

**Материал подготовили
С.Е.Виноградова, О.В.Закутняя**

Sputnik: 60 years along the path of discoveries

L.M.Zelenyi

Space Research Institute, RAS (Moscow, Russia)

To mark the sixtieth anniversary of the beginning of Space Age the Russian Academy of Sciences and State Corporation "Roscosmos" held the International Forum "Sputnik: 60 Years Along the Path of Discoveries" on 3–4 October 2017. The text specially prepared for Priroda readers features the main points of the author's talk given at the opening of the Forum. How did an ambitious dream become true, how did Sputnik emerge as not only technological, but cultural phenomenon, what followed it and what kind of experiments are waiting for us in the future? A full text of the talk will be published in the Forum proceedings in 2018.

Keywords: Sputnik, space age, space exploration, space research, planetary research, Solar system, magnetosphere research, astrophysics, the Moon, Mars, Venus, international collaborations, space.

Плазменные двигатели и будущее космонавтики

М.В.Ковальчук¹, В.И.Ильгисонис¹, В.М.Кулыгин¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Россия)

Перспективы развития космонавтики напрямую связаны с развитием ракетных двигательных установок. Ожидаемый прогресс в этой области будет в значительной степени основан на имеющемся опыте эксплуатации плазменных ракетных двигателей и на результатах многолетних исследований по термоядерному синтезу и физике плазмы. Новые разработки позволяют рассчитывать на существенное увеличение тягово-энергетических характеристик таких двигателей по сравнению с традиционными электрореактивными двигателями.

Ключевые слова: электрореактивные двигатели, плазменные ракетные двигатели, плазменные потоки, резонансный нагрев.

Дальнейшие шаги в освоении космоса, в том числе расширение функциональных возможностей космических средств на околоземных орбитах, создание и регулярная эксплуатация лунных космических баз, масштабное изучение астероидов, планет и других тел Солнечной системы, а также зондирование дальнего космоса требуют, прежде всего, резкого увеличения возможностей и эффективности космических транспортных систем. В год 60-летия мировой космонавтики, днем рождения которой естественно считать 4 октября 1957 г. — дату успешного запуска первого искусственного спутника Земли, осуществленного в нашей стране, — полезно еще раз оглянуться на путь, пройденный за прошедшее время космонавтикой, и оценить перспективы и направления ее дальнейшего развития.

Приговор выносит Ы-формула

В безвоздушном пространстве космический аппарат может двигаться либо по инерции (в том числе под действием сил притяжения со стороны гравитирующих объектов), либо с использованием реактивных двигателей, т.е. жертвуя своей собственной массой. Как следует из школьного курса физики, для вывода на околоземную орбиту спутник необходимо разогнать как минимум до первой космической скорости в 7.9 км/с.

Начиная с первого спутника для запуска большинства космических кораблей (как пилотируемых, так и грузовых) в Советском Союзе, а затем и в Российской Федерации использовали ракету-носитель семейства Р-7 — так называемую «семерку». Первоначально ее спроектировали как двухступенчатую межконтинентальную баллистическую ракету, но позднее были разработаны различные

(в том числе трех- и даже четырехступенчатые — специально для космических задач) модификации «семерки», получившие разные собственные имена — «Спутник», «Восток», «Луна», «Восход», «Молния», многочисленные «Союзы». Эти ракеты, имевшие стартовый вес в диапазоне 260–315 т, могли вывести на околоземную орбиту аппараты массой 6–10 т. На старте у «семерки» параллельно включаются химические ракетные двигатели первой и второй ступеней на времена до 140 и 320 с соответственно, а затем, после их отделения, — двигатель третьей ступени еще примерно на 300 с. Стартовые параметры большинства других носителей, как отечественных, так и зарубежных, отличаются от этих лишь незначительно. Таким образом, искомая скорость (порядка первой космической) сообщается космическому аппарату за относительно короткое время и требует весьма и весьма значительной массы топлива, расходуемой на такой разгон.

Необходимость несоразмерно высокого отношения массы топлива и полезной нагрузки с очевидностью немедленно следует из нескольких хорошо известных формул. Движение космического летательного аппарата (КЛА) как объекта с переменной массой подчиняется уравнению Мещерского, где сила тяги пропорциональна скорости изменения массы объекта (секундному расходу топлива) и скорости, с которой это топливо покидает объект. Форма состояния рабочего тела, т.е. вещества, вылетающего из объекта, не важна — это могут быть раскаленные газы сгоревшего топлива, само топливо в жидком или газообразном виде, твердые тела и др. Значение имеют только скорость вылета рабочего тела из объекта (скорость истечения, приблизительно равная удельному импульсу — отношению создаваемого двигателем импульса к расходу топлива) и скорость потери объектом массы. Интегрирование уравнения Мещерского при постоянной скорости истечения дает формулу Циолковского, согласно которой ско-



Михаил Валентинович Ковальчук, член-корреспондент РАН, президент Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», руководитель межведомственной рабочей группы Совета при Президенте РФ по науке и образованию, декан физического факультета Санкт-Петербургского университета. Лауреат премий Правительства РФ в области науки и техники, в области образования, премии имени Е.С.Федорова РАН. Кавалер орденов «За заслуги перед Отечеством» III и IV степеней. Область научных интересов — кристаллография и кристаллофизика, физика конденсированного состояния, нанобиоорганические материалы и системы, применение рентгеновского, синхротронного излучения, нейтронов и электронов в материаловедении, ядерная медицина и ядерные технологии.



Виктор Игоревич Ильгисонис, доктор физико-математических наук, профессор, директор Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», заведующий кафедрой прикладной физики Российского университета дружбы народов. Специалист в области физики плазмы, магнитной гидродинамики, управляемого термоядерного синтеза.



Владимир Михайлович Кулыгин, кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя Отделения плазменных технологий Курчатовского комплекса физико-химических технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Занимается физикой плазмы и ее техническими и технологическими приложениями.

рость КЛА, стартовавшего с нулевой скоростью, пропорциональна скорости истечения с коэффициентом пропорциональности, равным логарифму отношения конечной и начальной масс КЛА. Из-за слабой логарифмической зависимости в формуле Циолковского достижение большой по сравнению с удельным импульсом скорости полета потребует весьма и весьма значительной массы топлива. Так, чтобы аппарат с массой 10 т приобрел первую космическую скорость при удельном импульсе 2.5–3 км/с, понадобится ракета с массой горючего примерно 150–250 т, что по порядку величины как раз соответствует основным параметрам «семерки» (иногда удельный импульс измеряют в секундах, деля исходную величину на ускорение свободного падения $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, хотя в этом слу-

чае более употребителен термин «удельная тяга»).

Повысить долю полезной массы ракеты и обеспечить возможность маневрирования при ограниченном расходе топлива можно, только увеличив удельный импульс. Простая термодинамика позволяет достаточно точно рассчитать его величину. Для адиабатического истечения раскаленных газов из ракеты несложные вычисления приводят к выражению, получившему неформальное название «Ы-формулы»*, в которую, помимо температуры в камере сгорания ракетного двигателя, входит еще отношение давлений газа на срезе сопла и собственно в камере. Как следует из «Ы-формулы», для увеличения удельного импульса нужно повышать рабочую температуру и использовать легкое топливо (в идеале — водород). При работе на химическом топливе температура определяется тепловыделением протекающих химических реакций, фиксированным для единицы массы топлива. Это ограничивает скорость истечения величиной не выше 4.5 км/с даже при работе на кислородно-водородном топливе (у «семерки» ее значения для двигателей разных ступеней лежат в диапазоне 2.5–3.2 км/с.

Куда и на чем летим?

Важность достижения высокой скорости истечения рабочего тела апологеты космических полетов

прекрасно понимали задолго до начала практического освоения космоса. Еще в 1911 г. в своей знаменитой статье [1] К.Э.Циолковский высказал идею создания реактивной тяги с использованием электрических сил: «Может быть, с помощью электричества можно будет со временем придавать громадную скорость выбрасываемым из реактивного прибора частицам. И сейчас известно, что катод-

* Не имевшая собственного имени формула для удельного импульса ракетного двигателя с соплом Лаваля получила свое название по кинофильму «Операция «Ы» и другие приключения Шурика» (реж. Л.Гайдай), в одной из новелл которого студенты перед экзаменом выводят именно эту формулу. Сцена фильма отражает всеобщее увлечение космосом в начале 60-х годов XX в.

ные лучи в трубке Крукса, как и лучи радия, сопровождаются потоком электронов, масса которых, как мы говорили, в 4000 раз (на самом деле в 7372. — *Прим. авт.*) меньше массы гелия, а скорость достигает 30–100 тыс. км/с, т.е. она в 6–20 тыс. раз больше скорости обыкновенных продуктов горения, вытекающих из нашей реактивной трубы».

Иллюстрируя роль скорости истечения в космическом полете, изобретатель стационарных плазменных двигателей А.И.Морозов приводит в своей статье, посвященной разработке идеологии этих устройств [2], пример полета на Луну с посадкой и возвращением на Землю. При использовании американской ракеты-носителя «Сатурн-5», которая и по сей день остается самой грузоподъемной, мощной, тяжелой и большой из успешно летавших ракет, стартовая масса комплекса составляла 2900 т (с учетом многоступенчатости), а на Землю возвращался командный блок массой всего 5.5 т. Таким образом, совершенно очевидно, что для более дальних полетов необходимо увеличивать удельный импульс ракетных двигателей.

Ясно, что современные задачи, стоящие перед космической отраслью, — длительное крейсерование на околоземных орбитах, периодическое изменение плоскости орбиты, налаживание эксплуатации «парома» Земля—Луна, а также реальное освоение дальнего космоса — требуют экономии выбрасываемой массы и, следовательно, существенного увеличения скорости истечения, которое выходит за рамки возможностей химического топлива. Для полетов в далекие области Солнечной системы, например к внешним планетам, требуется разгон КЛА до 35–70 км/с. На долю топлива в такой ракете придется отвести более 99% стартовой массы, т.е. для полезной нагрузки места практически не останется.

Помимо высокого удельного импульса двигателя, предназначенные для межпланетных полетов, должны обеспечивать тяговые и мощностные характеристики, необходимые для решения стратегических задач космической экспансии в разумное время. Распространенные ориентировочные оценки требуемой мощности перспективных двигательных систем приведены на рис.1.

Используемые в настоящее время ракетные двигатели работают на химическом топливе. Лишь небольшие конструктивные усовершенствования и доработки отличают их от двигателей, с которых человечество начало свое проникновение в космос. Они обладают колоссальной мощностью и могут развивать большую тягу, необходимую для выведения полезной нагрузки на орбиту — в выполнении этой функции им нет конкуренции в настоящее время. Так, тяга РД-107 (рабочего двигателя «семерки») составляет 814 кН на ур.м. и 1 МН в космическом вакууме; близкие параметры и у американского J-2. Рекордсменами же среди летавших жидкостных ракетных двигателей являются российский РД-171 с тягой 7.26 МН на ур.м.

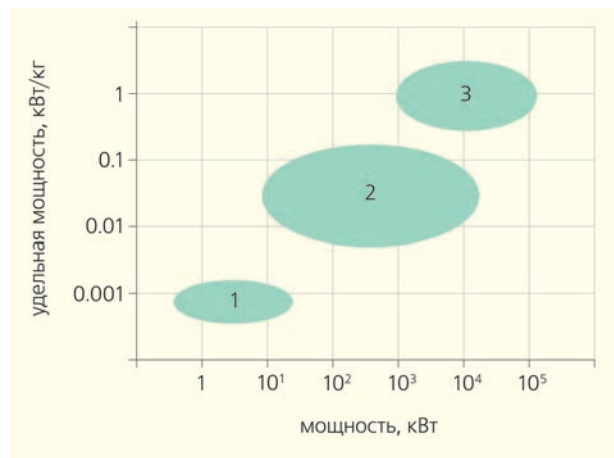


Рис.1. Требования к параметрам двигательной системы в соответствии с миссией КЛА. Аппараты и задачи: 1 — современные спутниковые системы, связь, наблюдение; 2 — межорбитальные буксиры, создание лунной базы, астероидный контроль, глобальные системы связи и контроля; 3 — дальние грузовые и пилотируемые полеты, зондирование дальнего космоса.

(7.91 МН в вакууме) и американский гигант F-1 с «Сатурна» с тягой у поверхности земли 6.77 МН (7.75 МН в вакууме). Такие двигатели способны быстро разогнать даже тяжелую ракету, но расходуют при этом огромное количество топлива, поскольку скорость истечения у лучших кислородно-водородных двигателей, как уже отмечалось выше, не превышает нескольких километров в секунду.

Альтернативой классическим ракетным двигателям, причем альтернативой реальной, проверенной на практике, могли бы стать различные электрореактивные двигатели (ЭРД), работы над которыми зачастую велись параллельно с работами над химическими двигателями и которые характеризуются значительно более высокими значениями удельного импульса. К категории ЭРД принято относить самые разнообразные конструкции, использующие для ускорения рабочего тела ракетного двигателя электричество. Их наиболее привлекательные схемы рассмотрены ниже.

Высокий удельный импульс достигим

29 декабря 1971 г. со стартовой площадки космодрома «Плесецк» был произведен пуск ракеты, выведшей на околоземную орбиту метеорологический спутник «Метеор-1-10». Это был обычный спутник, укомплектованный стандартной для метеорологических измерений телевизионной, инфракрасной и актинометрической аппаратурой; отличалась лишь высота его орбиты, составлявшая примерно 890 км против обычных 600–700 км для предыдущих «Метеоров». Главной его особенностью был плазменный двигатель Эол-1, впервые ус-

тановленный на спутник для проведения летных испытаний. После тестового включения на несколько минут, в течение которых Эол-1, названный в честь мифического полубога — повелителя ветров, продемонстрировал соответствие рабочих параметров плановым характеристикам, двигатель проработал более 170 ч, обеспечив подъем орбиты «Метеора» на 16,5 км.

Это событие, при всей его кажущейся неприемлемости, относится к числу важнейших достижений отечественной космонавтики, поскольку оно доказало возможность практического использования ЭРД в космосе. Справедливости ради отметим, что в 1964 и в 1970 гг. НАСА осуществило продолжительное тестирование работоспособности ЭРД несколько иной разновидности, так называемых ионных двигателей, первый из которых создал Г.Кауфман, в суборбитальном и космическом полетах (миссии SERT I и SERT II), однако переход к реальному использованию таких двигателей пришелся лишь на 1990-е годы.

Отличия в принципах работы ионных и плазменных двигателей мы рассмотрим ниже. Здесь нам важно лишь то, что и те и другие продемонстрировали способность обеспечивать удельный импульс на уровне 10–70 км/с.

Основными недостатками существующих ЭРД остаются небольшая мощность (100 Вт — 50 кВт) и невысокие тяговые характеристики (5–500 мН). Двигатель с тягой 10 мН на велосипеде будет разгонять его до обычной скорости ~30 км/ч около суток, а при тяге 100 мН — более двух часов, и то лишь в отсутствие какого-либо сопротивления движению! Но нет худа без добра: малая тяга снимает необходимость сверхточного расчета продолжительности работы двигателя для придания аппарату нужного импульса. Поэтому существующие ЭРД широко используются как рулевые и корректирующие.

В космосе сопротивление практически отсутствует, и, если двигатель способен работать долго, достижение требуемых высоких скоростей принципиально возможно. Так, автоматическая межпланетная станция «Dawn», запущенная НАСА 27 сентября 2007 г. для исследования астероида Веста и карликовой планеты Церера, была оснащена ионными двигателями с тягой всего 30 мН и с удельным импульсом 30,4 км/с. В качестве рабочего тела использовался ксенон, запас которого на борту аппарата был всего 425 кг. В середине 2011 г. станция достигла Весты и зондировала ее около года, а в марте 2015 г., преодолев 4,9 млрд км, была захвачена гравитационным полем Цереры, после чего ионные двигатели были успешно использованы для спуска на рабочую орбиту, последующих маневров и неоднократных изменений орбиты. Двигателей было три, хотя энергетики «Dawn» хватало на работу лишь одного из них — остальные служили страховочными, на случай сбоев, связанных в основном с попаданием

в работающее устройство космических частиц и с электрическими пробоями. Однако сбоев системы управления оказалось значительно больше; в этих случаях выручала перезагрузка системы.

Этих примеров вполне достаточно, чтобы заключить: космические ЭРД в XXI в. — не экзотика, они действительно способны обеспечить высокий удельный импульс. Совершенствование и оптимизация конструкций ЭРД наряду с повышением их тягово-мощностных характеристик сегодня представляется наиболее обоснованным путем развития ракетных двигательных систем.

Плазма как рабочее тело

Чтобы реализовать принцип реактивного движения, необходим источник энергии для ускорения выбрасываемого из ракеты рабочего тела. Такой источник может скрываться в самом рабочем теле (рис.2,а), как в случае химического топлива, но может быть и внешним (рис.2,б).

Если в качестве внешнего источника используется источник электроэнергии, ракетный двигатель относят к категории ЭРД независимо от способа ввода этой энергии в рабочее тело. Поэтому популяция ЭРД весьма многочисленна и включает множество разновидностей. Например, можно нагревать рабочее тело, пропуская через него ток, — так устроены электротермические и дуговые ЭРД (см. рис.2,б). Однако этот вариант малоэффективен и не обеспечивает высокие скорости истечения.

Ключевая идея заключается в переводе рабочего тела в состояние плазмы с последующим ускорением заряженных частиц. Способы такого ус-

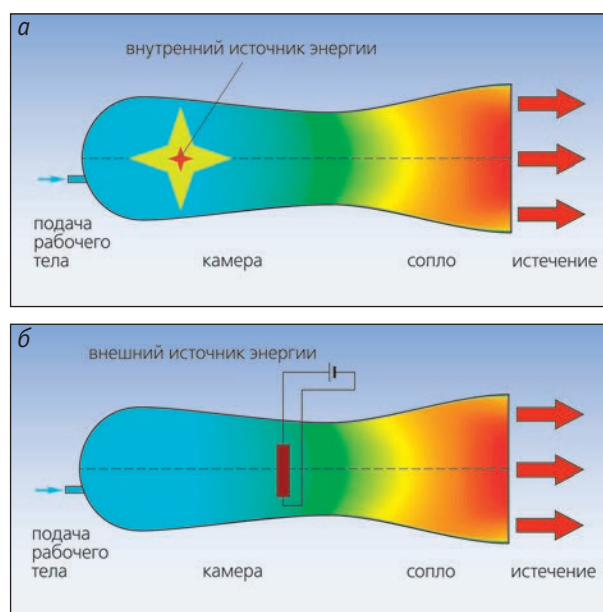


Рис.2. Схематическое изображение ракетного двигателя с внутренним источником энергии (а) и электротермического ЭРД (б).

корения также могут быть различны, по ним (и по методу нагрева) как раз и проводят внутреннюю классификацию ЭРД (рис.3). В принципе все ЭРД, в которых происходит ионизация рабочего тела и образование плазмы, могут быть отнесены к плазменным ракетным двигателям (ПРД), но на рис.3 такими называются ЭРД, обеспечивающие ускорение плазмы как целого, т.е. без разделения ее на различные составляющие — ионы и электроны.

Непосредственное ускорение заряженных частиц электрическим полем без обязательного нагрева рабочего тела — вот та «плодотворная дебютная идея», которая была реализована в плазменных двигателях, отнесенных на рис.3 к категории электростатических. Поясним разницу. Нагрев предусматривает сбалансированное поступление энергии во все степени свободы частиц вещества — атомов или молекул; при этом температура как мера нагрева характеризует среднюю кинетическую энергию хаотического движения частиц, находящихся в состоянии локального термодинамического равновесия. Для создания же реактивной тяги необходимо придать частицам направленный импульс, а энергия их движения в поперечных направлениях может быть невелика. Электростатические ЭРД основаны на том, что в статических электрическом и магнитном полях заряженные частицы на-

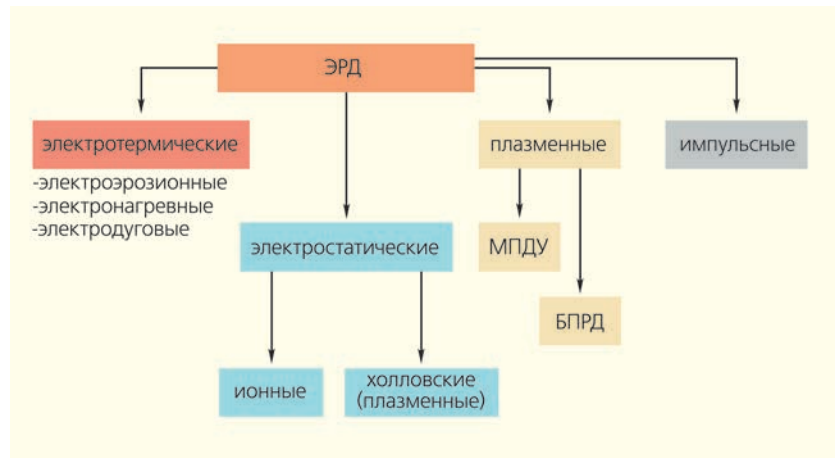


Рис.3. Возможная классификация ЭРД.

бирают энергию, когда движутся вдоль направления электрического поля.

Наиболее простым и естественным способом этот принцип реализуется в ионных двигателях — ионниках (рис.4). Положительные ионы, наиболее массивная компонента плазмы, ускоряются электростатическим полем конденсатора, пластины которого выполнены в виде сеток. Ионы образуются в области ионизации (возникающие при этом электроны уходят на специальные электроды-коллекторы) и поступают в объем конденсатора через сетчатый анод. Там они ускоряются электрическим полем и по инерции пролетают сквозь сетчатый катод. Такая система будет работать, если пролетевшие через катод ионы не вернуться на него обратно. Для этого в закатодное простран-

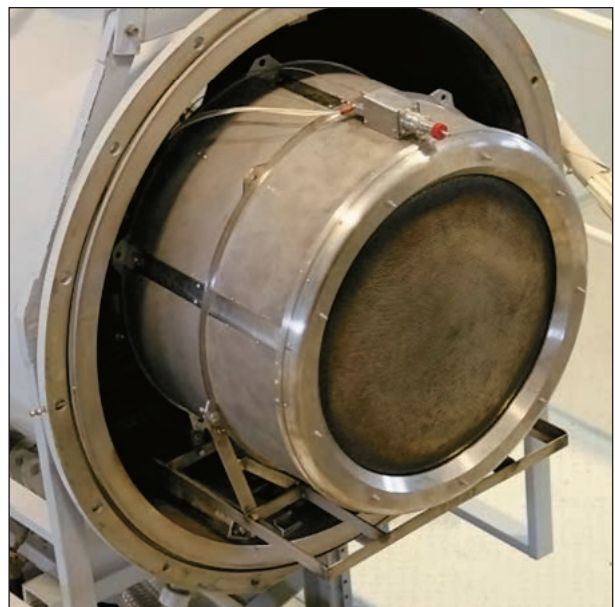
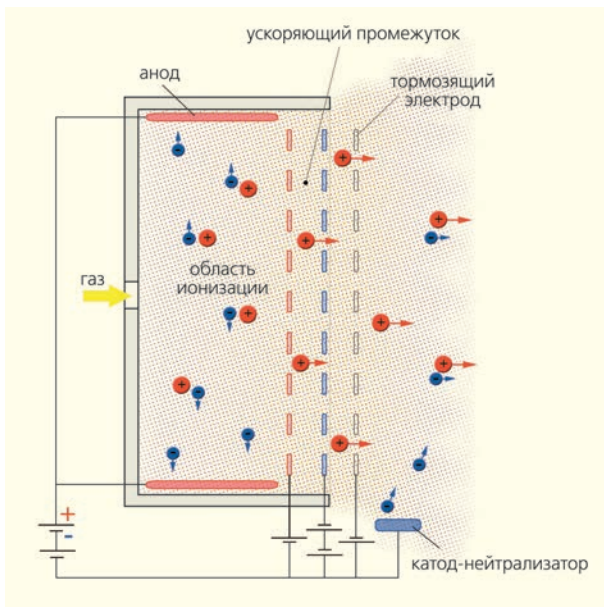


Рис.4. Принципиальная схема ионного двигателя и внешний вид ионного двигателя ИД-500 разработки Исследовательского центра имени М.В.Келдыша.

во инжектируется необходимое количество электронов, обеспечивающее электрическую нейтральность вытекающей из двигателя плазмы.

Способ ионизации не критичен для работы ионника: для ионизации могут быть использованы газовые разряды любого типа, обычный электродный или безэлектродный, под действием высокочастотного поля, соприкосновение с нагретой поверхностью (контактная ионизация), ультрафиолетовое или лазерное излучение, электронный пучок и др. Важны лишь энергозатраты на ионизацию, поскольку энергетическая цена иона — едва ли не самая существенная составляющая, влияющая на итоговую энергоэффективность ЭРД.

Именно исходя из желания минимизировать эти энергозатраты в качестве рабочего тела ионника часто выбирают ксенон. Последний имеет самый низкий потенциал ионизации (12.1 В) среди инертных газов и наименьшее отношение потенциала ионизации к атомному весу (0,387 В/а.е.). Лучшими характеристиками обладают только благородные, щелочные и некоторые другие металлы, но по сравнению с ними у ксенона имеются свои преимущества: химическая инертность, экологическая безвредность, коррозионная безопасность и др. При высоком давлении его можно хранить в жидком виде практически при комнатной температуре. Однако ксенон довольно дорог (более 2500 \$/кг): добывается он из воздуха, но его концентрация в атмосфере крайне невелика (в 1 м³ содержится всего лишь 0.08 мл ксенона). Мал (около 70 т в год) и объем мирового производства ксенона, хотя он несколько подрос за последние годы, что связано с новыми применениями данного газа — в источниках света и в медицине. Поэтому при крупномасштабном развитии техники ЭРД использование такого рабочего тела может служить определенным ограничением.

На сегодняшний день элементы конструкций ионных двигателей достаточно хорошо оптимизированы. Разработаны численные коды, детально рассчитывающие траектории ионов с учетом реальной геометрии и других особенностей различных ионников, что позволяет не только конструировать соответствующие ионно-оптические системы, но и определять скорость эрозии (прежде всего — ускоряющего электрода, основной лимитирующий фактор срока службы). Для качественного же повышения эксплуатационных характеристик ионников есть препятствия, связанные с самим принципом работы. В первую очередь это наличие объемного положительного заряда в ускоряющем промежутке. Такой заряд мешает проникновению новых ионов из зоны ионизации и, следовательно, повышению ионного тока. В физике плазмы хорошо известен закон трех вторых, или закон Ленгмюра, для вольт-амперной характеристики плазменного диода в режиме пространственного заряда. Однако сколько-нибудь зна-

чительное повышение рабочего тока устройства путем повышения напряжения в такой системе невозможно: диод переходит в режим насыщения, а в самом ускоряющем промежутке возможны пробой. По этой же причине малопродуктивны попытки заметно увеличить ионный поток, повышая концентрацию ионов в зоне ионизации. Каждый квадратный сантиметр апертуры ионника дает вклад в его тягу на уровне нескольких тысячных долей ньютона. Поэтому пока увеличение мощности и тяги ионной двигательной установки достигается простым увеличением либо диаметра двигателя, либо числа двигателей в установке.

Устранение объемного заряда, присутствие которого характерно для всех типов ионников, предусмотрено в конструкциях, получивших название «холловские двигатели». Компенсацию объемного заряда ионов можно осуществить электронами, ограничив их перемещение в пространстве посредством магнитного поля. Действительно, ситуация, когда ионы не замагничены и свободно ускоряются электрическим полем, а электроны «привязаны» к силовым линиям магнитного поля, вполне может быть реализована из-за большого различия в массах этих частиц (радиус поперечного вращения заряженной частицы в магнитном поле, называемый ларморовским, для электрона и иона с равной энергией отличается в корень квадратный из отношения масс). Относительно небольшое магнитное поле практически не воздействует на траекторию ионов, тогда как движение электронов поперек магнитных силовых линий имеет характер быстрого ларморовского вращения и относительно медленного дрейфа «ларморовских кружков». Последний приводит к электронному току в перпендикулярном по отношению к магнитному и электрическому полям направлении — разновидности известного эффекта Холла, что и дало название таким устройствам.

Данная идея, зародившаяся в Курчатовском институте, легла в основу двух разновидностей холловских двигателей — двигателя с анодным слоем (ДАС) и стационарного плазменного двигателя (СПД). Основное различие между ними состоит в размере ускоряющего промежутка с магнитным полем: в конструкциях ДАС, разрабатывавшихся А.В.Жариновым с сотрудниками — сначала в Курчатовском институте, затем в Центральном научно-исследовательском институте машиностроения (ЦНИИмаш) — ускорение происходит в относительно узком прианодном слое, а в СПД А.И.Морозова работает весь плазменный объем.

Принципиальная схема холловского двигателя представлена на рис.5 (подробнее см. [3, 4]). Синими линиями условно показаны траектории центров ларморовских орбит электронов, дрейфующих в азимутальном направлении. Этот дрейф и есть искомый холловский ток, давший название таким системам. Как и силовые линии

магнитного поля, дрейфовые траектории являются эквипотенциалами. В итоге формируется распределение электрического потенциала, градиент которого направлен в основном вдоль оси системы, образуя систему электростатического ускорения «незамагниченных» ионов. Небольшая кривизна магнитных силовых линий на выходе двигателя придает этой системе фокусирующие свойства. Ионы ускоряются и вылетают из двигателя, создавая реактивную тягу. Их объемный заряд нейтрализуется электронами, подаваемыми с катода-нейтрализатора, — так же, как и в ионном двигателе.

Сегодня СПД — это апробированная и весьма надежная конструкция (срок службы порядка 10^4 ч), обеспечивающая плотность ионного тока на выходе двигателя на уровне $\sim 10^{-1}$ – 10^{-2} А/см² при энергии ионов $\sim 10^2$ – 10^3 эВ и дающая удельный импульс до нескольких десятков километров в секунду. Двигатели этого семейства (рис.6) выпускаются серийно и устанавливаются в качестве двигателей коррекции и/или рулевых на самых различных КЛА, причем не только отечественных, но также французских и американских. Вместе с тем попытки масштабирования СПД (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения мощности СПД по отношению к традиционному киловаттному диапазону) оказались не вполне успешны и породили уважительно-мистическое отношение к данной морозовской конструкции — простой инженерно, но крайне сложной с точки зрения физики происходящих процессов.

Углубленное понимание физики необходимо для дальнейшего развития и совершенствования холловских двигателей. Примером явления, требующего объяснения, могут служить так называемые споуки (от англ. spoke — спица) — плазменные образования, видимые с торца СПД (рис.7), формирование которых может играть как негативную (разрушающую разряд), так и позитив-

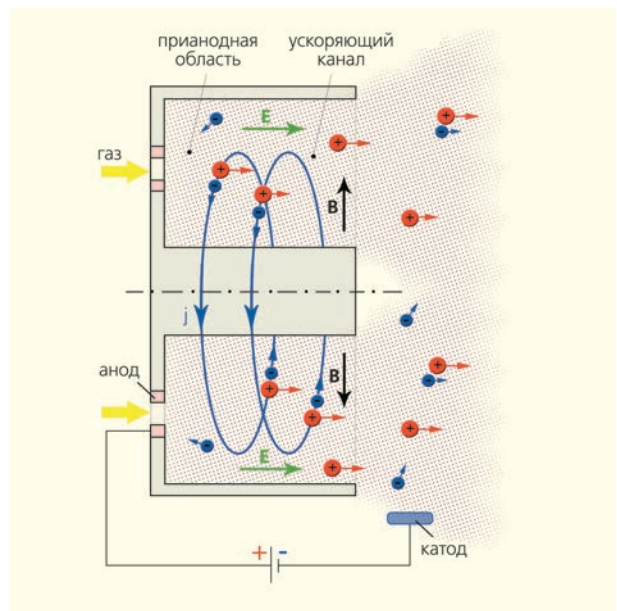


Рис.5. Принципиальная схема холловского двигателя.

ную (обеспечивающую повышенную транспортировку тока) роль для работы двигателя. Свидетельством неуклонно возрастающего интереса к физике ЭРД вообще и СПД в частности может служить существенное расширение в последние годы состава и географии участников представительных международных конференций, организуемых раз в два года Обществом ракетного электродвижения (Electric Rocket Propulsion Society)*. В 2005 г. Общество, отмечая столетие исследований в этой области, учредило награду — медаль «За выдающиеся достижения в области электроракетных двигателей». А.И.Морозов оказался среди первых шести награжденных, а когда ее стали

* См.: erps.spacegrant.org

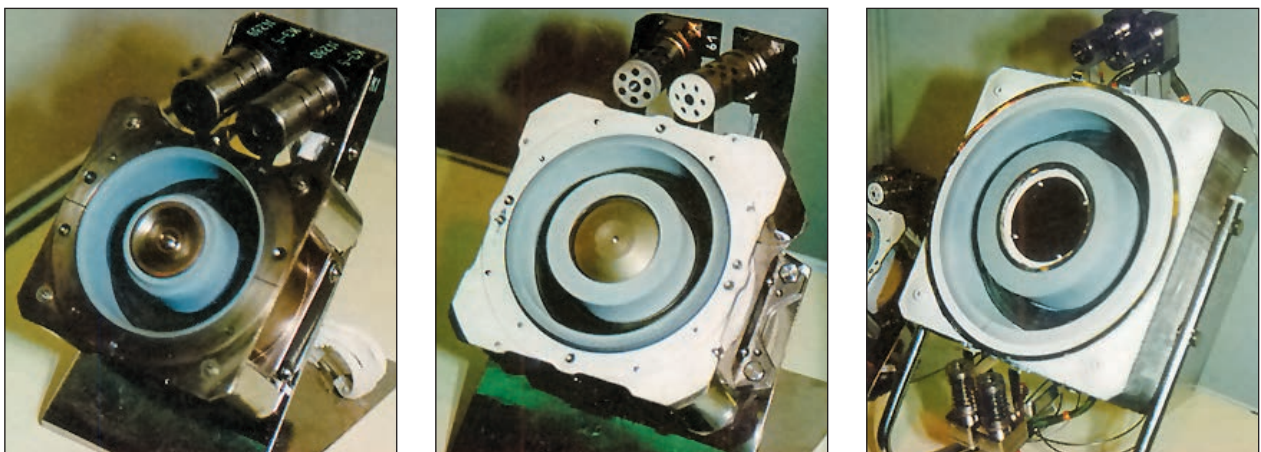


Рис.6. Линейка двигателей СПД разработки ОКБ «Факел» (г.Калининград) [7]. Слева направо: СПД-70, СПД-100, СПД-200 (индекс означает диаметр выходного канала в миллиметрах).

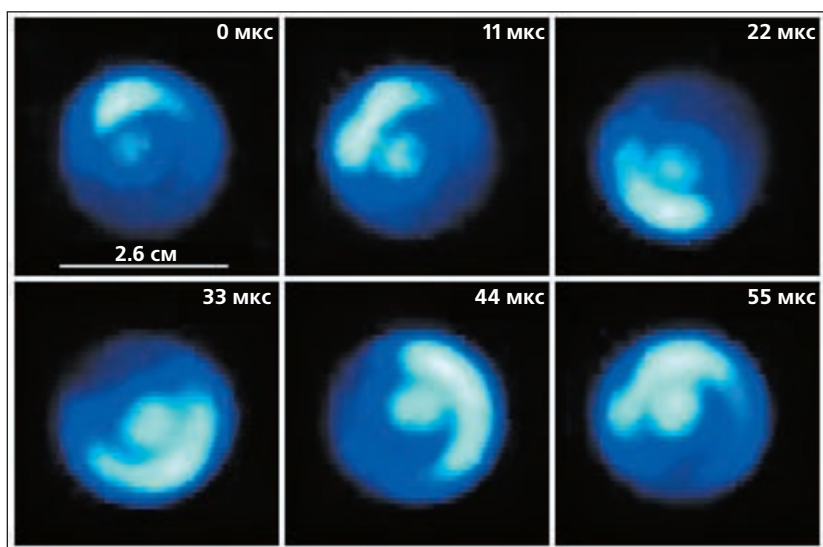


Рис.7. Изображения сплюсков (съемка высокоскоростной камерой) [8].

присуждать каждые два года, среди лауреатов оказались еще двое российских ученых: В.П.Ким (2007) и А.В.Жаринов (2011).

Немного истории

На волне общего энтузиазма, связанного с первыми космическими успехами, 2 июля 1959 г. в Курчатовском институте, в кабинете у академика Л.А.Арцимовича, который возглавлял здесь термоядерные исследования, состоялось совещание о возможности построить двигатель для марсианского корабля. В качестве ориентиров фигурировали тяга порядка 10 кгс, скорость истечения 100 км/с и мощность 10 МВт. А.М.Андрианов предложил плазменный импульсный двигатель, А.И.Морозов — магнитно-плазменный аналог сопла Лавалья и П.М.Морозов — двигательный вариант щелевого источника ионов, разработанного им ранее для электромагнитного разделения изотопов. Однако все эти проекты для тягового двигателя марсианской экспедиции не годились — не было источников питания необходимой мощности (проблема создания таких источников для космических двигателей продолжает оставаться весьма острой и поныне). Поэтому развитие получили сравнительно маломощные варианты ЭРД, которые можно было использовать для ориентации космических аппаратов и корректировки параметров их траекторий.

Из разработок этого направления в тот период самым продвинутым и отвечающим задаче оказался плазменно-эрозионный двигатель Андрианова. Он стал первым устройством такого типа, выведенным в космос: в 1964 г. его установили на аппарате «Зонд-2» в качестве двигателя ориентации с питанием от солнечных батарей. Это был импульсный

двигатель, дающий импульсы длительностью ~10–30 мкс с частотой 1 Гц. Энерговклад в импульс был всего ~57 Дж, скорость истечения — 2–5 км/с. Двигатель был выполнен в виде двух цилиндрических коаксиальных электродов, разделенных изолятором. К центральному электроду подсоединялась поджигающая игла, соединенная с конденсаторной батареей. При подключении конденсатора между иглой и электродом происходил разряд, вызывающий их испарение (эрозию) и ионизацию. Эта «затравочная» плазма поступала в промежуток между электродами, на которые основная конденсаторная батарея подавала высокое напряжение. Появление плазмы инициировало поверхностный разряд, испаряющий материал изолятора и ионизирующий его молекулы. Нагрев и взаимодействие тока с собственным магнитным полем ускоряли плазму.

Однако необходим был двигатель, способный работать постоянно, и в 1962 г. А.И.Морозов предложил свою, ныне широко используемую, схему плазменного двигателя — уже упоминавшийся СПД. В системе, в которой электроны замагничены, сняты ограничения на плотность тока ионов, обусловленные их объемным зарядом и характерные для схемы с ускорением униполярного потока в ионном двигателе.

Первоначально идея холловских двигателей была встречена «в штывки» не только космическим, но и плазменным сообществом. Вот что писал об этом сам Морозов (цитируем по [6]): «...После полугодовых мучений я пришел к следующей схеме. Основу составляет кольцевой канал с диэлектрическими стенками, в котором создается внешней системой квазирадialное магнитное поле. В глубине канала должен был помещаться анод и газораспределитель. На выходе из канала предлагалось поместить полый термокатод. Таким образом, в канале создавалось продольное электрическое поле. Вместе с радиальным магнитным полем (которое подавляло свободное перемещение электронов от катода к аноду) оно вызывало дрейф электронов по азимуту, создавая «холловский ток». В качестве рабочего вещества по ряду соображений было решено использовать ксенон. В целом процесс должен был проходить следующим образом. Атомы ксенона, поступающие в канал в районе анода, ионизируются в облаке вращающихся электронов и ускоряются в продольном электрическом поле, слабо чувствуя магнитное поле. Выйдя из канала, они «прихватывают» из катода электроны и покидают систему. Ка-

залось бы, все просто и бесспорно. Но стоило мне начать обсуждать эту схему с коллегами-газоразрядчиками, как те сразу переходили на возмущенный крик и буквально выгоняли меня из своих кабинетов. Они кричали, что Морозов невежда, что человечество за 50 лет не смогло создать надтепловое объемное электрическое поле в плазме, что невозможность этого «доказал» Д.Бом, а тут какой-то Морозов пытается все опровергнуть...»

Разумеется, ничего патологического в схеме Морозова не было. Сегодня любой студент, знакомый с основами магнитной гидродинамики, способен объяснить, что присутствие объемного электрического поля в хорошо проводящей среде не только возможно, оно обязательно в случае, когда эта среда движется под углом к магнитному полю. В этом случае условие квазинейтральности плазмы не нарушается и объемный заряд не формируется.

В ходе бурных дискуссий и экспериментальных проверок идея созрела, и во второй половине 1962 г. началась ее конструктивная проработка. В первом варианте была применена секционированная стенка разрядного канала — с тем, чтобы таким образом получать продольное распределение электрического потенциала. В ходе экспериментов выяснилось, что целикомая стенка из изолирующего материала обеспечивает гораздо более стабильную работу устройства. В конце 1968 г. была испытана модель, не требующая принудительного охлаждения. Появилась возможность ориентироваться на космические испытания. К работе подключилось ОКБ «Факел», и совместными усилиями лабораторная модель была доведена «до ума».

Однако при первой же попытке вывести новый двигатель на летные испытания разработчики столкнулись с глухим сопротивлением «космиков», не желавших иметь дело с сомнительным электрическим устройством. В ход пошла «тяжелая артиллерия»: во внедренческую кампанию включился директор Курчатовского института А.П.Александров. Наконец было достигнуто соглашение о постановке СПД на спутник «Метеор», который мы упоминали в начале статьи, — так было положено начало практическому применению ЭРД.

Возможны варианты

Как нетрудно понять из изложенного выше, ускорение плазмы как целого, без разделения на ионную и электронную компоненты, устраняет целый ряд проблем электростатических ЭРД, связанных с разделением

зарядов, последующей зарядовой компенсацией и др. Методы такого ускорения, разумеется, существуют, и наиболее очевидный из них — магнитогидродинамическое (МГД) ускорение, основанное на все том же эффекте Холла.

Как известно, на электрический ток, текущий поперек силовых линий магнитного поля, действует сила Ампера, пропорциональная величине тока и магнитного поля. Если ток течет по плазме, сила Ампера будет ускорять непосредственно саму плазму (рис.8). Такие устройства называют магнитоплазодинамическими ускорителями (МПДУ), они обратны традиционным МГД-генераторам, когда при прокачивании хорошо проводящей среды (плазмы, жидкого металла или электролита) поперек магнитного поля на границах проводника возникает разность потенциалов, которую можно использовать для токосъема.

При больших токах, необходимых для организации мощного плазменного потока, простейшее устройство (рис.8) неработоспособно: собственное поле тока порождает компоненту силы Ампера, которая отжимает плазму и протекающий по ней ток к боковым стенкам. Поэтому среди различных конструкций МПДУ доминируют цилиндрические с осевым сдвигом центрального электрода (катода) относительно анода. В этом случае осевая компонента тока создает азимутальное магнитное поле, взаимодействуя с которым радиальная компонента тока выбрасывает плазму в осевом направлении. Таким образом, можно вообще отказаться от использования внешнего магнитного поля.

Нетрудно понять, что основным фактором, лимитирующим увеличение параметров МПДУ и ограничивающим ресурс, будет износ электродов. Наилучшие результаты демонстрируют вольфрамовые электроды, через которые подается жид-

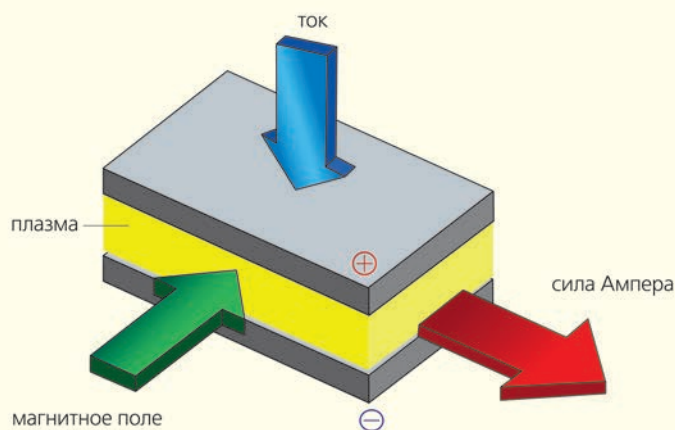


Рис.8. Принцип работы плазменного МГД-ускорителя.

кий литий — при этом его можно использовать и в качестве рабочего тела; полезную роль оказывает добавка бария, снижающая температуру анода и повышающая срок его службы [9].

МПДУ в России конструировали в разных организациях, среди которых ГНЦ «Центр Келдыша» и ОКБ «Факел», Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королева, ЦНИИмаш, Московский авиационный институт и др. Достигнуты весьма впечатляющие параметры в различных МПДУ: мощность на уровне нескольких сот киловатт (вплоть до мегаватта), ресурс — от нескольких часов до нескольких суток, удельный импульс — от единиц до десятков километров в секунду. Но большинство разработчиков, отмечая чувствительность МПДУ к нюансам токово-магнитной конфигурации и к качеству и чистоте состава рабочего тела, а также быстрый износ электродов, считают подобные системы недостаточно надежными.

Возможны ли альтернативы МПДУ, не нарушающие принцип квазинейтральности плазмы? Утвердительный ответ на этот вопрос позволяют дать результаты работ в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). Для создания эффективного плазменного ракетного двигателя важна главным образом температура плазмы, и она может быть вполне доведена до килоэлектронвольтового уровня с помощью развитой для задач УТС техники безэлектродного нагрева плазмы. В двигателе не требуется длительного удержания частиц плазмы, необходимого для протекания термоядерных реакций. В отсутствие последних снимается один из ключевых для проблемы УТС технологических вопросов о матери-

але первой стенки реактора, которая должна выдерживать нейтронный и тепловой потоки плотностью в несколько мегаватт на квадратный метр (в двигателе нейтронов нет, а основная энергия будет уноситься вылетающей плазмой, создающей тягу).

По сути, речь идет о возврате к классическому двигателю с нагревом рабочего тела от внешнего источника энергии, с той лишь разницей, что для степени нагрева плазмы высокочастотными волнами с использованием ионно-циклотронного резонанса (ИЦР) нет физических ограничений. В качестве рабочего тела в принципе может использоваться любое вещество: резонансные условия введения мощности обеспечиваются изменением частоты генератора. Возможная блок-схема такого безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД, рис.9) включает зону генерации плазмы, где происходит ионизация рабочего вещества и образование первичной плазмы; зону нагрева и ускорения, в которой нагреваются ионы плазменного потока; и магнитное сопло. Магнитное поле связывает эти три элемента в единый модуль, обеспечивает термоизоляцию плазменного потока от стенок и элементов конструкций. В зоне нагрева и ускорения магнитное поле образует асимметричную пробочную ловушку — для обеспечения истечения плазмы в нужном направлении магнитное поле на выходе из зоны генерации должно превышать магнитное поле на входе в сопло. Если мощность ВЧ-генератора достаточна для нагрева ионов за один проход, пробки на входе в сопло может не быть вовсе. Поток плазмы из магнитного сопла создает тягу, которая двигает космический корабль.

Наиболее очевидные резонансные эффекты, гарантирующие эффективный нагрев плазмы, связаны с циклотронным резонансом (ионным и электронным), при котором частота вводимой электромагнитной волны высокой частоты отвечает циклотронной частоте вращения заряженной частицы в магнитном поле. В генераторе плазмы могут быть также использованы так называемые геликонные волны — электромагнитные волны с круговой поляризацией, распространяющиеся вдоль магнитного поля.

Подобный двигатель может быть создан на базе уже имеющихся технологических возможностей. Для магнитной системы обязательным представляется использование высокотемпературных сверхпроводников, что обеспечит необходимую ком-

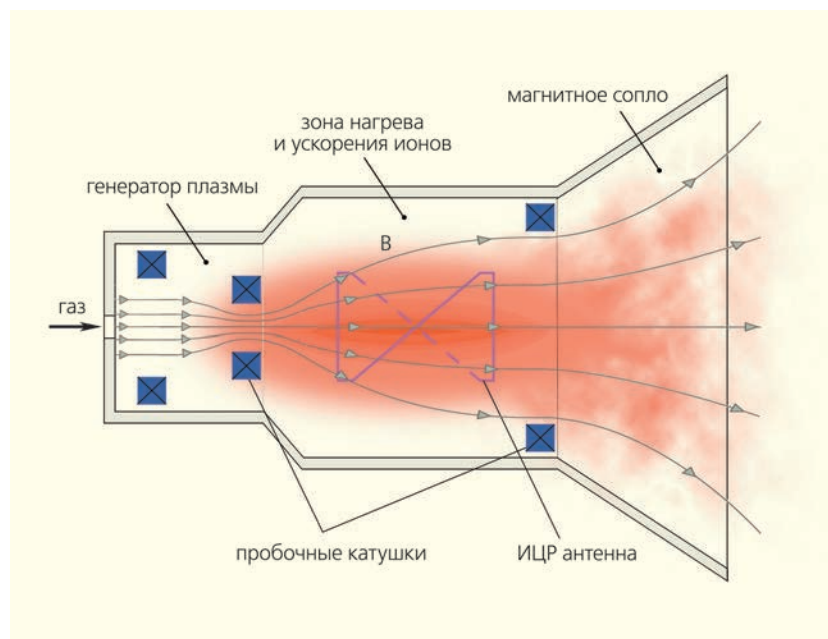


Рис.9. Принципиальная схема безэлектродного плазменного ракетного двигателя.

пактность летного варианта устройства. В НИЦ «Курчатовский институт» такие элементы, существенные для отработки принципов БПРД, реализованы в исследовательской установке ПС-1 (рис.10). Но для проведения полномасштабных экспериментальных работ и наземных испытаний вариантов двигателя нужны испытательные стенды, имитирующие космические условия, т.е. обладающие высокопроизводительными системами криогенной вакуумной откачки.

В настоящее время мощный БПРД разрабатывают в США в рамках проекта магнитоплазменного ракетного двигателя с изменяемым удельным импульсом (VASIMR) [10]: варьировать в широких пределах удельный импульс и тягу при заданной мощности, вводимой в плазму, можно, регулируя поток холодной плазмы из генератора в ускоритель (при увеличении потока растет тяга и уменьшается импульс, и наоборот). Небольшая экспериментальная программа, финансировавшаяся НАСА, стартовала в Центре термоядерной плазмы Массачусетского технологического института в начале 1980-х, а в начале 1990-х она была переведена в Джонсоновский космический центр НАСА. Уже первая стадия исследований показала эффективность плазменных процессов, обеспечивающих работу двигателя по схеме БПРД. Инициатором проекта стал Ф.Чанг-Диас, американский физик и астронавт НАСА (с 1986 по 2002 г. совершил семь космических полетов), который продолжил проект в 2005 г. (после ухода из НАСА) в основанной им «Ad Astra Rocket Company». Последовательно наращивая мощность лабораторных вариантов устройства, «Ad Astra» разрабатывает летный вариант двигателя, получивший название VF-200, наземные испытания которого были закончены в середине 2012 г.

К настоящему моменту сформулирована программа сертификации VF-200 для постановки его на Международную космическую станцию и другие КЛА; идут ресурсные испытания, в случае успеха которых предусматриваются летные испытания, затем — трехлетняя опытная эксплуатация на МКС или специальной КЛА для определения реальных рабочих характеристик двигателя и направлений его совершенствования. Ожидаемые параметры летного варианта VF-200 таковы: удельная масса 8 кг/кВт, ВЧ-мощность ~200 кВт (геликоновый разряд ~30 кВт, ионный циклотронный нагрев ~170 кВт), КПД двигателя при максимальной мощности 72%.

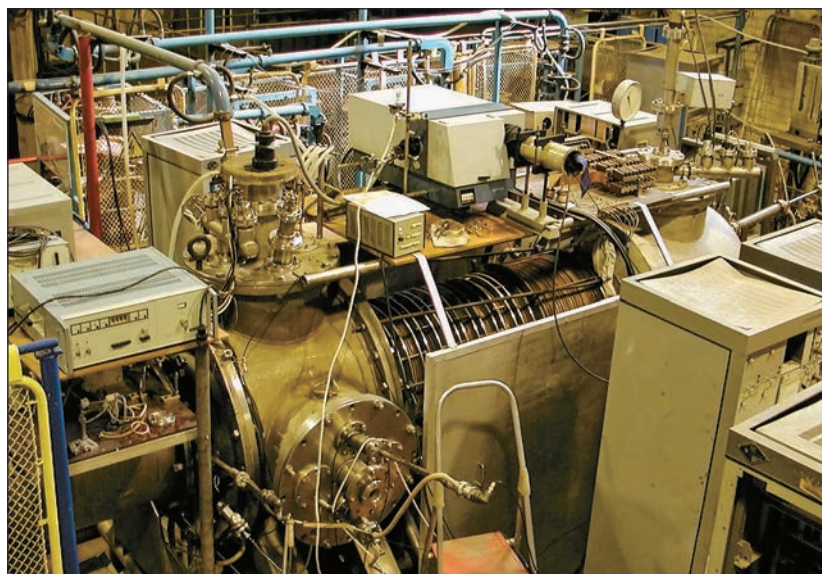


Рис.10. Установка ПС-1 в Курчатовском институте для исследования плазменных рабочих процессов в ПРД.

* * *

Какие выводы следуют из представленной картины состояния дел с ЭРД?

Дальнейшее совершенствование электростатических ЭРД — ионных и холловских — возможно, однако шаги по сколько-нибудь существенному повышению их мощности и удельного импульса не очевидны и требуют значительно более глубокого проникновения в физику протекающих процессов и новых конструктивных решений на их основе.

Сегодня в качестве мощных ЭРД рассматриваются только двигатели, обеспечивающие ускорение квазинейтрального потока плазмы. Магнитоплазодинамические ускорители вполне работоспособны, однако имеют весьма ограниченный ресурс, определяемый сроком службы электродов и постоянством магнито-токовой конфигурации.

В исследованиях по магнитному УТС известны методы генерации и поддержания униполярного электрического тока с помощью электромагнитных волн (нижнегибридных и циклотронных). Однако теоретически существующая возможность ускорения плазмы в ЭРД путем прямой передачи импульса от электромагнитных волн, инжектируемых в рабочий объем плазменного двигателя, до сих пор серьезно не обсуждалась и не имеет конструктивных проработок.

Использование же электромагнитных волн для нагрева замagnetической плазмы вполне реально и позволяет рассчитывать на значительное расширение диапазона рабочих параметров плазменных ракетных двигателей. В отсутствие принципиальных ограничений мощность БПРД фактически определяется мощностью доступного элек-

тропитания. Не следует сбрасывать со счетов и возможность появления дополнительного внутреннего источника энергии в таких системах в виде термоядерных реакций, особенно если не вести речь непременно о самоподдерживающихся реакциях. Без этого требования, необходимого для функционирования энергетического реакто-

ра, перспективы использования энергии термоядерного синтеза оказываются значительно менее отдаленными. Однако представляется, что и без такого источника развитие космической отрасли в текущем столетии в значительной степени будет определяться прогрессом в разработке плазменных ракетных двигателей. ■

Литература / Reference

1. Циолковский К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. Научное обозрение. 1903; 5: 45–75. [Tsiolkovsky K.E. Research of the world spaces by reactive devices, Scientific Review. 1903; 5: 45–75. (In Russ.)]
2. Морозов А.И. Разработка идеологии стационарных плазменных двигателей. Физика плазмы. 2003; 29(3): 261–276. [Morozov A.I. The conceptual development of stationary plasma thrusters. Plasma Physics Reports. 2003; 29(3): 235–250.]
3. Morozov A.I., Savelyev V.V. Fundamentals of plasma thruster theory. Reviews of Plasma Physics. 2000; 21: 203–391.
4. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М., 2006. [Morozov A.I. Introduction to Plasma Dynamics. CRC Press, 2012.]
5. Горшков О.А. Отечественные электроракетные двигатели сегодня. Новости космонавтики. 1999; 7: 56–58. [Gorshkov O. Domestic electric propulsion engines today. News of Cosmonautics. 1999; 7: 56–58. (In Russ.)]
6. Ильгисонис В.И. Классические задачи физики горячей плазмы. М., 2015. [Ilgisonis V.I. Classical Problems of Hot Plasma Physics. Moscow, 2015. (In Russ.)]
7. Raitsev Y., Kaganovich I., Smolyakov A. Effects of the gas pressure on low frequency oscillations in ExB discharges. 34 IEPC. Kobe, Japan, 2015. IEPC-2015-307.
8. Арцимович Л.А., Андронов И.М., Есипчук Ю.В. и др. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытание на ИСЗ «Метеор». Космические исследования. 1974; 12(3): 451–468. [Artsimovich L.A., Andronov I.M., Esipchuk Yu.V., et al. Development of stationary plasma thruster (SPT) and its test on the “Meteor” satellite. Space Researches, 1974; 12(3): 451–468.]
9. Gorshkov O.A., Shutov V.N., Kozubsky K.N. et al. Development of High Power Magnetoplasmadynamic Thrusters in the USSR. 30 IEPC. Florence, Italy, 2007. IEPC-2007-136.
10. Chang-Diaz F.R., Bengston R.D., Baity F.W. The physics and engineering of the VASIMR engine. Joint Propulsion Conference 17–19 July 2000. Huntsville, Alabama.

Plasma thrusters and the future of space exploration

M.V.Kovalchuk¹, V.I.Ilgisonis¹, V.M.Kulygin¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute” (Moscow, Russia)

The prospects of space exploration are directly related to the development of rocket propulsion systems. Expected progress in this area will be largely based on the existing experience of plasma thruster operation and on the results of multiyear thermonuclear fusion and plasma physics researches. New developments allow one to expect a substantial increase in the thrust force and power characteristics of such thrusters in comparison with traditional electric rocket engines.

Keywords: electric spacecraft propulsion, plasma thrusters, plasma flows, resonant heating.

Марганцевые руды Японского моря (экономическая зона России)

Н.В.Астахова¹, Е.А.Лопатников¹

¹Тихоокеанский океанологический институт имени В.И.Ильичева ДВО РАН
(Владивосток, Россия)

В Японском море, в экономической зоне России, выявлены 10 районов формирования железомарганцевых отложений. Рудные корки в разных местах отличаются по мощности, внутреннему строению и химическому составу. Среднее содержание Mn составляет 36%, Fe — 5,5%, Mn/Fe — 515. Выделены наиболее перспективные районы для детальных работ по изучению марганцевого оруденения. В таких районах содержание марганца в корках достигает 63%, что в два-три раза выше, чем на гайотах центральной части Тихого океана. В отличие от океанических аналогов, железомарганцевые образования Японского моря залегают на значительно меньшей глубине, вблизи крупных портовых городов и вероятных источников сбыта. Добыча таких руд регламентируется только российскими законами, что позволяет рассматривать их как потенциальный независимый источник марганцевого сырья, а возможно, и других металлов.

Ключевые слова: железомарганцевые корки, Японское море, экономическая зона России.

После распада СССР Россия оказалась не обеспеченной на перспективу собственными ресурсами марганца. Его главные разведанные и освоенные месторождения остались в других странах СНГ. На сегодняшний день потребности металлургической и химической промышленности удовлетворяются в основном за счет импорта марганцевых руд. В связи с этим возникает интерес к марганцевым отложениям окраинных и внутренних морей в пределах экономической зоны России. Железомарганцевые образования (ЖМО) известны почти во всех окраинных и внутренних морях страны. Как правило, они не покрывают таких крупных областей морского дна, как океанические конкреции и корки, и не содержат в больших количествах цветных металлов. Это определило отсутствие к ним внимания со стороны производственных организаций, и все известные сведения о марганцевых отложениях окраинных морей получены попутно при работах по изучению процессов осадконакопления и подводного вулканизма.



Надежда Валерьевна Астахова, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии осадочных процессов Тихоокеанского океанологического института имени В.И.Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН). Специалист в вопросах рудообразования на морском дне.



Евгений Александрович Лопатников, младший научный сотрудник той же лаборатории. Область научных интересов — железомарганцевые образования Японского моря.

Японское море

Наиболее широко железомарганцевая минерализация развита в дальневосточных морях (Охотском и Японском). Она приурочена к привершинным частям подводных вулканических возвышенностей. ЖМО Японского моря мощнее образова-

Таблица

Химический состав железомарганцевых корок

Элементы	1	2	3	4	5	
%	MnO	81.43	76.11	70.70	56.25	24.48
	FeO	0.01	0.14	0.09	3.29	15.15
	SiO ₂	0.76	1.70	0.98	8.07	32.50
	Al ₂ O ₃	0.33	0.42	0.37	1.23	1.06
	CaO	0.46	0.85	1.15	1.46	0.98
	TiO ₂	0.02	0.01	0.01	0.04	0.03
	MgO	0.12	1.52	2.71	2.97	4.77
	K ₂ O	0.15	0.73	2.09	1.63	2.93
	P ₂ O ₅	0.18	0.42	0.10	0.08	0.08
	Na ₂ O	0.24	1.21	—	2.72	2.16
	п.п.п.	13.37	16.09	16.79	15.20	11.26
г/г	Mn/Fe	9016	560	802	17	2
	Co	88	123	2033	172	238
	Cu	12	48	218	498	652
	Ni	152	625	516	1921	2432
	Zn	57	297	250	485	610
	Pb	4	3	3	23	22
	V	44	404	408	332	238
	Mo	86	123	275	538	331
	W	35	108	3	204	65

Образцы ЖМО отобраны на возвышенностях: 1 — безымянной (район 7); 2 — Беляевского; 3 — Витязя; 4, 5 — Первенец (4 — верхняя часть корки, 5 — нижняя, с включениями мелких обломков селадонита). Химический состав определялся атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой на спектрометре «Agilent 7500 с» (США) в центре коллективного пользования Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Все определения элементов выполнялись на навеску, высушенную при 105°C. Прочерк — не анализировалось; п.п.п. — потери массы при прокаливании.

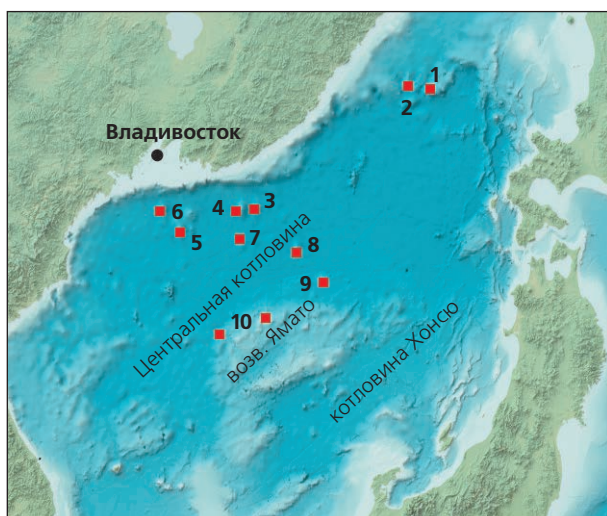


Рис. 1. Местоположение районов развития железомарганцевой минерализации в Японском море (экономическая зона России). Цифрами показаны возвышенности: 1 — Витязя, 2 — безымянная, 3 — Васильковского, 4 — Берсенева, 5 — Первенец (Сибирь), 6 — Петра Великого, 7 — безымянная, 8 — Беляевского, 9 — Шевалдина, 10 — Северное Ямато.

ний Охотского и обладают более высокой концентрацией рудных элементов. В образцах из Охотского моря средние содержания марганца составляют 11.6%, железа — 13.5%, Mn/Fe — 6.0, а в Японском эти значения соответственно — 36.6%, 11.3% и 506.7 (табл.).

Окраинное Японское море находится в северо-западной части Тихого океана, в зоне перехода Евразийского континента к Тихому океану. По морфологии дна в пределах моря выделяются три глубоководные котловины: Центральная (Японская), Хонсю (Ямато) и Цусимская. К экономической зоне России относится большая часть Центральной котловины. Она протягивается в северо-восточном направлении на 900 км при средней ширине 250 км. Максимальная глубина 3669 м. Поверхность дна котловины ровная, с отдельными возвышенностями (короткими хребтами меридионального простираения и одиночными сложно построенными вулканическими конусами) высотой до 2 км. Длина их обычно не превышает нескольких десятков километров. Возвышенности сложены вулканическими породами (от базальтов до трахириолитов) — производными одной базальтовой магмы [1]. При драгировании привершинных частей большинства этих структур совместно с вулканиками доставали и железомарганцевые корки. Их поднимали еще в 70-х годах прошлого века, в первых экспедициях отдела геологии и геофизики ТОИ ДВО РАН. Сейчас в пределах экономической зоны России обнаружено 10 районов развития железомарганцевой минерализации (рис. 1). Пять из них выявлены в экспедициях ТОИ с 2010 по 2015 г.

Характеристика железомарганцевых образований

ЖМО Центральной котловины Японского моря представлены в основном корками мощностью от нескольких миллиметров до 25 см и реже — конгломератами. Главные породообразующие минералы марганца — тодорокит $MnMn_3O_7 \cdot nH_2O$ и бернессит $Na(MnMn_3)O_8 \cdot 3H_2O$, иногда — пиролюзит MnO_2 [2, 3]. Образование их связано с гидротермально-осадочным процессом. На это указывает приуроченность рудных отложений к привершинным частям вулканической постройки, особенности химического состава ЖМО и заполнение пор подстилающих базальтов гидроксидами марганца [3–5].

Средний состав главных рудных элементов в ЖМО, отобранных на разных возвышенностях экономической зоны России в Японском море, показан на рис. 2. Поднятые образцы представляют собой главным образом марганцевые образования, реже — железомарганцевые (см. табл.), и только на возвышенности Шевалдина (район 9) они железистые. Фактическое же содержание эле-

ментов в пробах изменяется в более широких пределах. Концентрация Mn варьирует от 63% в марганцевых корках до 17% в железомарганцевых, Fe — от 0.01 до 19% соответственно. Эти значения существенно различаются не только в образцах, отобранных на разных участках развития железомарганцевой минерализации, но и в поднятых с одной станции. Например, в ЖМО безымянной возвышенности (см. рис.1, район 7) отношение Mn к Fe изменяется от 0.87 до 9016 [6].

Концентрация микроэлементов в ЖМО незначительна (десятые или сотые доли процента). Исключение составляет барий, содержание которого может достигать до 3%. Такие высокие значения связаны с выделениями барита $BaSO_4$ в рудной матрице [7]. Сумма Ni, Co, Cu варьирует от 72 до 3323 г/т, составляя в среднем 1036 г/т, причем максимальные концентрации Ni и Co достигают 2400 г/т (0.24%) и 2000 г/т (0.20%) соответственно. Распределение этих элементов также неравномерно как в образцах, поднятых с разных возвышенностей (рис.2), так и в пределах одной станции. Например, в ЖМО района 5 (см. рис.1) содержание никеля в образцах меняется от 649 до 2432 г/т, а в корках района 1 концентрация кобальта варьирует от 74 до 2033 г/т.

ЖМО Японского моря характеризуются неоднородным строением. При микроскопическом изучении шлифов обнаружены участки марганцевого, железокремнистого, марганцево-кремнистого, железомарганцевого, марганцево-железокремнистого и кремнистого составов [7]. Области с разным химическим составом выделяются в форме полос с различной мощностью или в виде пятен разнообразной формы. Границы между ними довольно четкие. Анализ полученного материала показал, что в формировании ЖМО Центральной котловины Японского моря участвуют две основные рудные фазы: марганцевая и железокремнистая. Железомарганцевая матрица встречается очень редко, в некоторых случаях она может формироваться за счет пропитки глинистых минералов гидроксидами марганца [6].

Повсеместно, в различных по составу матрицах, отмечается присутствие натрия, магния, ка-

лия, кальция; часто алюминия, бария и хлора; изредка фтора и серы, а в единичных случаях — никеля, кобальта, свинца, молибдена, вольфрама, хрома и стронция. Во всех образцах обнаружены включения барита, магнетита, титаномагнетита, ильменита, пирита и других минералов, а также очень мелкие зерна самородных металлов, интерметаллических соединений, сульфидов, сульфатов, оксидов цветных и благородных металлов [7].

Учитывая, что вулканизм на подводных возвышенностях Японского моря имел длительный и пульсирующий характер начиная со среднего миоцена, можно говорить о нескольких источниках цветных и благородных металлов. Высокотемпературные соединения, фосфиды и интерметаллы могли переноситься в твердой фазе с восходящими потоками магматических высокотемпера-

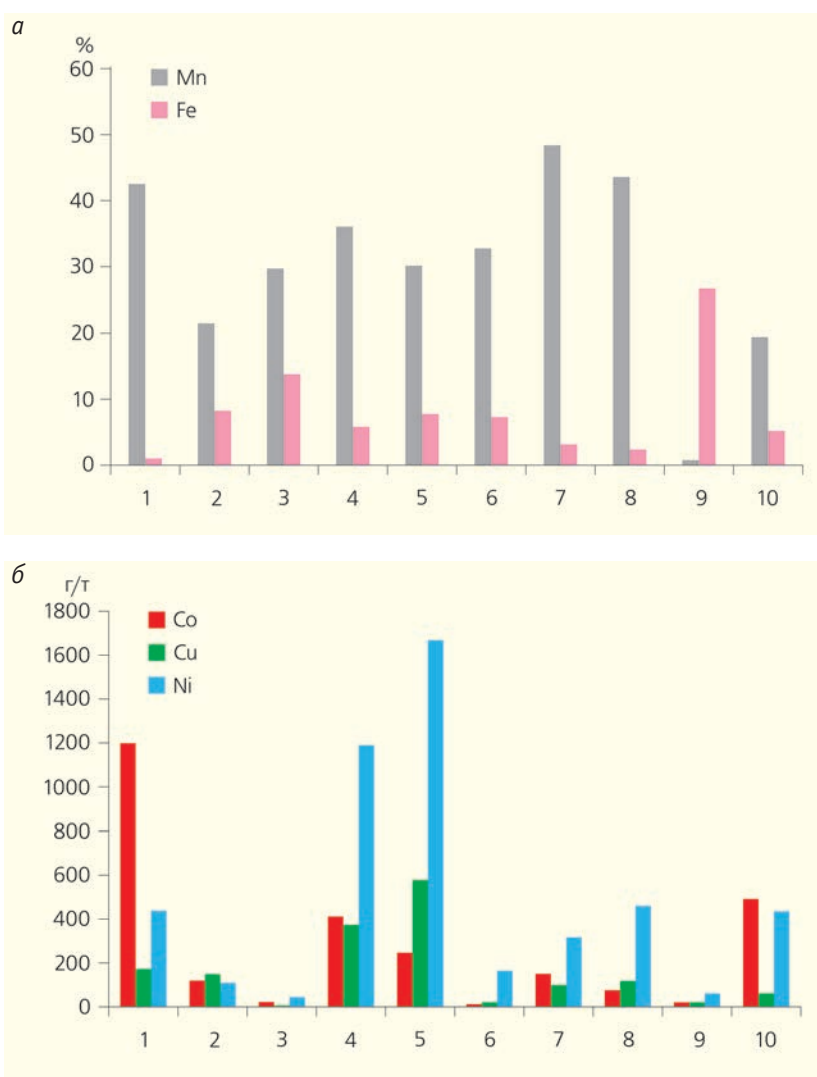


Рис.2. Средние содержания марганца, железа (а) и цветных металлов — кобальта, меди, никеля (б) в ЖМО из разных районов Центральной котловины Японского моря. Расположение районов развития железомарганцевой минерализации (1–10) показано на рис.1.

турных рудоносных флюидов, которые отделяются от магматических расплавов на разных глубинах. Основной вклад в содержание цветных металлов в этом районе вносит обогащение ими отдельных участков ЖМО. В частности, в образцах, поднятых с возвышенности Витязя, обнаружены марганцевые слои с концентрацией кобальта 0.35% (3500 г/т) [8]. ЖМО здесь, как и подстилающие базальты, наиболее обогащены никелем и кобальтом. По-видимому, гидротермальные растворы, проходя через вулканические породы, выщелачивают из них Ni, Co, K, Na, Ca, Mg и другие элементы, которые в виде незначительной примеси откладываются вместе с марганцем. Локальное распределение участков с примесью рудных микроэлементов говорит об изменении состава гидротермального раствора во времени.

Самые высокие содержания марганца (в среднем более 40%, см. рис.2,*а*) отмечаются для образцов, поднятых с возвышенностей Витязя, безымянной и Беляевского (см. рис.1, районы 1, 7, 8).

Возвышенность Витязя представляет собой подводное плато длиной 80 км, шириной 40 км и высотой до 2 км. Минимальная глубина моря здесь составляет 1086 м. Формирование ЖМО происходит на относительно выровненных площадках в привершинной части вулканической постройки. Такое расположение очень неудобно для отбора образцов драгой. И несмотря на то что за последние 40 лет в нескольких экспедициях ТОИ проводилось драгирование этой возвышенности на разных участках склона, лишь в 2010 г. удалось поднять крупный (40×35×25 см) и несколько более мелких обломков черных конгломератов с карверозной поверхностью (рис.3,*а*). Конгломераты, покрытые коркой слоистых почковидных агрегатов гидроксидов марганца, представляют собой плохо сортированный гравийно-галечный материал, который сцементирован этими же гидроксидными. Тип цемента — базальный. Толщина марганцевых корок на отдельных участках достигает 5–6 см. Аналогичные образования прослеживаются и внутри конгломерата, ближе к низу. Но мощность их меньше (не более 3 см) [8].

Изучение шлифов верхней и нижней корок с помощью микронзонда показало, что, за небольшим исключением, они обладают одинаковым строением. Различие состоит лишь в присутствии в верхней корке примеси глинистого вещества. Основу корок составляет марганцевая матрица, в состав которой постоянно входят Na, Mg, K, Ca, Ba, Cl, реже — S, Si, в единичных случаях — Fe, F, Cr, Sr, W, вероятно, присутствующие совместно с марганцем в гидротермальном растворе. В отдельные периоды растворы обогащаются Co, Cu и Al. Тогда возникают прослойки с повышенным содержанием этих металлов. В корках встречаются слои, образованные, по-видимому, двумя минеральными фазами: гидроксидом Mn и галитом (NaCl) или сульфатом Ca (гипсом или ангидри-

том?). В верхней корке содержание галита или сульфата в слоях значительно выше. В нижней выделяются тонкие прослойки, связанные с появлением примеси F (до 4.5%), Sr или с увеличением содержания Ba, Al, W. В корках (преимущественно в нижней) обнаружены редкие зерна самородного серебра и меди, а также интерметаллических соединений на основе меди (Cu-Sn и Cu-Mn?) и никеля (Ni-Cr, Ni-Cr-Cu и Fe-Cr-Ni). Образование галита, сульфата кальция, а также обогащение F, Cl и S, вероятнее всего, связано с газовой составляющей гидротермального флюида.

По диатомовому анализу возраст гравийно-галечных отложений определяется как 1–2 млн лет (конец плиоцена — ранний плейстоцен). Но гидроксиды марганца отложились уже после того, как

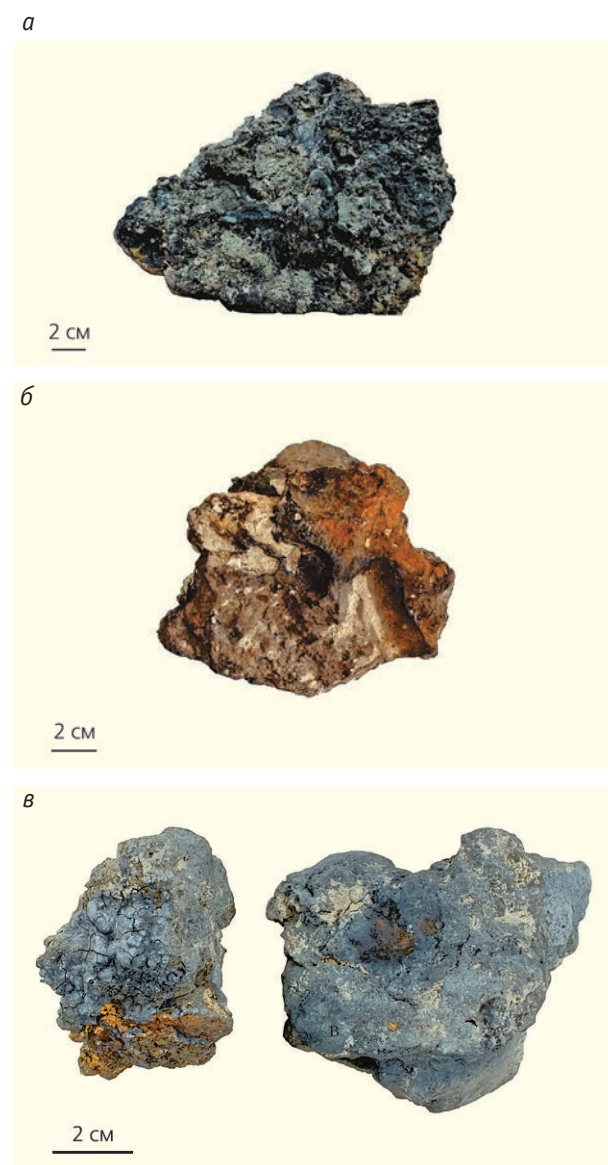


Рис.3. Железомарганцевые образования Центральной котловины Японского моря, поднятые с возвышенностей: *а* — Витязя, *б* — Беляевского, *в* — безымянной (район 7).

осадок сформировался, на что указывает цементация гравийно-галечного материала и марганцевые корки на его поверхности. На основании этого можно утверждать, что гидротермальная деятельность в этом районе активизировалась в четвертичный период [8].

Возвышенность Беляевского с двумя вершинами на общем основании вытянута в меридиональном направлении примерно на 18 км. Ее подножие ограничивается изобатой 3500 м, а пологие почти плоские вершины — изобатой 2500 м. Перепад высот между вершинами составляет 400 м. Поверхность северной вершины осложнена тремя конусами. Над одним из них зафиксирована наименьшая глубина моря — 2170 м. С 1980 г. проводилось драгирование южных, западных и северных склонов, и везде поднимались обломки ЖМО (рис.3,б; 4), что указывает на их значительное площадное распространение в этом районе.

Распределение рудных компонентов в корках неравномерное: марганец варьирует от 23 до 59%, железо — от 0.04 до 1%. С помощью микрозондового анализа аншлифов базальтов, слагающих возвышенность Беляевского, было обнаружено заполнение части пор гидроксидами марганца, а в измененных базальтах определен практически тот же комплекс цветных, благородных и редкоземельных металлов, что и в железомарганцевой корке [9]. Это позволяет говорить об одном и том же источнике рудного вещества. Таким источником, вероятнее всего, были постмагматические га-

зогидротермальные рудоносные флюиды. Просачиваясь по трещинам или ослабленным зонам в вулканических породах, они цементируют отложения на склонах возвышенностей, образуя ЖМО с разными содержаниями марганца, а в местах выхода на поверхность формируются отложения гидроксидов марганца.

Безымянная возвышенность (район 7) обнаружена сотрудниками ТОИ в 1990 г. при сейсмических работах в 7-м рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Гагаринский». В 2011 г., в 58-м рейсе НИС «Академик М.А.Лаврентьев» проводилось ее изучение. Батиметрические исследования показали, что возвышенность вытянута примерно на 10.5 км строго в меридиональном направлении и хорошо обособляется по изобате 3500 м. Ширина по подножию в северной части составляет около 2.2 км, а в южной — примерно 1.2 км. Вершина безымянной возвышенности находится на глубине 3350–3300 м. Она практически выровнена, лишь в центральной части выделяется пологое поднятие с минимальной глубиной моря 3162 м.

При драгировании западного склона в центральной части возвышенности подняли около 50 кг каменного материала, представленного обломками ЖМО размером до 10 см и незначительным количеством осадочных пород, часто с корочкой марганцевых гидроксидов толщиной до 2 см.

Среди общей массы обломков ЖМО выделяются более тяжелые твердые образцы. Их удельный вес



Рис.4. Каменный материал, поднятый драгой с возвышенности Беляевского.

Фото Е.А.Лопатникова

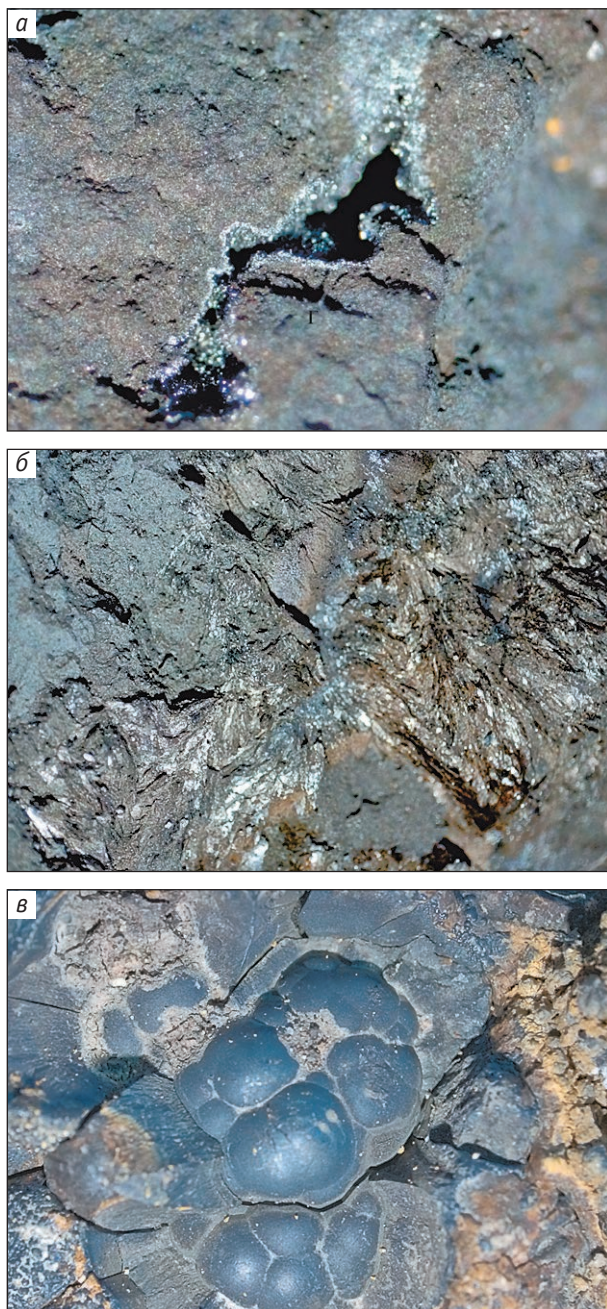


Рис.5. Внутреннее строение образцов пиролюзита с безымянной возвышенности: на сколе видны более светлые серые прожилки, сложенные мелкими кристаллами с алмазным блеском и с пустотками, выстланными этими же кристаллами (увел.7, а); отдельные участки, образованные лучистыми агрегатами игольчатых кристаллов (увел.4, б) и почковидные выделения бернесита с примесью тодорокита (увел.4, в).

составляет 3.35 г/см^3 . Обычные же корки этого региона характеризуются удельным весом, не превышающим 2 г/см^3 . По данным рентгеноструктурного анализа, такие тяжелые образцы сложены пиролюзитом (рис.3,в; 5,а,б) или смесью пиролюзита и бернесита. Более легкие образцы состоят из

тодорокита и бернесита (рис.5,в), иногда с примесью вернандита. Обломки пиролюзита легко отличаются от других марганцевых образований по удельному весу и сажистому налету, пачкающему руки. Кроме перечисленных типов ЖМО, среди поднятого материала встречаются единичные обломки, которые представляют собой чередование рыжих глинистых слоев и тонких (до 1 мм) черных прослоев тодорокита. Содержание марганца в них составляет 23%, железа — 7% [2, 6].

Для всех образцов пиролюзита характерна аномально высокая концентрация марганца (60–63%) при очень низком содержании железа (0.01–0.06%). Значения Mn/Fe варьируют от 950 до 9016. Это самые высокие величины для ЖМО Мирового океана. В образцах, сложенных пиролюзитом и бернеситом, тодорокитом или тодорокитом и бернеситом, концентрация Mn несколько меньше, чем в чистом пиролюзите, и составляет 44.1–57.7%, содержание Fe увеличивается от 0.2 до 2.6%, значения Mn/Fe варьируют от 17 до 272.

Микронзондовый анализ аншлифов пиролюзита показал, что матрица всех изученных проб имеет единый химический состав, соответствующий формуле MnO_2 , с незначительной постоянной примесью кремния и кальция. Часто присутствуют фосфор и хлор, реже — железо, магний, сера, цирконий и молибден. Содержание каждого из этих элементов-примесей не превышает десятих долей процента [6].

Формирование марганцевых корок на безымянной возвышенности произошло в позднплейстоцен-голоценовое время в результате сильного элементного фракционирования рудообразующего раствора, что характерно для гидротермальных отложений. Их формирование, по-видимому, связано с быстрым осаждением гидроксидов марганца в зоне смешения гидротермальных растворов с морской водой. Значения титанового и алюминиевого геохимических модулей также указывают на значительное содержание в рудных отложениях эксгальтативной (вулканической) компоненты.

* * *

Как мы говорили в начале статьи, железомарганцевые корки в дальневосточных морях поднимали попутно во время геологического опробования подводных возвышенностей. В большинстве случаев анализировались единичные образцы ЖМО, сохранившиеся с 70–80-х годов прошлого столетия. Специальных исследований, подобных тем, что проводились на гайотах центральной части Тихого океана, в дальневосточных морях не выполнялось. При этом содержание марганца в ЖМО, поднятых со дна океана, лежит в пределах 20%, лишь в единичных случаях достигая 30%, что в два-три раза меньше, чем в образцах, отобранных на подводных возвышенностях в Японском море. Наиболее перспективные участки для детальных работ по изучению марганцевого оруденения

в экономической зоне России — возвышенности безымянная и Беляевского (см. рис.1, районы 7, 8). В отличие от океанических аналогов, корки там залегают на значительно меньшей глубине, вблизи крупных портовых городов и потенциальных

источников сбыта. Добыча ЖМО может регламентироваться только российскими законами, что позволяет рассматривать их как независимый источник марганцевого сырья, а возможно, и других металлов. ■

Литература / Reference

1. Емельянова Т.А., Леликов Е.П. Миоцен-плейстоценовый вулканизм глубоководных котловин Японского и Охотского морей. Тихоокеанская геология. 2010; 29(2): 57–68. [Emelyanova T.A., Lelikov E.P. Miocene–Pleistocene volcanism of deep-water basins of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk. Russ. J. Pacific Geol. 2010; 4(2): 145–155.]
2. Астахова Н.В., Съедин В.Т., Можеровский А.В., Лопатников Е.А. Первая находка массивного пиролюзита в глубоководной котловине Японского моря. Докл. АН. 2015; 462(1): 68–72. [Astakhova N.V., S'edin V.T., Mozberovsky A.V., Lopatnikov E.A. The First Find of Massive Pyrolusite in a Deep Water Basin of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences. 2015; 462(1): 453–457. Doi:10.1134/S1028334X15050013.]
3. Скорнякова Н.С., Батулин Г.Н., Гурвич Е.Г. и др. Железомарганцевые корки и конкреции Японского моря. ДАН СССР. 1987; 293(2): 430–434. [Skornyakova N.S., Baturin G.N., Gurchich E.G. et al. Ferromanganese crusts and nodules of the Sea of Japan. Dokl. Akad. Nauk SSSR 1987; 293(2): 430–434. (In Russ.)]
4. Астахова Н.В., Введенская И.А. Химический состав и генезис железомарганцевых образований подводных вулканов и возвышенностей Японского моря. Вулканология и сейсмология. 2003; (6): 36–43. [Astakhova N.V., Vvedenskaya I.A. Chemical composition and origin of ferromanganese formations on submarine volcanoes and rises in the Sea of Japan. Vulkanol. Seismol. 2003; (6): 36–43. (In Russ.)]
5. Астахова Н.В., Колесник О.Н., Съедин В.Т. Рудная минерализация в вулканических породах подводных возвышенностей Японского моря. Геохимия. 2014; (2): 158–177. [Astakhova N.V., Kolesnik O.N., Syedin V.T. Ore Mineralization in Volcanic Rocks from the Submarine Rises of the Sea of Japan. Geochemistry International. 2014; 52(2): 144–161. Doi:10.1134/S0016702914020037.]
6. Астахова Н.В., Лопатников Е.А. Состав и парагенетические ассоциации массивного пиролюзита из глубоководной котловины Японского моря. Геология и геофизика. 2016; 57(10): 1861–1874. [Astakhova N.V., Lopatnikov E.A. Composition and parageneses of massive pyrolusite from the deep-waterbasin of the Sea of Japan. Russian Geology and Geophysics. 2016; 57(10): 1377–1386.]
7. Астахова Н.В. Формы нахождения и особенности распределения благородных и цветных металлов в железомарганцевых корках Японского моря. Океанология. 2013; 53(6): 769–785. [Astakhova N.V. Occurrence Forms and Distribution of Precious and Base Metals in Ferromanganese Crusts from the Sea of Japan. Oceanology. 2013; 53(6): 686–701. Doi:10.1134/S0001437013050019.]
8. Астахова Н.В., Лопатников Е.А., Цой И.Б. Геохимия марганцевых конгломератов возвышенности Витязя (Японское море). Вулканология и сейсмология. 2015; (6): 13–23. [Astakhova N.V., Lopatnikov E.A., Tsoy I.B. The Geochemistry of Manganese Conglomerates on the Vityaz' Rise, Japan Sea. J. of Volcanology and Seismology. 2015; 9(6): 358–367. Doi:10.1134/S0742046315060020.]
9. Астахова Н.В., Колесник О.Н., Съедин В.Т. Цветные, благородные и редкоземельные металлы в железомарганцевых корках и базальтах возвышенности Беляевского (Японское море). Вестник КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле». 2010; 16: 152–166. [Astakhova N.V., Kolesnik O.N., Syedin V.T. Nonferrous, noble and rare earth metals in ferromanganese crusts and basalts from the Belyaevsky Sea mount (Sea of Japan). Bull. Kamchat. Reg. Assoc. Educat. Sci. Center. 2010; 2: 231–245.]

Manganese Ores of the Sea of Japan (the Russian Economic Zone)

N.V.Astakhova¹, E.A.Lopatnikov¹

¹V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of RAS (Vladivostok, Russia)

In the Sea of Japan in the Russian economic zone, 10 regions of formation of ferromanganese deposits have been identified. Ore crusts of different regions differ in thickness, internal structure, and chemical composition. The average content of Mn is 36%, Fe is 5.5%, and the Mn/Fe ratio is 515. The most promising areas for detailed studies of manganese mineralization have been identified. Manganese content in the crusts of these areas reaches 63%, which are 2–3 times higher than on the guyots of the central part of the Pacific Ocean. Unlike ocean analogues, these ores lie at a much smaller depth, near large port cities and possible sources of sales. Their extraction can be regulated only by Russian laws, which allows them to be considered as a possible independent source of manganese raw materials, and possibly of other metals.

Keywords: ferromanganese crusts, Sea of Japan, Russian Economic Zone.

Черноморский шпрот: донный траловый промысел и его последствия

Д.Я.Фащук

Институт географии РАН (Москва, Россия)

Проанализирована история развития тралового промысла на шельфе Черного моря до начала XXI в. Показано, как отразились на сообществах зообентоса десятки тысяч ежегодных донных тралений, выполнявшихся в северо-западной части моря (1978–1990), на юго-западном шельфе Крыма (1990-е — начало 2000-х) и в зоне Керченского предпроливья (1986–1990). Констатируются факты заиления дна в районах промысла, вызвавшие трансформацию, а в некоторых случаях (юго-западный шельф Крыма) — полную деградацию бентосных сообществ.

Ключевые слова: Черное море, траловый промысел, шпрот, заиление дна, биоценозы зообентоса.

Черноморский шпрот (*Sprattus sprattus*) принадлежит к семейству сельдевых рыб (*Clupeidae*) и в настоящее время считается, наряду с черноморской хамсой, наиболее массовым пелагическим промысловым видом Черного моря. Его запасы здесь в конце XX в. колебались от 200 тыс. до 1.6 млн т [1].

В начале 20-го столетия в приустьевых прибрежных районах северо-западной части моря, от Дуная до Днепра, местные жители традиционно ловили шпрота на глубинах 3–7 м закидными и ставными неводами. После Гражданской войны, с середины 1920-х годов, интенсивность промысла существенно возросла. С 1930 по 1935 г. суммарные ежегодные уловы рыбы в этом районе менялись от 11.1 (1933) до 22.4 (1935) тыс. т, а уловы чистого шпрота составляли 8–15%. В летний сезон доля шпрота могла достигать 58%, а иногда даже 90% (район Очакова и Тилигульский лиман). В то же время начались первые рыбопромысловые научные исследования черноморского шпрота. Были получены предварительные оценки его реальных запасов в открытых районах шельфа. Великая Отечественная война, к сожалению, не позволила довести до конца эти работы [2].



Дмитрий Яковлевич Фащук, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гидрологии Института географии РАН. Занимается проблемами географо-экологического моделирования морских экосистем.

В первые же послевоенные годы исследования шпрота были продолжены. Начался его экспериментальный научно-исследовательский траловый лов по всей акватории черноморского шельфа (на глубинах от 20 до 100 м). Целью этих работ стала оценка характера поведения, запасов и особенно-



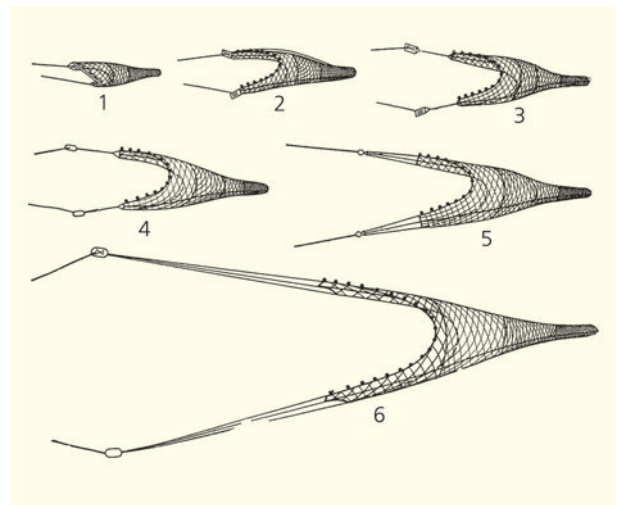
Черноморский шпрот.

стей распределения вида в весенне-осенний период нагула. В 1949 г. работы по освоению тралового лова продолжила Черноморская научно-промысловая экспедиция Всесоюзного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). Однако крупномасштабный лов шпрота таким способом организован не был. В течение последующих 20 лет шла интенсивная разведка черноморских рыбных ресурсов. В 1970-х годах в открытых районах моря на глубинах от 30 до 100 м были обнаружены значительные запасы шпрота, однако ловили его преимущественно ставными неводами в прибрежной части моря летом (июнь—август). Ежегодный вылов не превышал 4 тыс. т [3]. Только в 1976 г., после сокращения запасов традиционных ценных черноморских промысловых объектов (кефали, сельди, камбалы-калкана, барабули, осетровых), шпрот начали массово добывать с использованием пелагических (лов в толще вод) и батипелагических (придонный лов) тралов. С того времени на северо-западном шельфе Черного моря траловый промысел шпрота в период его нагула (апрель—октябрь) стал регулярным. К 1981 г. среднегодовой суммарный вылов всеми черноморскими странами увеличился в 15–20 раз — с 6 тыс. до 97 тыс. т. При этом вылов СССР возрос почти в 100 раз — до 75,9 тыс. т [4]. О том, каким путем были достигнуты такие успехи и как они отразились на природе Черного моря, и пойдет речь в данной статье.

Траловый лов рыбы в Черном море

Предшественник тралообразных орудий лова — бим-трал, был изобретен еще в XIX в., но уже к концу столетия его вытеснил прототип всех современных тралов — оттер-трал. В 1920 г. в Архангельске появилась первая советская база тралового лова, состоявшая из 12 устаревших траулеров (оснащенных бим-тралами), доставшихся СССР в наследство от царской России. После подписания В.И.Лениным в 1921 г. декрета о рыбной промышленности базу тралового флота перевели в Мурманск (в 1926 г.), и в нашей стране стали интенсивно совершенствоваться тралообразные орудия лова.

В 1934–1940 гг. основоположник новой науки о промышленном рыболовстве Ф.И.Баранов разработал инженерные основы для расчета и проектирования орудий рыболовства. Они были изложены в его капитальном труде «Теория и расчет орудий рыболовства» [6]. Введение в оттер-трале распорных досок на концах крыльев, кухтылей (шаровидных поплавков), бобинцов (деревянных катков на нижнем подборе) и кабелей позволило увеличить его горизонтальное и вертикальное раскрытие (это повысило уловистость на 40%), дало возможность выполнять эффективные траления на каменистых грунтах, существенно со-



Основные этапы совершенствования донного трала [5]: 1 — до 1898 г. (бим-трал), 2 — до 1917 г. (оттер-трал), 3 — до 1931 г., 4 — с 1947 г., 5 — с 1962 г., 6 — современный донный трал.

кратило время и облегчило труд траловой команды при постановке и выборке трала.

Совершенствование донного трала в нашей стране сопровождалось разработкой конструкции универсального разноглубинного трала для облова промысловых скоплений пелагических рыб. Первый такой трал испытали (получен непромысловый улов) в 1934 г. сотрудники Полярного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ПИРО) в Кольском заливе. После Великой Отечественной войны разработки были продолжены совместно с конструкторами ВНИРО в двух направлениях: для лова сельди в Северной Атлантике и хамсы и шпрота в Черном море.

Первая попытка промысла рыбы с помощью донного трала на северо-западном шельфе Черного моря была предпринята в 1909 г. Рыболовный сейнер «Федя» в течение года выполнил более 1000 тралений на глубинах от 20 до 50 м и выловил при этом около 12 тыс. пудов (200 т) рыбы. Улов на 98–99% состоял из осетровых пород, остальная часть — из камбалы-калкана [7]. К концу 1911 г. в траловом промысле в этом районе моря участвовало уже девять судов, а их улов практически весь состоял из молоди осетровых рыб. В 1913 г. правительство царской России издало «Закон и инструкции по рыболовству, действующие в западной части Черноморского бассейна», предусматривающие суровое наказание за ведение такого вида промысла. Нарушители карались высокими денежными штрафами и тюремным заключением на срок от 1 до 6 месяцев с конфискацией орудий лова и пойманной рыбы [8].

В 1932 г. в СССР, невзирая на запрет 1913 г., были возобновлены попытки применения донного трала для добычи на шельфе камбалы-калкана.

С этой целью из Мурманска на Черное море был переброшен траулер «Абрек», который прошел с донными тралениями по всему советскому шельфу от Одессы до юго-восточных берегов Черного моря. Уловы камбалы оказались очень низкими, и в 1933 г. сейнер вернулся в Мурманск. С 1936 по 1943 г. развитием тралового промысла в кавказских водах Черного моря занималась Грузинская научная рыбохозяйственная станция на парусно-моторном судне «Абхазец». В 1940 г. Грузинский рыбопромышленный трест выделил для тралового лова два промысловых сейнера — «Грузрыба» и «Батуми» — и научно-исследовательское судно «Зюйд-вест». На глубинах 25–55 м были обнаружены промысловые скопления акулы-катрана, ставриды, камбалы. Суточные уловы достигали здесь 1.2–2.3 т [9].

После изучения географии и хронологии жизненного цикла шпрота, определения районов и сроков образования его промысловых скоплений все черноморские страны начали активно добывать шпрот донными тралами. В СССР траловый промысел шпрота начался с 1976 г. Но не прошло и пяти лет, как стало ясно, что этот новый вид воздействия человека на природу ведет к катастрофическим последствиям для морских экосистем. Государство было вынуждено принять срочные меры, и в конце 1980-х годов применение донных тралов в Черном море запретили.

До настоящего времени промысел шпрота здесь был разрешен только в пелагиали — без касания тралом грунта. Но время и жизнь внесли существенные поправки в принятые решения.

Кое-что из жизни шпрота

Шпрот относится к зимнерестующим видам, период его размножения сильно растянут, но основной нерест происходит с октября по март в открытых районах моря. Икра развивается в течение восьми дней в пелагиали при температуре 5–13°C. Рыба обычно обитает в слоях воды с преимущественно низкой температурой — от 6 до 18°C, избегает участков с сильно распресненной водой, питается холодолюбивыми видами зоопланктона. Продолжительность жизни шпрота составляет пять лет.

Урожайность шпрота определяется его пополнением (выживаемостью поколения в период с ноября по март) и общим запасом. Величины этих характеристик связаны со средней мартовской температурой воды на поверхности в порту Батуми. Она косвенно отражает количество солнечных дней в зимний период и интенсивность продукционных процессов, обеспечивающих кормовую базу для личинок шпрота в открытой части Черного моря (особенно в юго-восточной).

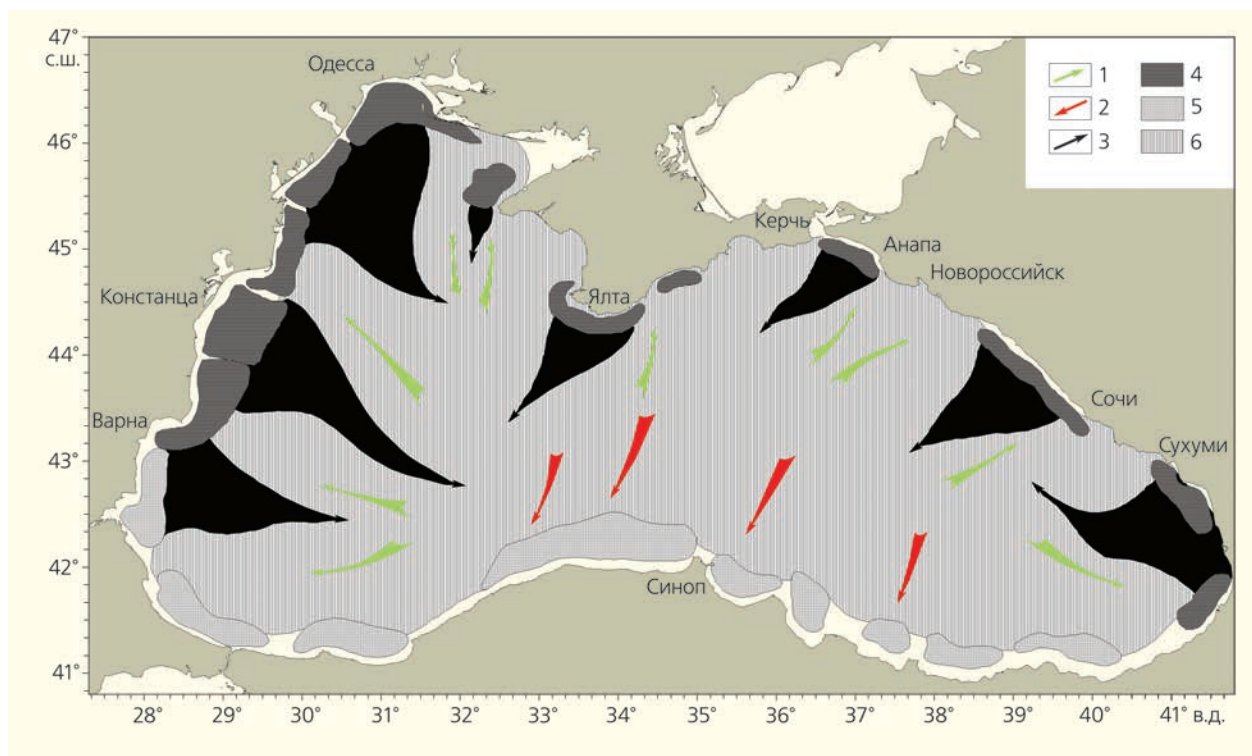


Схема жизненного цикла шпрота в Черном море [10]. Условные обозначения: 1, 2 — пути весенних миграций (1 — известные, 2 — предполагаемые); 3 — пути осенних миграций; 4, 5 — районы нагула (4 — известные, 5 — предполагаемые); 6 — районы нереста.

В марте—апреле шпрот обычно начинает мигрировать для нагула из открытых районов моря в прибрежную зону — в основном, на северо-запад Черного моря, где переходит на придонное обитание. С этого периода начинается его массовый траловый промысел в районе мыса Тарханкут (глубины 50–70 м), в северной части взморья Дуная у о.Змеиный (глубины 20–30 м), а также на свале глубин вдоль изобаты 100 м от побережья Крыма до Румынии и Болгарии.

Сроки начала нагульных миграций шпрота, а следовательно, и начала промысла, связаны с темпами зимнего выхолаживания и весеннего прогрева и совпадают с переходом температуры поверхности воды в одесском порту через 10°C.

Благоприятными условиями для образования промысловых концентраций шпрота в весенне-летний период в придонном слое северо-западного шельфа моря считаются наличие вертикального градиента плотности (стратификация вод) и придонная температура в диапазоне 7–9°C.

Взрослые особи шпрота концентрируются в основном в нескольких районах: в предустьевой зоне Дуная (до 70% случаев), в полосе шириной 50–100 миль в районе шельфа и свала глубин от побережья Румынии на восток до крымского мыса Тарханкут (до 50%), в предустьевой зоне Днепра (до 50%), а также вдоль побережья Крыма от Судака до Ялты с удалением до 50 миль



Известняковые скалы мыса Тарханкут. К западу от его оконечности на глубинах 50–70 м велась активная добыча шпрота.

Фото А.Копейкина

от берега. На остальной акватории Черного моря в пределах экономической зоны стран СНГ, Румынии и Болгарии повторяемость повышенных концентраций шпрота за 10 лет изменялась от 10 до 30%.

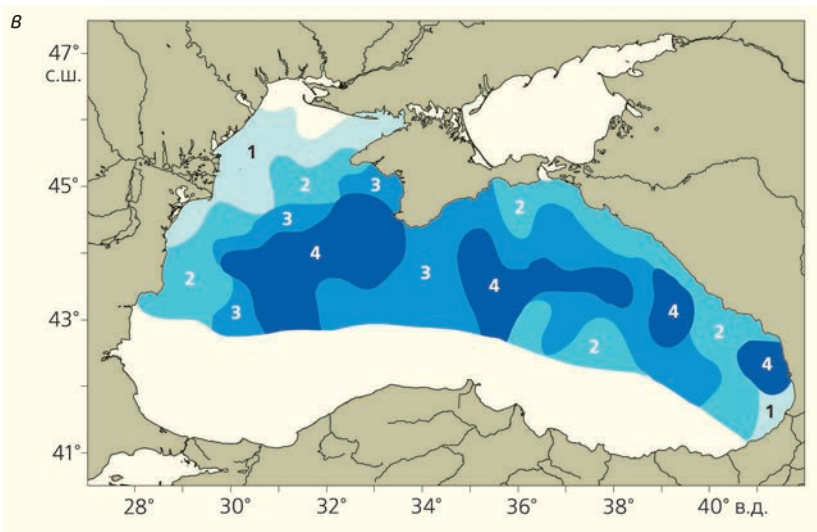
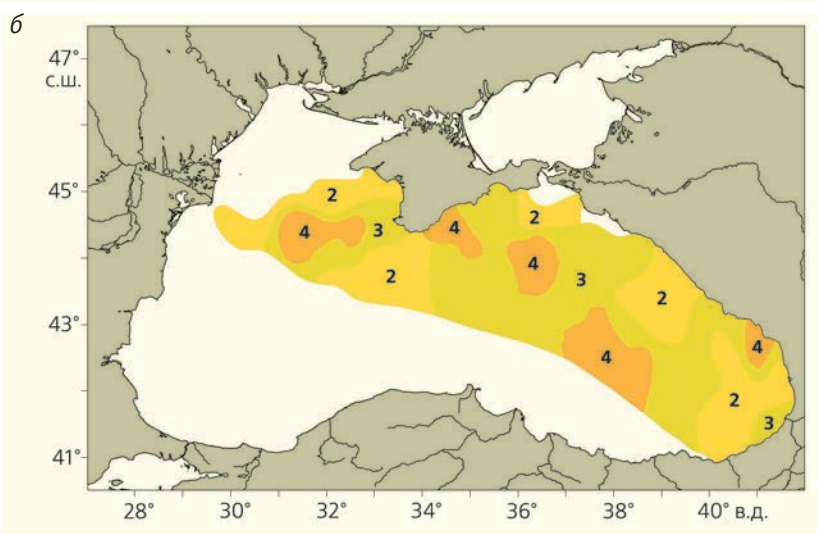
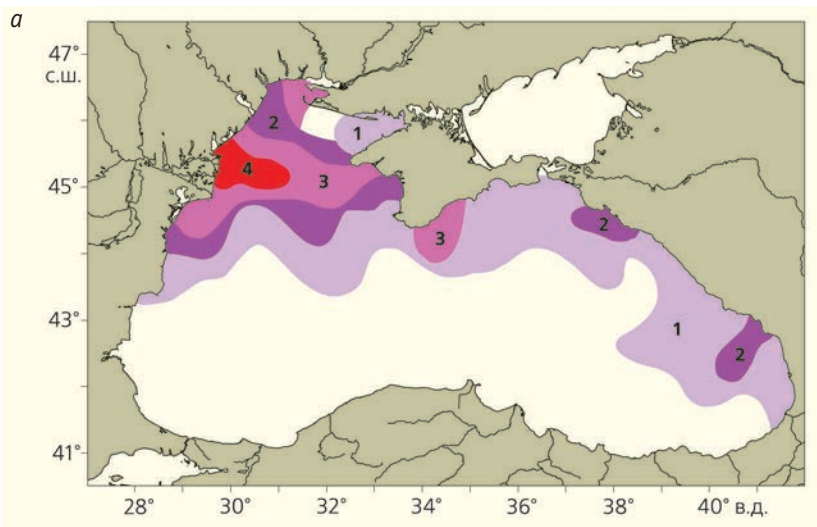
Зоны скопления икринок шпрота располагаются в местах его непосредственного нереста — в открытых районах западной и восточной частей моря. При этом на востоке эта зона простирается практически до берега. На мелководных



Северо-западная часть Черного моря. Остров Змеиный и его берега.



Здесь и далее фото предоставлены автором



Повторяемость повышенных концентраций взрослых особей шпрота (а), икринок (б), а также личинок и молоди (в) в Черном море на разных стадиях биологического развития в период с 1981 по 1990 г. [10]. Условные обозначения: 1 — 0–20%, 2 — 21–30%, 3 — 31–50%, 4 — 51–100%.

участках северо-западной части моря икринки шпрота отсутствуют, а в открытых районах центра моря частота их скоплений снижается до 40%.

Личинки и молодь скапливаются в открытых районах восточной и западной частей моря. При этом на западе зона их повышенных концентраций смещается на мелководье Болгарии, Румынии и северо-западного шельфа, а на востоке отходит от берега, сокращается по площади и теряет устойчивость — повторяемость скоплений снижается максимум до 70%.

Северо-западная часть моря

С 1978 по 1990 г. в Черном море каждый год вылавливалось от 25 (в начале периода) до 80 тыс. т шпрота [11]. Основной промысел велся в северо-западной части моря. В результате 30–50 тыс. донных тралений из районов промысла ежегодно выносились по 70 млн т мелкодисперсных частиц. Толщина переложенного слоя осадков составляла 18 см, а их объем — 30 млн т [12]. Взвешенные частицы подхватывались течениями и переносились в Каркинитский залив — заповедную (запретную для лова) зону обитания осетровых — и оседали здесь на площади более 5 тыс. км².

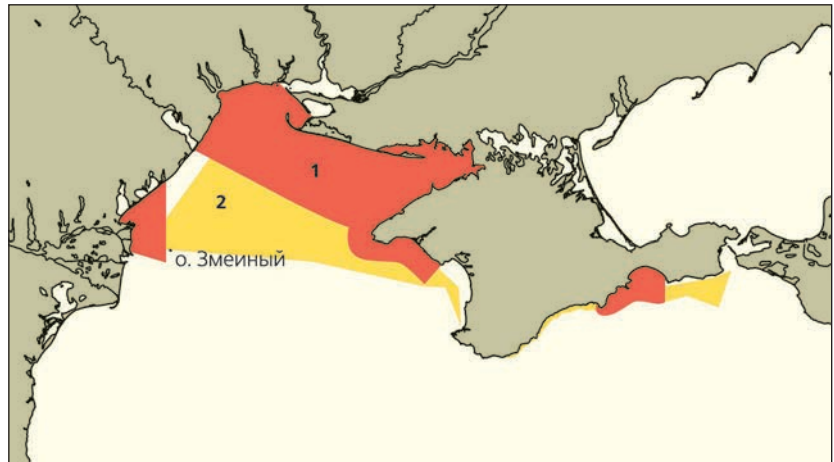
Слой наилка толщиной 35 см был обнаружен в заливе на площади 3350 км², а толщиной от 30 до 50 см — на площади 750 км². Скорость седиментации при этом составляла от 5 до 40 мм в год — в 100–1000 раз выше естественной [14].

С 1985 по 1994 г. специалисты Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии вели мониторинг состояния донных осадков (81 станция через одну милю) параллельно с оценкой промысловой популяции мидий на банке Тетис-2 у входа в Каркинитский залив в районе мыса Тарханкут. Исследования пока-

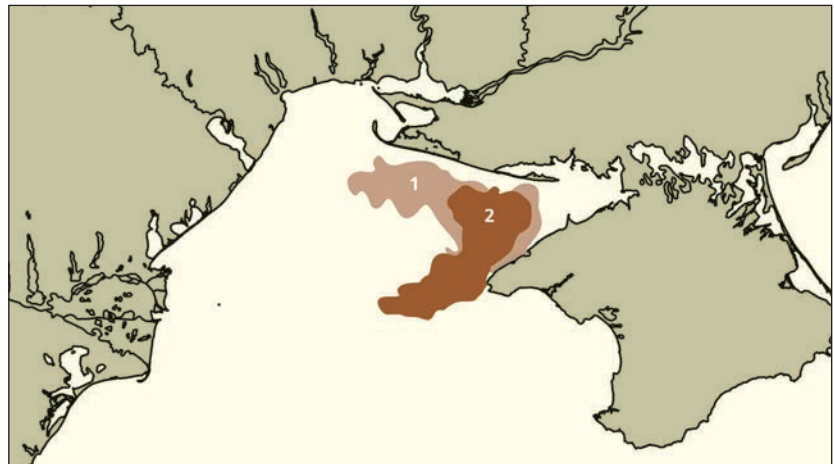
зали, что за этот период произошло существенное заиление юго-западной и северо-восточной частей банки [15]. Первый участок находился под влиянием тралового промысла, а неподалеку от второго располагалась свалка грунтов.

При этом было установлено, что в центральной, наименее заиленной, части банки (толщина наилка < 2 см) биомасса мидий в течение 10 лет увеличилась в 3.8 раза — с 470 до 1791 г/м². В ее средней части (толщина наилка 2–3 см) биомасса моллюсков сократилась в 5.4, а численность — в 9.5 раза. На периферии банки толщина илового слоя к 1994 г. достигла 15 см. Мидии — животные сестонофаги — здесь полностью погибли, а их биоценоз заместился биоценозом полихеты детритофага *Melinna palmata* — типичного обитателя илистых грунтов.

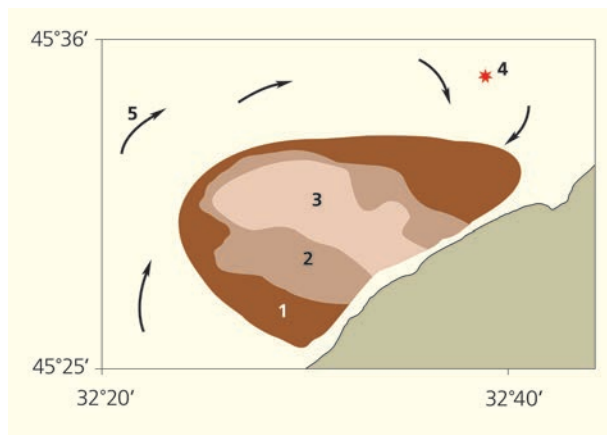
Кроме того, в результате заиления банки Тетис-2 произошло старение промысловой популяции мидий: в 1985 г. здесь преобладали особи трехлетнего возраста, а к 1994 г. они уступили место пяти- и шестилеткам. Количество молоди за 10 лет в центре района сократилось в восемь, а на его периферии — в 20 раз. Продукция промысловой части популяции моллюсков уменьшилась в три раза. [15].



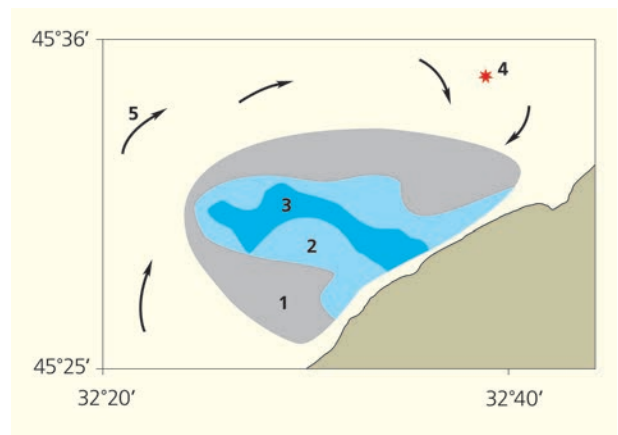
Добыча шпрота на шельфе Украины в 1976–2014 гг. [13]: 1 — районы, закрытые для тралового промысла, 2 — основные районы тралового лова.



Распределение зон заиления по акватории северо-западной части Черного моря [14]: 1 — оседание наилка; 2 — интенсивное оседание наилка.



Заиление промысловой мидийной банки Тетис-2 [15]. Условные обозначения: 1–3 — толщина слоя наилка (1 — до 15 см, 2 — 2–3 см, 3 — менее 2 см); 4 — свалка грунта; 5 — преобладающие течения.



Динамика биомассы мидий на банке Тетис-2 с 1985 по 1994 г. [15]. Условные обозначения: 1 — исчезновение поселений; 2 — снижение биомассы; 3 — рост биомассы; 4 — свалка грунта; 5 — преобладающие течения.

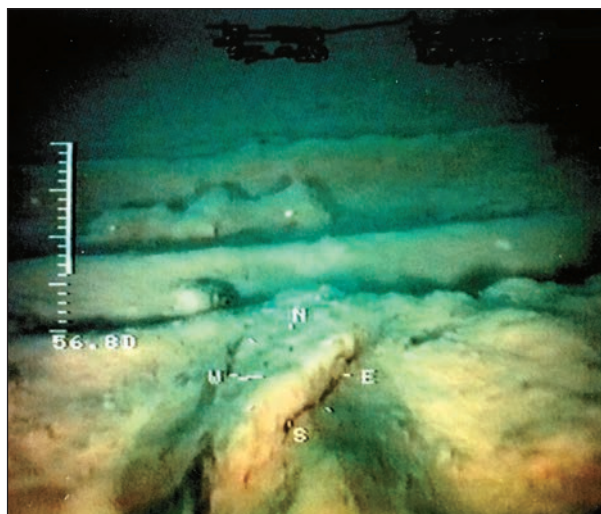
Южный шельф Крыма

В результате известных политических и экономических событий начала 1990-х годов объем вылова шпрота в Черном море сократился до 9–10 тыс. т в год, а на южном и юго-западном шельфе Крыма составил всего 1000 т ежегодно.

Тем не менее к 1995 г. рыбодобывающая отрасль Украины стала выходить из кризисной ситуации в добыче шпрота. В 1998 г. его вылов возрос до 30,3 тыс. т. При этом основной район промысла сместился из северо-западной части моря на южный шельф Крыма. Здесь вылов шпрота увеличился в 10–100 раз по сравнению с 1980-ми годами и к 2002 г. достиг 33,1 тыс. т при общем вылове 45,5 тыс. т [16].

С начала 2000 г. на крымском шельфе при промысле шпрота ежегодно выполнялось в среднем около 15 тыс. тралений. Визуальные наблюдения с помощью подводных аппаратов и роботов, расчеты, а также анализы уловов рыболовных траулеров в районах промысла шпрота показали, что запрет на выполнение донных тралений постоянно нарушался. Дно промысловых районов покрылось бороздами от траловых досок глубиной до 30–40 см и шириной до 70 см. На шельфе Крыма ежегодно травами «пропахивалось» от 3 до 6 тыс. км² морского дна. Площадь, пригодная для тралений, у западного побережья Крыма составляет около 1,4 тыс. км² (от мыса Евпаторийского до мыса Херсонес и от изобаты 30 м до нейтральных вод), а у южного — 2,1 тыс. км² (от мыса Херсонес до мыса Меганом).

Феодосийский залив (мыс Меганом — мыс Чауда) для промысла закрыт, а остальная часть восточного шельфа Крыма до Керченского пролива составляет около 0,7 тыс. км². Таким образом, общая площадь шельфа Крымского п-ова, пригодная для донных тралений, составляет 4,2 тыс. км². Эта величина полностью укладывается в диапазон



Следы от траловых досок на дне крымского шельфа [16].



Мыс Херсонес.



Мыс Меганом («огромный дом» — греч.) с высоты птичьего полета и с моря в крайней точке.

расчетных величин площадей, «распахиваемых» сегодня тралами (при условии равномерного распределения траловых галсов).

Если же учесть, что в 2000-е годы Украина вела основной промысел шпрота на западном и южном шельфе Крыма от мыса Евпаторийского до мыса Ай-Тодор (на площади 2.8 тыс. км²), а половина этой территории относится к окрестностям Севастополя (между мысами Лукулл и Сарыч), то нетрудно догадаться, что дно в этом районе в течение украинского периода жизни Крыма было «перепажано» не один раз.

Шельф Керченского предпроливья

Не менее важен в добыче шпрота еще один район Черного моря — Керченское предпроливье. С 1986 по 1990 г. здесь осуществлялось около 10 тыс. донных тралений ежегодно [13].

После распада Советского Союза, имевшего протяженность черноморского побережья 2413 км, в границах России осталось всего 400 км. Более 80% черноморской рыбохозяйственной инфраструктуры осталось на Украине и в Грузии. В период с 1990 по 2000 г. единый рыбохозяйственный комплекс России в Азово-Черноморском бассейне был разрушен. Практически все оставшиеся на побережье морские рыбные порты и причалы, колхозы, рыбоперерабатывающие предприятия (комбинаты, заводы и цеха) перепрофилировались либо обанкротились. В распоряжении рыбаков остались только два небольших порта — в районе Тамани и недалеко от Новороссийска. Численность российских судов в Азово-Черноморском бассейне в 1994 г. уменьшилась по сравнению с 1985 г. в три раза и более чем вдвое от уровня 1990 г. Еще в большей мере сократились уловы флота [17].

Если в 1970–1980-х годах уловы российских рыбаков в Чер-

ном море составляли в среднем 57 тыс. т рыбы в год, то за десятилетие с 1998 по 2008 г. они находились в пределах от 3.4 (1998) до 28.2 тыс. т. (2003). В 1995 г. российские рыбаки добыли лишь 1.8 тыс. т рыбы, что в 30 раз меньше прежних уловов [18]. При этом вылов шпрота, например, в том же году составил 1.3 тыс. т, что в 10 раз меньше среднегодового улова за период с 1986 по 1990 г. В последующие годы он изменялся от 1.2 (1998) до 20.4 (2003) тыс. т (табл.), что во много раз ниже, чем добывала в тот период Украина.

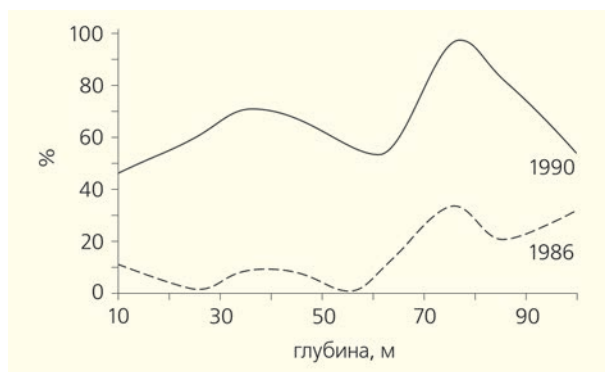
Тем не менее за 1986–1990 гг. площадь, занимаемая илами в зоне Керченского предпроливья, увеличилась в 11 раз — с 156 до 1696 км². При этом максимумы заиления отмечались в 1989 и 1990 гг., а самыми заиленными оказались участки дна на традиционных глубинах тралового промысла шпрота — 40–50 и 70–80 м.

Такой вывод был сделан после обработки данных 340 бентосных и геологических станций, осуществлявших мониторинг состояния донных биоценозов в Керченском предпроливье (акватория площадью 5.3 тыс. км²) с целью определения влияния тралового промысла на условия среды [20]. В результате в исследуемом районе площадь, занимаемая биоценозами двустворчатых моллюсков *Modiolus adriaticus*, *Mytilus galloprovincialis* и *Modiolus phaseolinus*, сократилась в 1.9 раза — с 4.4 до 2.5 тыс. км², а площадь биоценоза полихеты *Terebellides stroemi* (типичного обитателя илистых грунтов) увеличилась в 5.9 раза — с 265 до 1537 км². При этом видовое богатство исходного биоценоза мидий уменьшилось в 11 раз, а площадь — в 1.8 раза (с 1200 до 690 км²) [21].

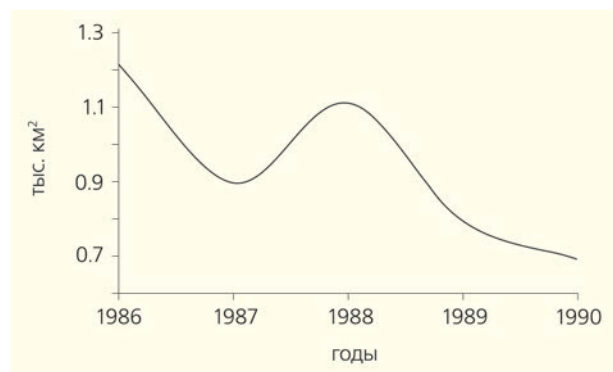
Таблица

Динамика уловов шпрота в Черном море (тыс. т) рыбаками Украины [16, 19] и России [19]

годы	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Украина	30.3	29.2	32.6	49.0	45.5	31.2	30.9	35.6	21.3	18.0	21.1
Россия	1.24	4.42	5.57	11.12	11.22	20.41	14.32	13.89	10.62	6.08	7.81



Доля илов на разных глубинах моря в Керченском предпроливье [20].



Площадь местообитания двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis* в Керченском предпроливье [21].

В донном сообществе Керченского предпроливья ведущая роль, как и на банке Тетис-2 в Каркинитском заливе, перешла от сестонофагов к детритофагам. Дисперсионный анализ влияния заиливания на динамику площади биоценоза полихеты *Terebellides stroemi* показал, что ее увеличение на 58–64% определяется именно этим фактором.

Справедливости ради следует заметить, что не только рыбаки приложили руку к уничтожению и смене видов донного населения на черноморском шельфе. Не меньшее «спасибо» за это следует сказать и местным властям, которые производят строительные работы (возведение причалов)

в акваториях старых и новых портов, углубляют фарватер и чистят судоходные каналы. Результаты этой деятельности, так называемые грунты дноуглубления, захораниваются на свалках морского шельфа — в зонах дампинга. Но «подвиги» человека в этой сфере морского природопользования — тема совсем другой истории.

После вхождения Крыма в марте 2014 г. в состав Российской Федерации протяженность береговой линии России в Черном море увеличилась на 911 км. И теперь от нас зависит восстановление торжества закона на этих акваториях и возвращение жизни в морскую стихию. ■

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект 14-50-00095.

Литература / Reference

1. Фащук Д.Я., Терентьев А.С., Жохова Н.В. Траловый промысел на шельфе Черного моря и его эколого-географические последствия. Проблемы региональной экологии. 2012; 5: 161–167. [Fashchuk D.Ya., Terentyev A.S., Zbohova N.V. Trawl fishery on the shelf of the Black Sea and its ecological and geographical consequences. Problems of Regional Ecology. 2012; 5: 161–167. (In Russ., Abstr. in Engl.)]
2. Фащук Д.Я., Куманцов М.И. Рыбный промысел Советской России и СССР в Черном море в первой половине XX века. Известия РАН: Серия географическая. 2017; 1: 147–160. [Fashchuk D.Ya., Kumantsov M.I. Fishery in Soviet Russia and the USSR in the Black Sea in the first half of the 20th century. Izvestiya RAN: Seriya Geograficheskaya. 2017; 1: 147–160. (In Russ., Abstr. in Engl.)] Doi:10.15356/0373-2444-2017-1-147-160.
3. Фащук Д.Я., Куманцов М.И. Рыболовство СССР в Черном море во второй половине XX века: период расцвета (1950–1988). Известия РАН: Серия географическая. 2017; 6. [Fashchuk D.Ya., Kumantsov M.I. The Soviet Fishery of the USSR in the Black Sea in the Second Half of the 20th Century: Golden Age (1950–1988). Izvestiya RAN: Seriya Geograficheskaya. 2017; 6. (In Russ., Abstr. in Engl.)]
4. Ivanov L.S., Beverton R.J.H. The fisheries resources of the Mediterranean. Part two: Black Sea. FAO Studies and Reviews. 1985: 60.
5. Трещев А.И. Интенсивность рыболовства. М., 1983. [Treshev A.I. Intensity of fishing. Moscow, 1983. (In Russ.)]
6. Баранов Ф.И. Техника промышленного рыболовства. М.; Л., 1933. [Baranov F.I. Commercial fishing technique. Moscow; Leningrad, 1933. (In Russ.)]
7. Максимов Н. Итоги тралового промысла в Черном море. Вестник рыбопромышленности. 1911: 12–16. [Maksimov N. Results of trawling in the Black Sea. Vestnik rybopromyshlennosti. 1911: 12–16. (In Russ.)]
8. Законы и инструкции, действующие в Западной части Черноморского бассейна. Одесса, 1913. [Laws and regulations in the Western part of the Black Sea basin. Odessa, 1913. (In Russ.)]
9. Гюльбадамов С.Б., Данилевский Н.Н., Самарянов А.Н. Траловый лов в Черном море. Рыбное хозяйство. 1950; 9: 5–13. [Gyulbadatov S.B., Danilevsky N.N., Samaryanov A.N. Trawling in the Black Sea. Fisheries. 1950; 9: 5–13. (In Russ.)]
10. Фащук Д.Я., Архипов А.Г., Шляхов В.А. Концентрация массовых промысловых рыб Черного моря на разных стадиях онтогенеза и факторы, ее определяющие. Вопросы ихтиологии. 1995; 35(1): 34–42. [Fashchuk D.Ya., Arkhipov A.G., Sbyakbov V.A. Concentration of mass commercial fishes of the Black Sea at different stages of ontogenesis and its determining factors. Journal of Ichthyology. 1995; 35(1): 34–42. (In Russ.)]
11. Чащин А.К. Основные результаты исследования пелагических ресурсов Азово-Черноморского бассейна. Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 1997; 43: 60–67. [Chashchin A.K. Main results of studies of pelagic resources in the Azov and Black Seas. Proceedings of the southern scientific research institute of marine fisheries and oceanography. 1997; 43: 60–67. (In Russ.)]
12. Самышев Э.З., Рубинштейн И.Г., Золотарев П.Н. и др. Изменчивость и структура бентоса Черного моря в условиях антропогенного воздействия. Антропогенные воздействия на прибрежно-морские экосистемы. М., 1986: 52–71. [Samyshev E.Z., Rubinshtein I.G., Zolotarev P.N. et al. The variability and structure of the benthos of the Black Sea under anthropogenic impact. Anthropogenic impacts on coastal-marine ecosystems. Moscow, 1986: 52–71. (In Russ.)]
13. Терентьев А.С. Влияние тралового промысла на донные сообщества. Подводные технологии и мир океана. 2006; 4: 26–36. [Terentyev A.S. Impact of trawl fishery on bottom communities. Underwater technology and world of ocean. 2006; 4: 26–36. (In Russ.)]
14. Зайцев Ю.П., Фесюнов О.Е., Синегуб И.А. Влияние донного тралового промысла на экосистему черноморского шельфа. Доклады АН Украины. 1992; 3: 156–158. [Zaitsev Y.P., Fesyunov O.E., Sinegub I.A.

- Impact of bottom trawl fishery on the Black Sea ecosystem. Contributions of the Academy of Sciences of Ukraine. 1992; 3: 156–158. (In Russ.)]
15. Терентьев А.С. Влияние антропогенного заиления дна на промысловые скопления мидий на банке «Тетис-2» (Каркинитский залив Черного моря). Гидробиологический журнал. 2003; 39(2): 82–87. [Terentyev A.S. Influence of anthropogenic siltation of the bottom on commercial accumulations of mussels on the bank «Tethys-2» (Karkinitzky Gulf of the Black Sea). Hydrobiological Journal. 2003; 39(2): 82–87. (In Russ.)]
 16. Болтачев А.Р. Траловый промысел и его влияние на донные биоценозы Черного моря. Морской экологический журнал. 2006; 5(3): 45–55. [Boltachev A.R. Trawl fishery and its effect on the bottom biocenoses in the Black Sea. Marine ecological journal. 2006; 5(3): 45–55. (In Russ.)]
 17. Зайдинер Ю.И., Ландарь Е.А., Попова Л.В., Фильчагина И.Н. Рыбодобывающая подотрасль российского Азово-Черноморья в 90-х годах. Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: Сборник научных трудов (1996–1997 гг.). Ростов-на Дону, 1998: 412–420. [Zaydiner Yu.I., Landar EA., Popova L.V., Filchagina I.N. The fish sub-sector of the Russian Azov-Black Sea region in the 90s. The main problems of fisheries and protection of waterbodies with fisheries in the Azov and Black sea basin: collected articles (1996–1997). Rostov-on-Don, 1998: 412–420. (In Russ.)]
 18. Луц Г.И., Дахно В.Д., Надолинский В.П. Состояние запасов промысловых рыб Черного моря в пределах экономической зоны России. Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна: Сборник научных трудов (1993–1995 гг.). Ростов-на Дону, 1997: 174–180. [Luts G.I., Dakbno V.D., Nadolinsky V.P. State of the stocks of commercial fish of the Black Sea within the economic zone of Russia. The main problems of fisheries and protection of waterbodies with fisheries in the Azov and Black sea basin: collected articles (1993–1995). Rostov-on-Don, 1997: 174–180. (In Russ.)]
 19. Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей. Ред. В.И.Еремеев, А.В.Гаевская, Г.Е.Шульман, Ю.А.Загородняя. Севастополь, 2011. [Biological resources of the Black Sea and Sea of Azov. Eds V.N.Eremeev, A.V.Gaevskaya, G.E.Shulman, Ju.A.Zagorodnyaya. Sevastopol, 2011. (In Russ.)]
 20. Терентьев А.С. Изменение площади донных биоценозов в результате заиления Керченского предпроливья Черного моря. Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2010; 48: 15–23. [Terentyev A.S. Change of bottom biocenoses area as a result of silting in the area before the Black Sea Kerch Strait. Proceedings of the Southern scientific research institute of marine fisheries and oceanography. 2010; 48: 15–23. (In Russ.)]
 21. Терентьев А.С. Сукцессия биоценоза *Mytilus galloprovincialis* в биоценоз *Terebellides stroemi* в результате заиления Керченского предпроливья Черного моря. Материалы V Международной конференции «Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона» (Керчь, 8–9 октября 2009 г.). 2010: 44–49. [Terentyev A.S. Succession of *Mytilus galloprovincialis* biocenosis into the *Terebellides stroemi* biocenosis as a result of silting of the area before the Kerch Strait of the Black Sea Current problems of the Azov-Black Sea Region ecology: Materials of V International Conference (Kerch, 8–9 October 2009). 2010: 44–49. (In Russ.)]

Sprat of the Black Sea: bottom trawl fishery and its consequences

D.Ya.Fashchuk
Institute of Geography, RAS (Moscow, Russia)

The history of trawl fishery development on the Black Sea shelf until the beginning of the XXI century has been analyzed. The influence of tens of thousands of carried out annual bottom trawls on the zoobenthos communities in the northwestern part of the sea (1978–1990), in the southwestern Crimean shelf (1990th – early 2000s), and on the shelf of the Kerch pre-strait region (1986–1990) are shown. The facts of bottom silting in the fishing areas, which caused a transformation, and in some cases (southwestern Crimean shelf) full degradation of the benthic communities, are established.

Key words: Black Sea, trawl fishery, sprat, bottom silting, zoobentic biocenoses.

Мангровые леса

К 30-летию Российско-Вьетнамского
Тропического центра

кандидат биологических наук **В.В.Бобров**

*Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН
(Москва, Россия)*





Мангровые леса в тропиках — своеобразная растительная формация, которая развивается на морских побережьях и там, где в моря и океаны впадают крупные реки. В статье рассказывается о наблюдениях, проведенных автором в заповеднике «Кан Зьо», расположенном на юге Вьетнама. Описываются особенности формирующих мангры деревьев, их адаптации, позволившие приспособиться к смене природных условий под постоянным воздействием приливов и отливов. Приводятся данные по экологии наиболее интересных животных заповедника: илистых прыгунов, манящих крабов, макак-крабоедов. Особое внимание уделено пресмыкающимся: крокодилам (поскольку «Кан Зьо» — одно из немногих мест в стране, где можно наблюдать этих животных в дикой природе) и широко распространенным во Вьетнаме видам ящериц.

Ключевые слова: мангры, Тропический центр, биосферный заповедник «Кан Зьо», Вьетнам.

Межправительственное соглашение об организации Советско- (ныне — Российско-) Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра (Тропического центра) было подписано 7 марта 1987 г. Создавался он не только для практических целей (испытаний тропикостойкости материалов и техники, разработки средств защиты от коррозии, старения и биологических повреждений техники; исследования отдаленных медико-биологических и экологических последствий массированного применения армией США гербицидов и дефолиантов во время войны с Вьетнамом; изучения особо опасных инфекционных болезней и т.д.), но и для биологических и экологических фундаментальных исследований [1]. Более 30 лет назад отечественные зоологи и ботаники впервые получили возможность круглогодично изучать самые богатые на земном шаре экосистемы тропиков. Основные стационары и места работ комплексных зоолого-ботанических экспедиций находились в зональных муссонных сезонно-листопадных лесах (о работе в зональных экосистемах рассказано в прошлой публикации, посвященной изучению ящериц Вьетнама [2]). Но есть еще одна очень интересная экосистема, исследованию которой было уделено не слишком много внимания в рамках научных работ Тропического центра ввиду того, что ее биоразнообразие не столь богато по сравнению с зональными тропическими муссонными лесами. Речь о мангровых зарослях.

Там, где в тропиках морские берега защищены от огромных волн прибоя близлежащими островами или коралловыми рифами, или там, где в моря и океаны впадают крупные реки, развивается одна из своеобразнейших растительных формаций — мангровые леса, называемые также мангровыми зарослями или просто манграми. Их распростра-

© Бобров В.В., 2017

Вестник из экспедиции



Мангровые леса во время прилива (вверху) и отлива.

Здесь и далее фото автора

нение не ограничено областями, где господствует тропический климат; там, где этому благоприятствуют теплые морские течения, мангры произрастают севернее Северного или южнее Южного тропика. В Северном полушарии они распространены до Бермудских о-вов и в Японии до 32°с.ш., а в Южном — вдоль берегов Южной Австралии и Новой Зеландии даже до 38°ю.ш. Однако у берегов, омываемых холодными течениями, они не формируются. Так, на западном побережье Южной Америки, климат которого находится под влиянием холодного Перуанского течения, мангры появляются лишь около экватора.

Чтобы познакомиться с мангровым лесом, была организована экспедиция в биосферный заповедник «Кан Зью», который находится в пределах городской черты Хошимина (Сайгона) — крупнейшего населенного пункта Вьетнама, протянувшегося на 60 км с севера на юг и на 30 км с запада на восток. В Хошимине расположена главная контора Южного отделения Тропического центра, отсюда мы совершаем экспедиционные выезды в различные особо охраняемые природные территории, в которых проводятся регулярные исследования. В этот раз мы направились на юг, к побережью Южно-Китайского моря (во Вьетнаме называемого Восточным).

Ехать от главной конторы до заповедника около двух часов. По пути надо преодолеть несколько мостов и паромных переправ через полноводные реки Вам Ко и Сайгон, несущие воды в океан. В заповеднике нас поселили в домик на сваях. Все жилые и административные постройки соединены деревянными помостами, также стоящими на сваях, так как почва в этих местах зыбкая и вязкая, совершенно непригодная для хождения по ней, поскольку все побережье, поросшее мангровыми лесами, регулярно заливадается во время ежедневного прилива. И здесь откладывается вязкий илистый осадок... Заповедник «Кан Зью» знаменит тем, что он первым во Вьетнаме получил статус биосферного. Таким образом был отмечен труд вьетнамских ученых, которые восстановили экосистему, полностью разрушенную во время войны с США.

Формации мангров флористически бедны: образующие их



Дом на сваях в заповеднике Кан Зью.

деревья относятся к нескольким родам — *Rhizophora*, *Brugiera*, *Avicennia*, *Sonneratia*. Как это контрастирует с экосистемой тропических (немангровых) лесов, где счет видов деревьев идет на сотни! Все деревья мангров относятся к галофитам (от древнегреч. αλξ — соль и φυτον — растение), т.е. обладают адаптациями, способствующими обитанию на субстратах, которые содержат большое количество солей. Для них характерны кожистые, жесткие листья, у некоторых видов на них расположены солевыводящие железки, позволяющие растению избавляться от избытка солей.

Деревья здесь находятся под постоянным воздействием приливов и отливов, поэтому приспособились к этой смене условий, «выставив» по бокам



Ходульные корни деревьев мангров, которые обнажаются во время отлива.

стволов ходульные корни. Во время прилива лес ничем не отличается по внешнему виду от привычного нам в умеренных широтах. Когда же вода отступает, мангры приобретают весьма забавный вид — все деревья стоят на этих «ходулях». Роль этих ходульных корней в существовании деревьев мангрового леса описал один из главных знатоков растительности тропиков Г. Вальтер: «Корневые чечевички этих ходульных корней, или пневматофор, пронизаны настолько мелкими отверстиями, что они пропускают только воздух, но не воду. Во время прилива, когда пневматофоры полностью покрываются водой, кислород, содержащийся в межклетниках, расходуется на дыхание; создается пониженное давление, так как углекислота, легко растворяющаяся в воде, улетучивается. Как только при отливе корни появляются над водой, давление выравнивается, и корни начинают засасывать воздух. Таким образом, в пневматофорах происходит периодиче-

ское изменение содержания кислорода, синхронное ритму приливов и отливов» [3, с.176–178].

Другое приспособление к существованию у деревьев мангров — явление живорождения. Семена их прорастают непосредственно на материнском растении (длина проростков 0.5–1 м) и только затем отделяются. Падая вниз, они либо втыкаются в ил тяжелым заостренным нижним концом, либо, подхваченные водой, переносятся на другие участки побережий, где и укореняются в постоянно обводненной почве. Поскольку развитие мангровых растений происходит при периодических затоплениях (из-за чередования приливов и отливов), можно выявить смену господствующих видов, обусловленную конкретными особенностями местообитаний, главным образом — концентрацией солей. Например, представители рода *Avicennia* самые солеустойчивые среди всех мангровых растений. Напротив, растения рода *Sonneratia*

не выносят концентрации солей большей, чем та, которую имеет морская вода.

Кроме типичных мангровых деревьев для этой экосистемы характерно такое интересное растение, как мангровая пальма нипа (*Nypa fruticans*) из семейства пальм (Arecaceae), которая образует густые заросли, протянувшиеся на сотни километров в эстуариях и на илистых берегах рек от Шри-Ланки до Австралии. Облик нипы неповторим: ее выделяют пучки ярко-зеленых блестящих листьев с мощными цилиндрическими черешками. Нипа играет значительную роль в жизни туземного населения. Ее используют для получения вина, сахара, спирта, соли, волокна. Листья нипы — превосходный кровельный материал, молодые листочки идут на плетения, а сухие черешки — топливо и поплавок для рыболовных сетей.

Мангровые леса — своеобразный мир с особыми, только ему присущими формами растительной и животной жизни. В манграх «пересекаются дороги» наземных и морских обитателей. По кронам деревьев лесные жители проникают к морю; по илистым отмелям в сторону суши продвигаются, насколько позволяет соленость воды, морские животные.

Самое характерное животное мангрового леса можно обнаружить во время отлива, когда



Пальма нипа — обычный представитель растительного мира мангровых зарослей.



Мангровый бычок.

обнажаются многочисленные ходульные корни. На этих-то корнях и любят проводить время забавные рыбки (длина их туловища достигает не более 25 см) с большой крутолобой головой, с выдвигаемыми, выпуклыми, как у лягушки, глазами — илстые прыгуны (*Periophthalmus schlosseri*), представители одноименного семейства (Periophthalmidae) отряда окунеобразных (Perciformes). Самое удивительное, что эти рыбы значительную часть времени проводят на суше. Кислород они могут усваивать не только в воде, с помощью жабр, но и непосредственно из атмосферного воздуха — через кожу и благодаря специальному наджаберному органу дыхания [4].

Во время отлива илстые прыгуны видны в манграх повсюду. Опираясь на грудные плавники, как на костыли, рыбки быстрыми прыжками передвигаются по илу или карабкаются вверх по мангровым деревьям; так они могут ползком подняться на высоту более человеческого роста. Илстые прыгуны очень пугливы и при появлении человека мгновенно исчезают в норке. Защитная окраска (серо-бурый фон с темными пятнами) позволяет им уберечься от хищных птиц. Притаившегося на коряге илстого прыгуна очень трудно заметить, так хорошо он сливается с общим фоном. Большую опасность для илстых прыгунов представляют цапли, которые бродят по илу и длинным клювом ловят греющихся на солнце рыбок.

На илстых прыгунов очень похожи и внешне, и по поведению многочисленные в «Кан Зью» мангровые бычки (*Boleophthalmus boddarti*) из семейства бычковых (Gobiidae), которые ведут сходный образ жизни.

Приливоно-отливная полоса тропических морей (в том числе и мангров) населена своеобразными животными, так называемыми манящими крабами (род *Uca*), которые относятся к отряду десятиногих (Decapoda) класса ракообразных

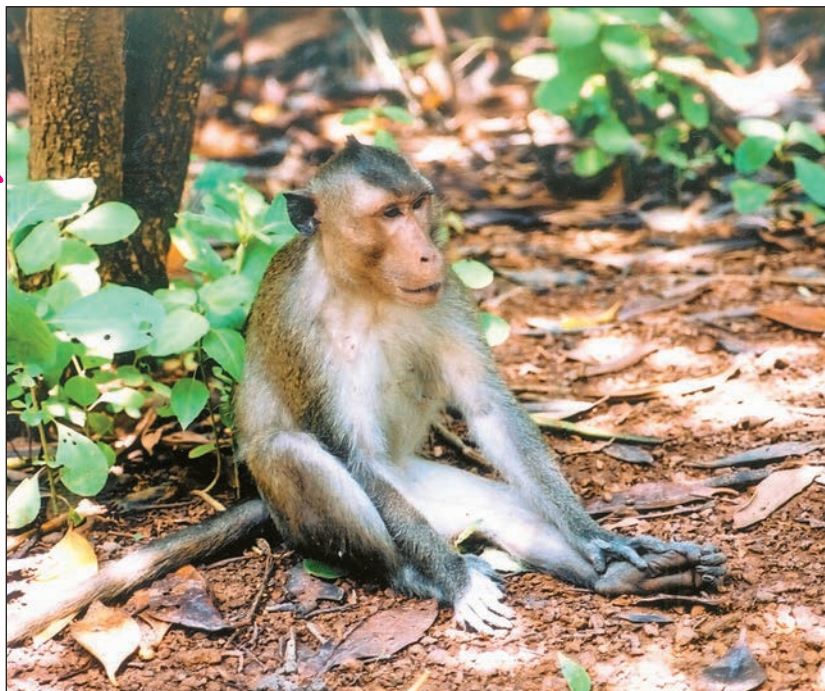


Манящий краб.

(Crustacea). Это мелкие (ширина панциря 1–3 см) крабики, живущие на илстом грунте большими колониями: на одном квадратном метре нередко насчитывается 50 и более их нор, в каждой живет один краб. Эти животные замечательны тем, что самцы своей непропорционально большой клешней совершают сложные манящие движения, ритмично поднимая и опуская ее. У самцов цвет крупной клешни обычно резко контрастирует с цветом карапакса, а также грунта, что делает движение клешней еще более заметными. Во-первых, таким образом самцы отпугивают других самцов, сообщая им, что данный участок занят; если какой-нибудь самец не обратит внимания на предупреждение и вторгнется на чужую территорию, между ее хозяином и пришельцем возникнет схватка. Во-вторых, в период спаривания манящие движения самцов привлекают самок.

Большинство крабов — хищники, они находят различных животных (моллюсков, иглокожих), разрывают или дробят добычу клешнями, затем перетирают ее жвалами и поедают. В случае опасности все крабы дружно и молниеносно скрываются в убежищах, причем замечают человека на расстоянии порядка 10 м и оповещают своих соседей об опасности, постукивая клешнями о грунт. Сигнал принимается даже в том случае, когда крабы не видят друг друга.

Крабы должны быть осторожными — на них здесь много охотников. Прежде всего это макаки-крабоеды (*Macaca fascicularis*) — довольно крупные обезьяны, достигающие в длину 65 см, с белыми усами и бакенбардами у взрослых и длинным, до полуметра, хвостом. Как только вы ступите за забор, окружающий заповедник, сразу попадете в окружение хамоватых макак. Но не бойтесь, это они с виду такие грозные, просто привыкли, что их здесь все подкармливают, поэтому ходят вокруг посетителей, а некоторые даже пытаются запрыгнуть на плечо. Но и не зевайте, не оставляйте



Макак-крабод. В заповеднике эти животные совершенно не боятся посетителей.

на скамейке фотоаппарат или очки — мигом стащат, и возмещать убытки администрация не будет. Живут эти обезьяны большими семьями, ведут как древесный, так и наземный образ жизни. Активность у макак дневная. Питаются они разнообразными растительными кормами и различными животными, в том числе и мелкими позвоночными.

Свое название эти обезьяны получили не случайно: крабы — их любимое лакомство. Выползающих на берег ракообразных обезьяны выслеживают, сидя на дереве, на берегу реки или моря. Затем они осторожно спускаются на землю и подкрадываются к крабам с камнем в руках, ударами разбивают панцирь своей жертвы и поедают ее.

Конечно, меня, как герпетолога, интересуют больше всего пресмыкающиеся. По богатству герпетофауны «Кан Зьо» не идет ни в какое сравнение с заповедниками, расположенными в зональных экосистемах. В «Кукфыонге» (самом богатом по видовому составу ящериц заповеднике Северного Вьетнама) насчитывается 24 вида [5], в «Кат Тьен» и «Фукуок» (заповедниках Южного Вьетнама) — более 20 видов [6, 7]. В «Кан Зьо» же можно обнаружить только широко распространенные по территории



Калот-кровосос (слева) и длиннохвостый солнечный сцинк.



Сиамские крокодилы. В заповеднике «Кан Зьо» их можно наблюдать в естественной среде обитания.

горий) Вьетнама выдают свое присутствие характерным криком «та-ке, та-ке». Калоты-кровососы (*Calotes versicolor*) — обычные обитатели населенных пунктов сельской местности Вьетнама — с важным видом восседают прямо на перилах деревянных дорожек, соединяющих домики. Из самого разнообразного в фауне страны семейства ящериц — сцинковых (*Scincidae*) — в «Кан Зьо» можно наблюдать только приспособившихся к жизни рядом с человеком солнечных сцинков из рода *Eutropis*, как будто специально позирующих на любом достаточно твердом клочке суши. О ящерицах этих видов, об их образе жизни и особенностях поведения я рассказал в предыдущей публикации, посвященной Вьетнаму [2].

Во Вьетнаме обитают крокодилы двух видов: гребнистый (*Crocodylus porosus*) и сиамский (*C.siamensis*) [8]. Гребнистый — самый крупный (до 7 м в длину) представитель отряда и один из немногих крокодилов, которые хорошо приспособились к жизни в соленых водах. Он может представлять серьезную угрозу для неосторожных купальщиков: бывали случаи, когда этих крокодилов обнаруживали в море, в сотнях километров от ближайшего побережья. Сиамский крокодил гораздо меньше своего сородича, длиной не более 3 м. В море он не заплывает, но по берегам проток в «Кан Зьо» его можно увидеть регулярно.

Все виды крокодилов мировой фауны находятся под угрозой исчезновения, и во всех странах, где они обитают, эти животные охраняются законом. Не исключение и Вьетнам. В дикой природе



здесь крокодилов почти не осталось; живут они в основном на фермах, где их разводят и на потеху туристам, и для получения кожи, используемой для различных поделок (бумажников, брелоков и т.п.). Но заповедник «Кан Зьо» — одно из очень немногих мест во Вьетнаме, где крокодилов можно наблюдать не из-за барьеров арен над головами многочисленных посетителей, а в их естественной среде. Понятно, что там, где они вальяжно развалились на берегу протоки, на утлой лодочке вас не будут катать. Однако во многих местах за-

поведника проложены на высоких сваях деревянные настилы (такие же, как соединяющие жилые домики), по которым можно ходить, наблюдая крокодилов с достаточно близкого расстояния и не опасаясь при этом за свою жизнь.

Конечно, мангровый лес не сравнить с тропическим дождевым лесом по богатству фауны и флоры. Но его мир настолько уникален, что, не посетив эту необычную экосистему, вы не сможете с полной уверенностью сказать: «Да, я прочитал “Книгу джунглей”». ■

Полевые исследования в заповеднике «Кан Зьо» были поддержаны Российско-вьетнамским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром.

Литература / References

1. Бочаров Б.В. Предыстория Тропцентра. М., 2002. [Bocharov B.V. Prequel of Tropcenter. Moscow, 2002. (In Russ.)]
2. Бобров В.В. В царстве летучих драконов. Природа. 2016; 8: 60–68. [Bobrov V.V. In the Kingdom of Flying Dragons. Priroda. 2016; 8: 60–68. (In Russ.)]
3. Вальтер Г. Тропические и субтропические зоны. Растительность земного шара: эколого-физиологическая характеристика. М., 1968; 1. [Walter H. Tropical and Subtropical Zones. Vegetation of the Earth: The Eco-Physiological Conditions. Moscow, 1968; 1. (In Russ.)]
4. Шубников Д.А. Семейство илестые прыгуны (Periophthalmidae). Жизнь животных. В 6 т. Ред. Т.С.Расса. М., 1971; 4(1): 528–529. [Shubnikov D.A. Periophthalmidae. Rassa T.S. (ed.) Animal life. In 6 volumes. Moscow, 1971; 4(1): 528–529. (In Russ.)]
5. Бобров В.В. Ящерицы Национального парка Кукфьонг (Северный Вьетнам). Совр. герпетология. 2003; 2: 12–23. [Bobrov V.V. Lizards of Cuc Phuong national park (Northern Vietnam). Current Studies in Herpetology. 2003; 2: 12–23. (In Russ.)]
6. Бобров В.В. Состав фауны ящериц (Reptilia, Sauria) различных экосистем южного Вьетнама. Исследования наземных экосистем Вьетнама. Ред. Л.П.Корзун, В.В.Рожнов, М.В.Калякин. М.; Ханой, 2003: 149–166. [Bobrov V.V. Fauna of Lizards (Reptilia, Sauria) of Some Ecosystems of Southern Vietnam. Studies of Land Ecosystems of Vietnam. Korzun L.P., Rozhnov V.V., Kalyakin M.V. (eds). Moscow; Hanoi, 2003: 149–166. (In Russ.)]
7. Бобров В.В. Ящерицы Национального парка Фу Куок. Материалы зоолого-ботанических исследований на острове Фу Куок, Южный Вьетнам. Ред. М.В.Калякин. М.; Ханой, 2011; 68–79. [Bobrov V.V. Lizards of the Phu Quoc National Park. Materials of Zoological and Botanical Studies in Phu Quoc Island, Southern Vietnam. Kalyakin M.V. (ed.) Moscow; Hanoi, 2011; 68–79. (In Russ.)]
8. Dao Van Tien. On the identification of the Vietnamese turtles and crocodiles. Tap Chi Sinh Vat Hoc. 1978; 16(1): 1–6. (in Vietnamese).

Mangroves

To 30th Anniversary of the Russian-Vietnamese Tropical Center

Bobrov V.V.

A.N.Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS (Moscow, Russia)

The mangroves are peculiar plant formation that develops in tropics along the sea coast protected from surf waves by nearby islands or coral reefs, or in the regions where the large rivers flow into the seas and oceans. Observations made by the author in “Can Gio” reserve are represented in this article. The reserve is located in the south of Vietnam. Features of mangrove tree and their adaptations for environmental changes under permanent inflows and tides are described. Data on ecology of the most interesting animals of the reserve — Periophthalmus, fiddler crabs, and crab-eating macaques — are provided. Special attention is made to reptiles, to crocodiles, as “Can Gio” is one of the few places in Vietnam where it is possible to observe these animals in the wild nature, and to widespread in the country species of lizards.

Keywords: mangroves, Tropical Center, Can Gio Biosphere Reserve, Vietnam.

Нитрогеназная активность в бактериально-микотических сообществах, ассоциированных с еловыми лубоедами

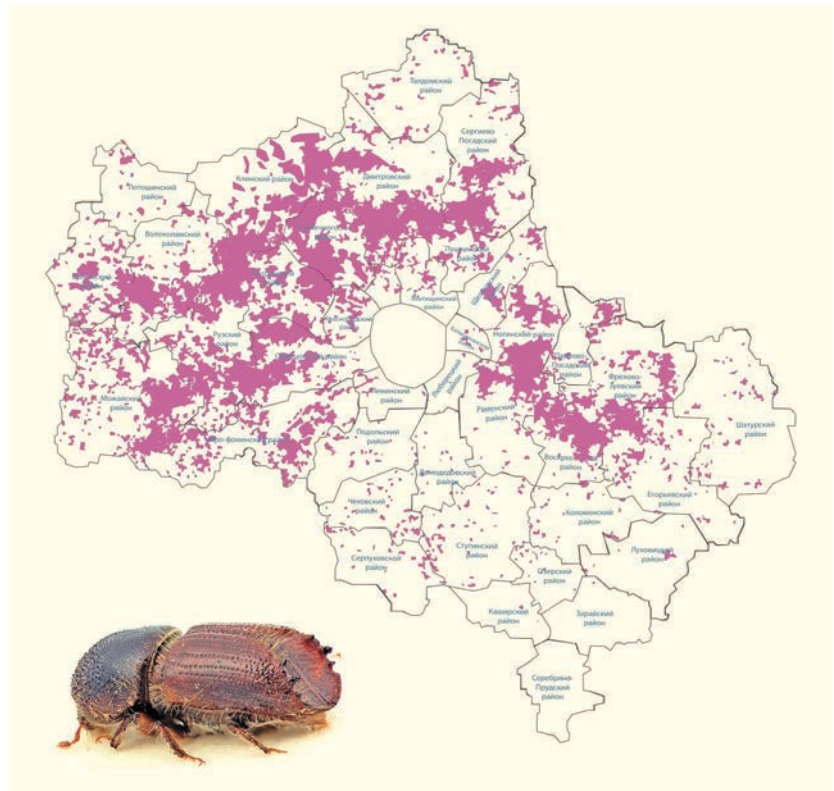
кандидат биологических наук М.В.Вечерский¹,
кандидат биологических наук Т.А.Кузнецова¹, А.А.Степаньков¹
¹Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н.Северцова РАН (Москва, Россия)

Жуки-короеды питаются древесной флоэмой, которая очень бедна доступным азотом. На примере двух видов елового лубоеда (*Dendroctonus micans* и *Hylurgops palliatus*) было показано, что стенки их маточных ходов колонизированы бактериально-микотической ассоциацией, способной к активной азотфиксации на уровне более 1 нмоль C_2H_4 /г·ч. Численность diaзотрофного звена этого сообщества составляла $8 \cdot 10^6$ КОЕ/г. Деятельность такой ассоциации обогащает материал стенок хода доступным азотом и делает его более пригодным в качестве корма для имаго и личинок еловых лубоедов.

Ключевые слова: еловые лубоеды, азотфиксация, нитрогеназная активность, азотфиксирующие бактерии, бактериально-микотические ассоциации.

Жуки-короеды (Scolytidae) широко распространены в лесных массивах всех климатических зон. Эти насекомые питаются флоэмой (частью древесного ствола, расположенной непосредственно под корой), обширные повреждения которой могут приводить к гибели дерева. Некоторые из короедов (еловый лубоед, короед-типограф, полиграф уссурийский и многие другие) оказывают существенное средообразующее воздействие, коренным образом меняя видовой состав древесного яруса. В отдельных случаях одновременно могут погибнуть деревья на площади в десятки и даже сотни гектаров. Такое поражение лесобразующих пород — трудно решаемая проблема народного хозяйства.

Экология короедов представляет большой интерес, поскольку эти насекомые потребляют пищу с экстремально низким содержанием доступного азота [1]. Например, еловый лубоед успешно размножается во флоэме,



Карта-схема очагов поражения короедом-типографом лесов Московской обл. в 2014 г., когда площадь поражения составила 65 тыс. га. По оценкам лесопатологов, пик эпидемии пришелся на 2012–2013 гг., к 2016 г. насекомые уничтожили 74 тыс. га лесов, или 3.8% лесного фонда региона. Данные взяты с сайта Комитета лесного хозяйства Московской области (klh.mosreg.ru).

© Вечерский М.В., Кузнецова Т.А., Степаньков А.А., 2017



Жуки-короеды — *Hylurgops palliatus* (вверху слева; фото U.Schmidt) и *Dendroctonus micans* (справа; фото К.М.Макарова), а также потеки смолы с буровой мукой у входного отверстия, проделанного лубоедом *D.micans* в коре ели восточной (внизу; фото G.San Marin). Длина *H.palliatus* — 2.5–3.2 мм, *D.micans* — 5–7 мм.

содержащей всего 0.4% общего азота [2]. Азот необходим животным для построения белков и нуклеиновых кислот. В условиях его дефицита животные перестают размножаться, теряют в весе и погибают. Однако жуки-короеды успешно существуют на таком корме. Этот феномен принято объяснять симбиотическими отношениями с фитопатогенными грибами родов *Entomocorticium*, *Ophiostoma*, *Grosmannia*, заселяющими флоэму пораженных короедами деревьев. Споры этих грибов заносит сама матка на своем теле [3]. Далее грибы прорастают, разрушают древесину и наращивают свою биомассу. Все это время и имаго, и личинки питаются материалом маточного (и личиночного)

ходов — флоэмой, обогащенной грибным мицелием и, соответственно, относительно богатой азотом [3, 4]. Показано, что наличие гриба увеличивает содержание азота во флоэме в полтора-два раза, что позволяет считать такой корм приемлемым для питания [5]. Однако грибы сами по себе не способны увеличивать количество азота в субстрате. Более того, они неизбежно теряют некоторое количество азота с аммиаком в процессе аммонификации. Поэтому вопрос снабжения азотом системы гриб—короед остается открытым. В то же время известны сообщества, развивающиеся на бедных азотом субстратах благодаря присутствию азотфиксирующих (дiazотрофных) бактерий. Эти микроорганизмы с помощью фермента нитрогеназы способны превращать азот воздуха в органический азот белков и нуклеиновых кислот. Именно благодаря diaзотрофам, населяющим желудочно-кишечный тракт, существуют такие известные потребители древесины, как термиты [6]. Поэтому ученые пытались обнаружить бактерий-азотфиксаторов в кишечнике имаго, личинок и в буровой муке некоторых короедов. Однако полученные противоречивые данные не позволили сделать вывод о значимости кишечной азотфиксации для насекомого [1, 2]. Мы же предположили, что основная фиксация азота осуществляется не внутри насекомого (как у термитов), а снаружи — благодаря устойчивой ассоциации бактерий-diazотрофов с грибом, позволяющей последнему наращивать азотную биомассу. Существование трофической системы азотфиксатор—гриб—короед могло бы полностью объяснить вопросы азотного питания этих насекомых.

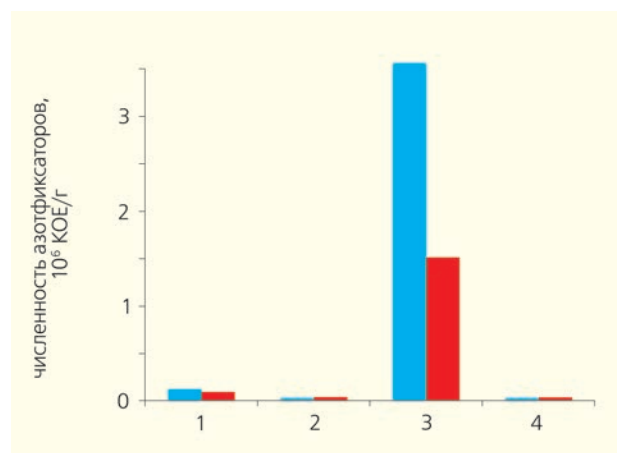
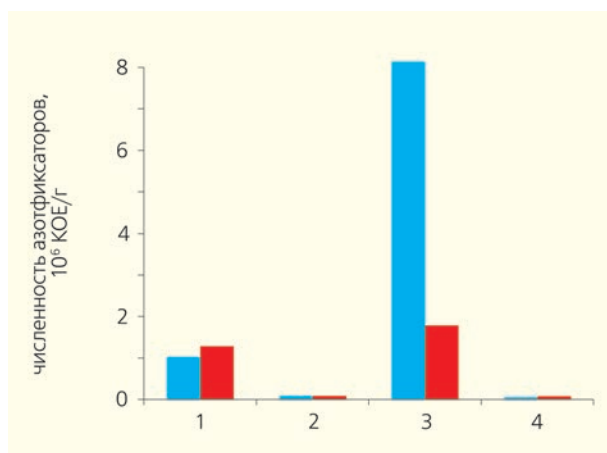
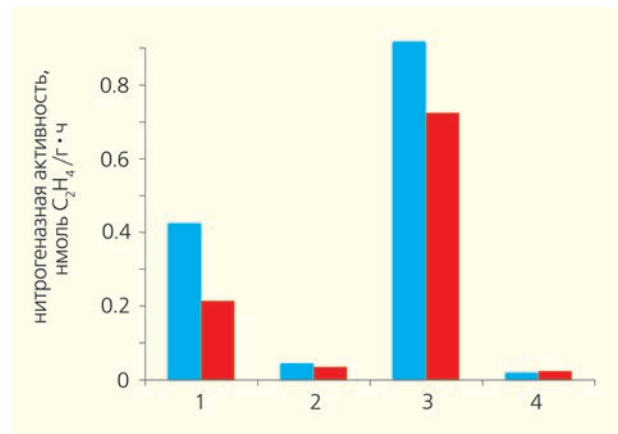
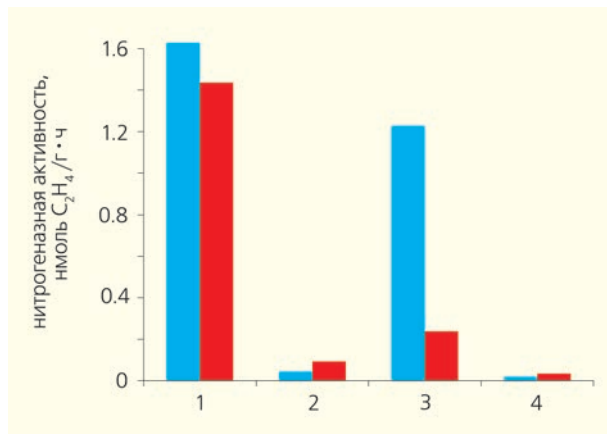
Для подтверждения этой гипотезы мы измерили с помощью ацетиленового метода актуальную нитрогеназную активность в имаго, личинках, буровой муке, а также в материале стенок маточного и личиночного ходов ели, одновременно пораженной двумя видами короедов — большим еловым лубоедом (*Dendroctonus micans*) и малым еловым лубоедом (*Hylurgops palliatus*). Также в этих субстратах был проведен учет численности азотфиксирующих микроорганизмов методом посева

на селективную среду Федорова—Калининской. Изучаемые насекомые — типичные вредители лесных массивов Московской обл. Они наиболее активны поздней весной, когда оплодотворенная самка проникает под кору ели и прогрызает во флоэме разветвленный маточный ход, в стенках которого откладывает яйца. Древесную труху и экскременты жуки удаляют из хода в форме буровой муки. Через короткое время из яиц вылупляются личинки, которые прогрызают более тонкие ходы. В течение одного сезона при благоприятных условиях жуки могут дать три поколения потомства.

Несмотря на различия в морфологии и экологии этих двух видов лубоедов, для них были отмечены общие закономерности. Хотя нитрогеназная активность в имаго и личинках была существенной — до 1.6 нмоль $C_2H_4/г \cdot ч$, она все же на несколько порядков уступала той активности, которая наблюдалась у термитов (>100 нмоль $C_2H_4/г \cdot ч$) [7]. Это подтверждает наше предположение о несущественном влиянии эндогенной азотфиксации в питании этих насекомых. Высокая активность была отмечена

в стенках маточных ходов, зараженных фитопатогенными грибами (до 1.2 нмоль $C_2H_4/г \cdot ч$). Уровень азотфиксации был максимален на начальном этапе колонизации (в фазу маточной активности) и снижался на протяжении месяца (в фазу личиночной активности). В буровой муке (продукте переработки материала хода) нитрогеназная активность практически отсутствовала (<0.05 нмоль $C_2H_4/г \cdot ч$). Это может говорить о том, что азотфиксаторы входят в сложное бактериально-микотическое сообщество стенок хода, которое разрушается после механического перемалывания. В стенках ненарушенного маточного хода фитопатогенные грибы усваивают биомассу diaзотрофов, благодаря чему становятся питательным субстратом для короэдов.

Из материала хода были успешно выделены микроорганизмы-азотфиксаторы, что подтверждает бактериальную природу привнесенного во флоэму азота. Количество diaзотрофов в материале хода было значительно больше, чем в буровой муке. Для материала хода *H.palliatius* их численность достигала $3 \cdot 10^6$, а для *D.micans* — $8 \cdot 10^6$ колоний образующих единиц на грамм (КОЕ/г). Эта



Нитрогеназная активность (вверху) и численность бактерий-азотфиксаторов в субстратах, ассоциированных с *D. micans* (слева) и *H. palliatius*. 1 — имаго; 2 — буровая мука; 3 — материал хода; 4 — контроль. Синими столбиками показано маточная активность, красными — личиночная.

величина характерна для сообществ, высоко зависимых от diaзотрофов. Отметим, что численность азотфиксаторов в материале хода была максимальна в начальный период колонизации и снижалась более чем в два раза в фазу личиночной активности. Кроме того, полученные результаты хорошо коррелируют с величиной актуальной азотфиксации, которая демонстрировала аналогичную зависимость. В кшичечнике короедов численность азотфиксаторов была намного ниже, а в буровой муке diaзотрофы практически отсутствовали. Последнее может быть связано с невозможностью существования данных азотфиксаторов вне ассоциации с фитопатогенными грибами.

Таким образом, было показано, что в бактериально-микотическом сообществе стенок маточных ходов двух видов лубоедов происходит накопление азота благодаря микробной азотфиксации. Высока вероятность, что отношения между грибом и азотфиксаторами носят мутуалистический характер, поскольку в буровой муке, лишённой живого мицелия, уровень азотфиксации и численность азотфиксаторов крайне малы. Личинки и имаго ксилофагов потребляют материал хода (луб и бактериально-микотическую биомассу), обогащенный азотом, и получают возможность формировать свои белки и нуклеиновые кислоты. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-04-01726).

Литература / References

1. Morales-Jiménez J., Zúñiga G., Villa-Tanaca L., Hernández-Rodríguez C. Bacterial community and nitrogen fixation in the red turpentine beetle, *Dendroctonus valens* LeConte (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Microb. Ecol.* 2009; 58(4): 879–891. Doi:10.1007/s00248-009-9548-2.
2. Bridges J.R. Nitrogen-fixing bacteria associated with bark beetles. *Microb. Ecol.* 1981; 7(2): 131–137. Doi:10.1007/BF02032495.
3. Goodsmán D.W., Erbilgin N., Lieffers V.J. The impact of phloem nutrients on overwintering mountain pine beetles and their fungal symbionts. *Environ. Entomol.* 2012; 41(3): 478–486. Doi:10.1603/EN11205.
4. Labr E.C., Krokene P. Conifer stored resources and resistance to a fungus associated with the spruce bark beetle *Ips typographus*. *PLoS One.* 2013; 8(8): e72405. Doi:10.1371/journal.pone.0072405.
5. Bleiker K.P., Six D.L. Dietary benefits of fungal associates to an eruptive herbivore: potential implications of multiple associates on host population dynamics. *Environ. Entomol.* 2007; 36(6): 1384–1396. Doi:10.1603/0046-225X(2007)36[1384:DBOFAT]2.0.CO;2.
6. Cleveland L.R. The ability of termites to live perhaps indefinitely on a diet of pure cellulose. *Biol. Bull.* 1925; 48: 289–293. Doi:10.2307/1536574.
7. Вечерский М.В., Костина Н.В., Горленко М.В. и др. Особенности азотфиксации у термитов *Reticulitermes lucifugus*. *Известия РАН. Серия биологическая.* 2006; 5: 522–527. [Veberskii M.V., Kostina N.V., Gorlenko M.V. et al. Specific features of nitrogen fixation in the termite *Reticulitermes lucifugus*. *Biol. Bull.* 2008; 35(5): 446–451. Doi:10.1134/S1062359008050026.]

Nitrogen-fixing activity of fungal-bacterial complexes associated with bark beetles

M.V.Vecherskii¹, T.A.Kuznetsova¹, A.A.Stepan'kov¹

¹A.N.Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS (Moscow, Russia)

Bark beetles feed on wood phloem, which is extremely poor in available nitrogen. The walls of egg galleries of two bark beetles (*Dendroctonus micans* and *Hylurgops palliatus*) are colonized by a bacterial-mycotic association capable of active nitrogen fixation at a level higher than 1 nmol C₂H₄/g·h. The number of nitrogen-fixing microorganisms in this community was 8·10⁶ CFU. The activity of such associations enriches the wall material of the galleries with available nitrogen and makes it more suitable as forage for imago and larvae of bark beetles.

Keywords: bark beetles, nitrogen fixation, nitrogenase activity, nitrogen-fixing bacteria, bacterial-fungal associations.

«В ту пору мы были всецело поглощены новой областью...»

К 150-летию со дня рождения М.Склодовской-Кюри

доктор педагогических наук Р.Н.Щербаков
Таллин, Эстония

Выдающийся французский физикохимик польского происхождения, дважды лауреат Нобелевской премии Мария Склодовская-Кюри своими открытиями положила начало изучению радиоактивности и радиохимии, развитию ядерной физики. Уникальность ее служения науке — в преданности идеалам познания и стремлении к успехам.

Ключевые слова: М.Кюри, исследование радиоактивности, Нобелевские премии по физике и химии.

Среди выдающихся женщин мира, чьи имена вошли в историю мировой науки и культуры XX в., особое место занимает полька по национальности Мария Склодовская-Кюри (1867–1934), блестящий ученый в области физики и химии, посвятившая себя, с одной стороны, науке в целом, а с другой — служению обществу своего времени.

В ее жизни прослеживаются две линии: трепетное и бескорыстное служение научным исследованиям, а также чувства, мысли и дела на благо простых людей. По замечанию ее ближайшего друга великого А.Эйнштейна, *если бы европейские интеллигенты обладали даже небольшой частью силы характера мадам Кюри и ее преданности делу, Европу ждало бы более блестящее будущее* [1, с.193].

Своими открытиями, отмеченными двумя Нобелевскими премиями, она способствовала развитию не только науки XX в., но и этической культуры общества. Ее пример ярко показал, что женщина может реализовать себя как мать, добиться успеха в искусстве и литературе и при этом продемонстрировать мужчинам равные с ними интеллектуальные возможности.

От трудного начала — к выдающемуся результату

Мария Саломея родилась 7 ноября 1867 г. в семье варшавского учителя физики и математики Владислава Склодовского. Кроме нее были старшие сестры Броня, Элен и брат Юзеф. Семья жила в бедности, и только заработки главы семьи позволяли сводить концы с концами.



М.Склодовская-Кюри, 1911 г. Официальное фото Нобелевского комитета, выполненное для вручения второй Нобелевской премии (www.nobelprize.org).



Барочный фасад главного здания Университета Сорбонны. В нем училась, а позднее преподавала М.Кюри (Wikimedia Commons).

До конца Первой мировой войны Царство Польское входило в состав Российской империи, и обстоятельства, связанные с этим фактом, сказывались на правах и психологии поляков. В этих условиях патриотические чувства были обострены, порождали недовольство в стране, отражались они и на поведении Марии, определив на всю жизнь ее любовь к родине и общий гуманистический настрой по отношению к науке и человеку.

Окончив в 1883 г. гимназию с золотой медалью, где уже тогда у Марии пробудился интерес к химии и физике, она спустя год начинает работать гувернанткой, зарабатывая средства для уехавшей в Париж сестры Брони. Занимается она и самообразованием по точным наукам и языкам (французскому, немецкому, русскому, а позднее — английскому).

Склодовская по вечерам работала в лаборатории местного Музея промышленности и сельского хозяйства. Позже она посчитает нужным упомянуть этот первый важный для нее момент своего становления как экспериментатора: *Я старалась воспроизводить опыты, указанные в руководствах по физике и химии, но результаты получались иногда неожиданные. <...> А в общем, постигнув на горьком опыте, что успех в этих областях науки дается не быстро и не легко, я развила в себе за время этих первых опытов любовь к экспериментальным исследованиям* [2, с.81].

В 1891 г. Мария поступила в знаменитый Сорбонский университет на естественнонаучное отделение. Живя в весьма стесненных, скудных условиях, она тем не менее через лекции Ж.А.Пуанкаре, П.Э.Аппеля*, Г.И.Липпмана** и других профессоров постигала основы математики, физики, химии и осваивала технику эксперимента. Тогда же будущая исследовательница выполнила свою первую самостоятельную работу по магнетизму, проявив при этом немалые способности и трудолюбие.

В своем дневнике Мария об этом написала так: *Все, что я видела и воспринимала, было для меня открытием нового. Нового мира науки, которая стала источником восторга. Я целиком погрузилась в занятия. Время мое делилось на лекции, лабораторные опыты, библиотеку. По вечерам я занималась дома, часто допоздна* [3, с.77]. Ее способности были замечены, она получает дипломы по физике и математике, а Липпман предложил ей заняться магнетизмом в своей лаборатории.

Но вскоре ей посоветовали обратиться к Пьеру Кюри, чьи труды по изучению кристаллов, магнетизма и ферромагнетизма уже заслужили высокую оценку научного сообщества. Пьер был романтиком всего, что связано с научным познанием и наукой в целом. Обусловлено это было двумя особенностями его личности: ясным осознанием той непреложной истины, что познание природы требует от исследователя преданности идеалам научного знания, и необыкновенной человеческой порядочностью [4].

Как оказалось, 28-летняя Мария, подобно 35-летнему Пьеру, также предана науке, научной деятельности и идеалам гуманизма, что в конечном счете сблизило их души и сердца. В 1895 г. состоялось их бракосочетание. Спустя два года Мария родила дочь Ирэн, будущего лауреата Нобелевской

* Аппель Поль Эмиль (1855–1930) — французский математик и механик, ректор Парижского университета (1920–1925). Автор лучшего курса теоретической механики своего времени.

** Липпман Габриэль Ионас (1845–1921) — французский физик, член Парижской академии наук. Работы посвящены молекулярной физике, механике, цветной фотографии. Лауреат Нобелевской премии (1908) «За создание метода фотографического воспроизведения цветов на основе явления интерференции».

премии по химии, а в 1904 г. и вторую дочь — Еву, впоследствии ставшую журналисткой и написавшую в 1937 г. книгу (пользовавшуюся популярностью во Франции и не только) о своей матери.

Мировая наука в самом конце XIX в. стояла на пороге величайших открытий. В 1895 г. В.К.Рентген обнаружил излучение, названное позже в его честь. В 1896 г. А.А.Беккерель, проверяя предположение А.Пуанкаре о связи между люминесценцией и лучами Рентгена, открыл неизвестное ранее излучение солей урана, а в 1897 г. Дж.Дж.Томсон экспериментально доказал существование в атоме отрицательно заряженной частицы, названной электроном.

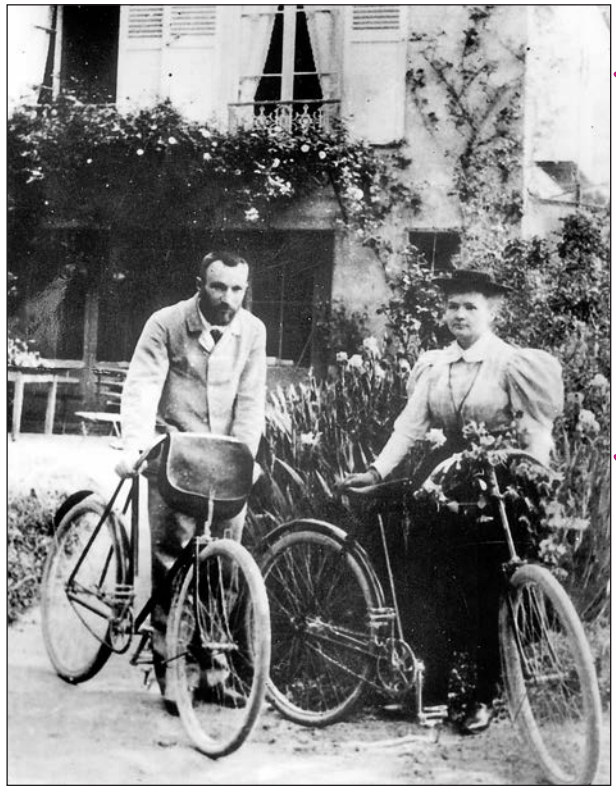
Радиоактивность открывает свои загадки

В те годы Мария работала в лаборатории мужа. Подыскивая тему для будущей докторской диссертации, она остановила свой выбор на открытии Беккереля и с присущим ей упорством начала изучать это явление. Вскоре она выяснила, что излучение соединений урана — это свойство его атомов, а спустя еще два года заметила, что радиоактивность ряда содержащих уран и торий минералов во много раз сильнее, чем следовало ожидать.

Относительно своего опытного метода она подчеркивала, что *лучше всего было использовать для этого измерение проводимости воздуха, создаваемой лучами урана.* <...> *Установка состояла из электрометра Кюри, пьезоэлектрического кварца и ионизационной камеры [плоского конденсатора. — Р.Щ.], верхняя пластина которой была соединена с электрометром, а нижняя, заряженная до определенного потенциала, покрывалась тонким слоем изучаемого вещества* [5, с.46].

В ходе исследований Мария установила, что уран и торий и их соединения испускают лучи Беккереля, и этот факт оказался бесспорным. Позднее она написала: *...пришлось искать новый термин, чтобы назвать это свойство вещества, присущее элементам урану и торию. Я предложила название **радиоактивность**, и с тех пор оно стало общепринятым; радиоактивные элементы получили название **радиоэлементов*** [5, с.47].

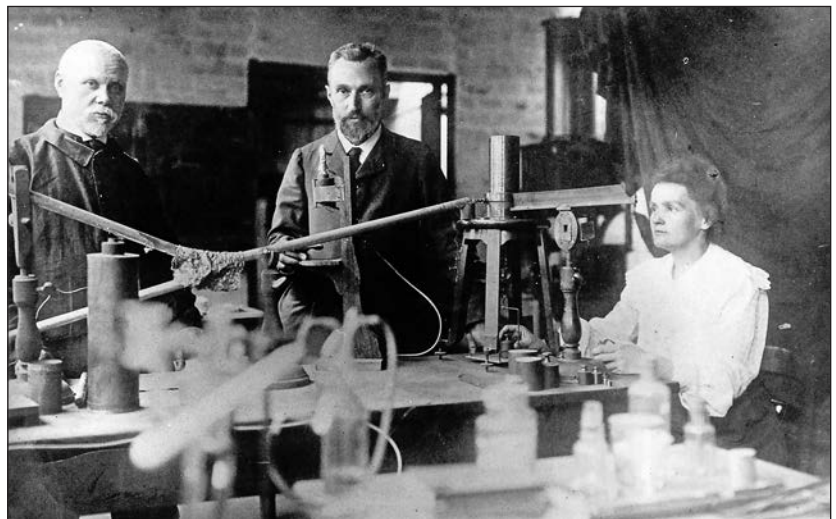
Как только стало очевидным наличие в природе нового радиоактивного элемента и возникла нужда выделения химическим путем хотя бы мизерных долей его из значительной массы урановой смолки, Пьер присоединился к исследованиям своей жены. Их совместная напряженная работа привела к блестящему научному результату: в ию-



Мария и Пьер Кюри, катающиеся на велосипедах по дорогам Франции во время медового месяца, 1895 г. (www.thoughtco.com).

ле 1898 г. они открыли полоний (названный в честь Польши).

В «Докладах Французской академии наук», вышедших в том же июле, можно прочесть следующие уникальные строки, написанные супругами Кюри: *Мы полагаем, что вещество, которое мы*



Неизвестный (слева), Пьер и Мария Кюри в своей лаборатории; вероятно, 1904 г. (Wellcome Library (Лондон), №V0030700).



Мария рядом с Пьером Кюри, держащим пробирку с радием. Раскрашенная литография работы Дж.М.Прайса из журнала «Vanity Fair», 1904 г. (Wellcome Library, №2272i).

извлекли из урановой руды, содержит еще не описанный металл, по своим химическим свойствам близкий к висмуту. Если существование этого металла подтвердится, мы предлагаем назвать его «полонием» — по имени страны, откуда происходит один из нас [2, с.148].

В декабре того же года они сообщили в «Докладах» об открытии радия: *В силу различных только что изложенных оснований мы склонны считать, что новое радиоактивное вещество содержит новый элемент, который мы предлагаем назвать РАДИЕМ. Новое радиоактивное вещество, несомненно, содержит также барий... но, даже несмотря на это, обладает значительной радиоактивностью. Радиоактивность же самого радия должна быть огромной* [2, с.150].

Многочисленных скептиков из числа ученых (особенно химиков) пришлось убеждать в том, что

и радий, и полоний действительно существуют в природе. Для этого супругам Кюри понадобилось четыре года упорной работы, вначале чисто физической — Мария исполняла обязанности простой чернорабочей, а затем и интеллектуальной обоих супругов. Трудиться им приходилось в мало приспособленном для исследований помещении, без технического персонала, используя самодельные приборы и простые подсобные средства.

О своих личных усилиях, вложенных в этот тяжелый процесс, Мария написала позднее: *Мне приходилось обрабатывать в день до двадцати килограммов первичного материала, и в результате весь сарай был заставлен большими химическими сосудами с осадками и растворами; изнурительный труд, переносить мешки, сосуды, переливать растворы из одного сосуда в другой, по несколько часов подряд мешать кипящую жидкость в чугуном тазу* [2, с.155].

В ту пору, — продолжает она, — мы с головой ушли в новую область, которая раскрывалась перед нами благодаря неожиданному открытию. Несмотря на трудные условия работы, мы чувствовали себя вполне счастливыми. <...> У доски начинались те беседы, что оставляют лучшие воспоминания, возбуждая еще больший интерес и рвение к работе, и в то же время не прерывают естественный ход мысли... [2, с.156]. Вскоре труды их были оценены по достоинству.

После ожогов, случайно полученных А.Беккерелем и М.Кюри, а также преднамеренно вызванных у себя П.Кюри, стал очевиден биологический эффект радиоактивного излучения. Выяснилось, что при некой дозе такого излучения раковые клетки оказываются чувствительней к нему и легче поражаются, чем клетки здоровой кожи. По этому поводу Мария написала: *Мне радостно сознавать, что по счастливой случайности наше открытие может, подобно открытию Рентгена, облегчать человеческие страдания* [6, с.55].

Продолжая работу, супруги Кюри обнаружили в 1898 г. два вида радиоактивных лучей, отклоняющихся в магнитном поле. К такому же выводу пришел и Э.Резерфорд и назвал их α - и β -лучами. В 1900 г. П.У.Виллар открыл третий вид излучения — γ -лучи. В 1902 г. Э.Резерфорд совместно с Ф.Содди построили теорию радиоактивного распада и сформулировали закон радиоактивных превращений. Природа всех видов лучей будет определена позднее.

Уже в 1899 г. Мария высказала гипотезу «атомного превращения радия» и добавила: *Она открыта принята г.Резерфордом, который допустил, что эманация радия представляет собой материальный газ, являющийся продуктом распада атомов радия... <...> С другой стороны, постоянное выделение теплоты не может быть объяснено обычной химической реакцией, а, видимо, происходит в результате превращения атомов* [6, с.80–81].

Начало изучения радиоактивности было успешным, и очень скоро это явление оказалось в центре внимания многих физиков и химиков, как выдающихся, так и рядовых. В те годы никто и не подозревал, в том числе и супруги Кюри, что в научном мире сформируются два мировых центра исследования радиоактивности и ядерной физики: Кавендишская лаборатория в Англии (Э.Резерфорд и его школа) и Институт радия в Париже (М.Кюри и ее школа).

Пока же (в 1902 г.), по словам Резерфорда, *наилучшие бегуны на стартовой дорожке исследований — Беккерель и супруги Кюри в Париже, которые за последние несколько лет успели проделать большую работу и добиться очень важных результатов в изучении радиоактивных веществ* [6, с.72]. Но уже набирали силу исследования их английских коллег, довольно серьезные работы сделали ученые Канады, Германии, Австралии, Швейцарии и США.

В 1900–1906 гг. супруги Кюри, занятые работой по выделению химически чистых солей радия (именно тогда они обнаружили физиологическое воздействие радия на организм человека), организовали промышленное производство радия. В то время Мария опубликовала ряд научных трудов о радиоактивности, а радий стал предметом научных исследований крупнейших ученых мира. В 1903 г. А.Беккерелю и супругам Кюри была присуждена Нобелевская премия по физике (Кюри получили половину награды «в знак признания... их совместных исследований явлений радиации, открытых профессором Анри Беккерелем»).

Но уже в начальный период их совместной работы возникли слухи о том, что Марии *принадлежала лишь роль технического помощника. Такое мнение, когда оно высказывалось, основывалось лишь на «принципиальном» недоверии к женщине, к ее способности подняться до вершин творческой деятельности* [7, с.451]. На самом деле это было далеко не так, и ее последующие выдающиеся открытия после смерти мужа развеяли эти слухи на некоторое время.

В июне 1903 г. лондонский Королевский институт наградил супругов Кюри медалью Дэви, а сама Мария вскоре защитила докторскую диссертацию «Исследование радиоактивных веществ», в которой дала сводку фактов о радиоактивности и теоретических воззрений на нее. Главным же событием стало, как уже отмечалось, присуждение 12 ноября Нобелевской премии всем трем исследователям радиоактивности.

За пять лет исследований супруги Кюри вместе, раздельно или в сотруничестве с коллегами опубликовали 32 научных сообщения. Заголовки у них (с точки зрения далеких от науки людей) непривлекательны, сами тексты заполнены целым рядом непонятных для неспециалистов терминов, насыщены описанием проведенных опытов, диаграммами и математическими формулами. Но для



Пьер и Мария Кюри в год получения Нобелевской премии по физике, 1903. Архив Смитсоновского института (США).

науки важна не форма публикации, а то, что каждая из них — очередная победа над разгадкой радиоактивности.

Осознавая, что важнейшее свойство радиации — непрерывное выделение энергии, Мария предположила: либо радиоэлементы преобразуют внешнюю энергию, либо сами создают ее. И только когда Пьер установил, что соли урана непрерывно выделяют тепло, причем в количествах, не соизмеримых с малой массой радиоактивного препарата, стало очевидно, что именно радиоэлементы — источники энергии. Первая гипотеза была отброшена как неверная.

П.Л.Капица, лично знавший М.Кюри, так характеризовал ее роль в союзе с мужем: *Мария Кюри очень хорошо дополняла в научной работе своего мужа Пьера Кюри. Он был человеком с очень большой фантазией, свободным полетом мысли, а она была очень выдержана и собрана, она выполняла волевою и организационную часть в совместных исследованиях. Пьер Кюри без нее не смог бы столько сделать, сколько ему удалось... она была человеком реальным; их сотрудничество было исключительно плодотворным* [8, с.207].

В 1905 г. П.Кюри прочел Нобелевскую лекцию, в которой подчеркнул не только важнейший вклад жены в сделанное ими открытие, но и вы-

сказал общее с ней мнение о значимости его для химии, геологии и биологии. В этой лекции впервые прозвучало: *В преступных руках радий очень опасен, и можно задаться вопросом, полезно ли для человечества узнавать тайны природы, созрело ли оно для их использования или это знание будет для него вредным* [9, с.78].

И в дни печали она продолжала работать в лаборатории

1906 год для Марии, ее детей, родителей Пьера и науки оказался скорбным. 19 апреля 46-летний Пьер трагически погиб. Был объявлен национальный траур по выдающемуся ученому. Но, вопреки потере мужа и соратника по науке, Мария, выстояв под ударами личной судьбы, не только возобновила начатые еще с ним исследования, но и пришла к новым выдающимся научным открытиям.

Стало очевидным, что Мария — единственный ведущий французский физик, который в состоянии продолжить начатые ею с Пьером исследова-

ния в области радиоактивности. Она же — единственный руководитель лаборатории, способный заменить супруга, и как раз тот профессор, который может стать достойным преемником в деле воспитания молодых научных кадров. В итоге впервые в истории Сорбонны женщина исполняла обязанности профессора этого университета.

С 1906 по 1914 г. Мария преподавала в Сорбонне (до того она читала лекции в педагогическом училище в Севре), отредактировала и выпустила в свет «Труды Пьера Кюри». В 1910 г. издала двухтомное «Руководство по радиоактивности» — пособие для проведения экспериментов с радиоактивными препаратами в лабораториях Сорбонны (а позднее Института радия), которое было переведено затем на ряд языков. Большое внимание она уделяла в те годы и воспитанию дочерей.

Определяющая задача в ее последующей жизни — дальнейшие исследования свойств радиоактивных элементов. Мария продолжила уточнять атомный вес радия. В 1908 г. опубликовала в специальном немецком журнале по радиоактивности статью, посвященную своим исследованиям за 1899–1907 гг. А в 1910 г. Мария привела сводку выполненных измерений постоянной распада эманиции радия, подробно описав аппаратуру и методику измерений.

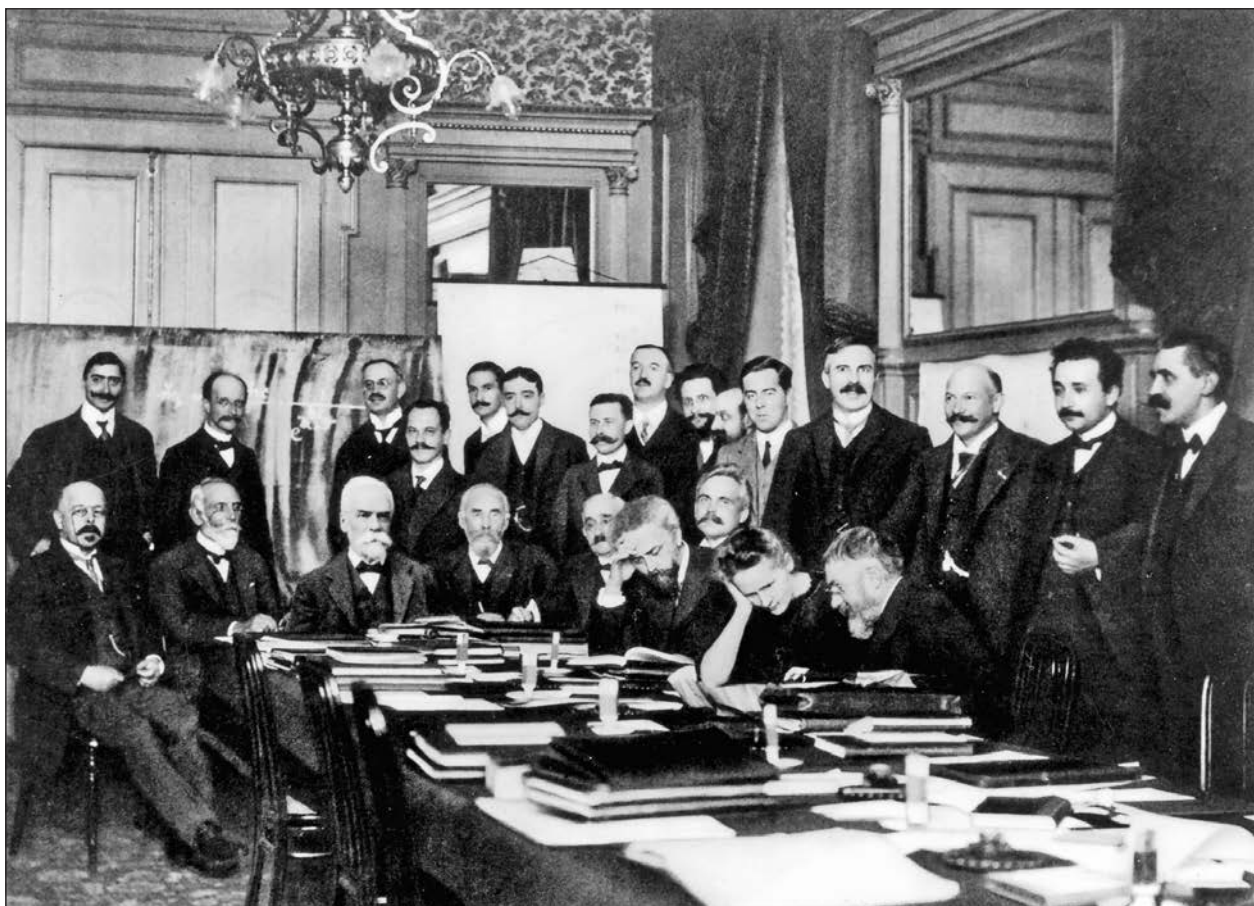
В 1910 г. М.Кюри — председатель физической секции Международного конгресса по радиоактивности и электричеству в Брюсселе. Среди его участников были Э.Резерфорд, П.Ланжевен, Ж.А.Пуанкаре, М.К.Э.Л.Планк, П.Н.Лебедев, Н.Г.Егоров*, О.Д.Хвольсон. В письме матери Резерфорд написал: *Там была и мадам Кюри. Она выглядела очень изнуренной и утомленной и гораздо старше своих лет. Она работает слишком напряженно для своего здоровья* [6, с.129]. Ей было всего 43 года.

На том же конгрессе по инициативе Э.Резерфорда была создана Международная комиссия по радиевым эталонам, поручившая М.Кюри и О.Хенигшмиду (Радиевый институт в Вене) изготовить международный эталон радия. Спустя два года, в 1912 г., в своей статье «Измерения в области радиоактивности и эталон радия» Мария сообщила, что эталон был изготовлен ею в течение августа 1911 г. (16.739 мг чистого радия-226). Позднее эталоны сравнили в Париже и в 1912 г. утвердили эталон Кюри в качестве первичного эталона массы радия, а эталон Хенигшмида — в качестве основной копии первичного эталона. Несмотря на плохое состояние здоровья, исследовательница вполне успешно выполнила порученную ей работу.

* Егоров Николай Григорьевич (1849–1919) — физик-экспериментатор в области спектрального анализа, электромагнетизма, рентгеновских лучей радиоактивности и метрологии. Профессор Варшавского университета, затем Петербургской военно-медицинской академии и, наконец, директор Главной палаты мер и весов.



Мария с дочерьми Евой (слева) и Ирэн, 1908 г. (Wellcome Library, №L0001758).



Участники первого Сольвеевского конгресса, Брюссель, 1911 г. Сидят справа: А.Пуанкаре и М.Кюри.

Фото Б.Купри

За последующие десятилетия Мария как исследовательница проверила целый ряд элементов на радиоактивность и изучила их свойства. Разработала для этого основы количественных методов радиоактивных измерений. Исследовала радиоактивность, наведенную в веществах. Установила влияние радиоактивного излучения на живую клетку. Подвела итоги применения радиоактивного излучения и сделала еще очень многое. Работы свои она выполняла во взаимосвязи с учеными всего мира.

Четверть века она читала первый и длительное время единственный в мире курс лекций по радиоактивности, который был опубликован лишь в 1935 г. В предисловии к изданию она отметила, что *книга является изложением курса, читанного много лет в Сорбонне и изменявшегося каждый год в соответствии с прогрессом науки. Хотя этот прогресс будет продолжаться, тем не менее полезно время от времени вкратце излагать основные сведения в данной научной области* [10, с.10].

В 1910 г. Марию за выдающиеся свершения в науке представили к ордену Почетного легиона, но она, как в свое время и ее муж Пьер, отказалась

от награды. А вскоре ей предложили выдвинуть свою кандидатуру во Французскую академию наук, на это она дала согласие. В январе 1911 г. прошли выборы, на которых победил изобретатель когерера Э.Бранли. Ее неудача (не хватило всего двух голосов) была спровоцирована очередной травлей за то, что Мария — чужестранка, и за другие подобные «грехи».

В 1911 г. М.Кюри присуждается вторая Нобелевская премия, но теперь уже по химии: «За выдающиеся заслуги в развитии химии. Открытие элементов радия и полония, выделение радия и изучение природы и соединений этого замечательного элемента». В речи при вручении премии в Стокгольме она отметила, что Нобелевская премия присуждена за исследования, которые были тесно связаны с их общей с Пьером работой.

И вновь, в очередной раз, реакционная бульварная печать Парижа развернула кампанию лжи и клеветы против Марии — лауреата иностранного происхождения — и всего ее прогрессивного окружения. Кампания вызвала у нее серьезное нервное расстройство и тяжелое заболевание. И только выражения сочувствия со стороны отдельных французских и зарубежных ученых при-

дали ей силы и мужества для дальнейшего продолжения своих научных исследований.

С 1911 по 1933 г. Мария принимала активное участие в проведении Сольвеевских конгрессов*, хорошо известных в мире науки. Нельзя не отметить, что на первых пяти конгрессах Кюри была единственной женщиной, удостоенной этой чести, и лишь на очередной, шестой, кроме нее была приглашена французка Э.Коттон, а на следующий седьмой — И.Жолио-Кюри (дочь М.Кюри) и Л.Мейтнер из Австрии.

Важно отметить активность М.Кюри как ученого на конгрессах: на втором она дополнила выступление Дж.Дж.Томсона о строении вещества, на третьем — предвосхитила идею существования ядерных сил, на четвертом — компетентно высказалась об электропроводности металлов, на пятом, опираясь на свои исследования, отметила роль электронов в биологическом воздействии на живые ткани, на шестом — обсудила проблемы магнетизма и на седьмом, последнем в ее жизни, — проблемы атомных ядер.

Руководство Сорбонны и Института Пастера еще в 1909 г. приняли совместное решение о создании Института радия. В 1913 г. Институт был открыт в виде двух подразделений: радиоактивной лаборатории под руководством М.Кюри и лаборатории биологических исследований и радиотерапии, которую возглавил известный медик К.Рего. В основу деятельности института положен принцип Марии — органичное совмещение научных исследований и ухода за больными.

В годы Первой мировой войны Кюри внедрила рентгенологические методы в военную хирургию, создала 220 передвижных и постоянных рентгеновских установок и все четыре военных года работала в качестве инструктора по вопросам использования лучей Рентгена для спасения раненых. Применяла в лечебных целях и излучение радия. Итог военному периоду своей деятельности Мария подвела в 1920 г. в работе «Радиология и война»: *История военной радиологии дает пример неожиданного размаха, который может получить в определенных условиях практическое приложение научных открытий. Эта удача ...должна вселить в нас еще большее доверие к бескорыстным исследованиям и усилить наше восхищение и преклонение перед наукой* [3, с.214–215]. Ее труд в годы войны — подлинный научный подвиг — был оценен избранием в члены Французской медицинской академии.

* Сольвеевские конгрессы — серия международных конференций по обсуждению фундаментальных проблем физики и химии, проводимых в Брюсселе международными Сольвеевскими институтами физики и химии с 1911 г. Первый конгресс, состоявшийся по личной инициативе и на средства бельгийского ученого и промышленника Э.Сольве, считается поворотным пунктом в развитии физики XX в. В период с 1911 по 2014 г. состоялось 26 конгрессов по физике и 23 — по химии.

Триумф в мировой науке и ее деятельность

После войны Мария намеревалась продолжить исследования, но не хватало радия. В 1921 г. она с дочерью посетила США и получила один грамм радия в подарок, за что поблагодарила американских женщин. Там же убедилась и в пользе применения радиотерапии в медицинских целях. Позднее она еще не раз будет получать от бизнесменов Америки средства на покупку радия.

Свои исследования Мария продолжила уже в Институте радия, где со временем стали работать более четырех десятков ее учеников (П.Ланжевен, И.Жюлио-Кюри, Ж.Ф.Жолио и др.). Ее посещают как западные, так и российские ученые: Д.И.Менделеев, В.И.Вернадский, Я.И.Френкель (оценил Институт Кюри как весьма бедный), Г.А.Гамов (просил помочь остаться за рубежом), Д.В.Скобельцын (проводил работы по гамма-лучам и космическим лучам) и многие другие.

Кюри гордилась своими учениками, но, как мать, она была горда еще и тем, что ее старшая дочь Ирэн пошла в науку по ее стопам и добилась успехов. Проживи еще хотя бы пару-тройку лет, она узнала бы, что Ирэн и Жан Фредерик Жолио-Кюри в 1934 г. открыли искусственную радиоактивность и уже в 1935 г. были удостоены Нобелевской премии по химии, а Ирэн продолжила дело своей матери: в 1936 г. она стала полным профессором Сорбонны, а начиная с 1946 г. — директором Института радия.



Мария с дочерью Ирэн, будущим лауреатом Нобелевской премии. 1925 г. (Wellcome Library, №L0001759).

В своей нелегкой и вместе с тем успешной жизни Мария, как женщина, была счастлива с Пьером и своими детьми, достойно чувствовала себя в преподавании и руководстве своим институтом. Но самое главное — она была выдающимся ученым, перед ней преклонялись коллеги по науке, не говоря уже о широкой публике. Бескорыстным служением науке и окружающим ее людям она показала, на что способна женщина в точных науках.

В момент появления М.Кюри в науке физика в значительной степени была описательной наукой. Задавался вопрос **как**, а не **почему**, но уже к концу ее насыщенной исследованиями жизни цели физики изменились. При изучении свойств вещества начал звучать вопрос **почему**. Физика перешла от описания к объяснению [11, с.234]. В этом динамическом скачке открытия супругов Кюри сыграли роль инструмента для обнаружения атомных ядер.

Действительно, применение знаний о радиоактивности к изучению структуры атома привели к выдающимся открытиям в этой области. В 1911 г. Э.Резерфорд обнаружил атомное ядро, а в 1919 г. ядерную частицу — протон, в 1932 г. Дж.Чедвик — нейтрон, а Д.Д.Иваненко и В.К.Гейзенберг в том же году предложили протонно-нейтронную модель строения атомного ядра. Эти свершения положили начало атомной и ядерной физике. И все это — при содействии М.Кюри и ее коллег по институту.

Слава Марии во всем мире росла. Ее избрали в свои члены академии и научные общества многих стран (и среди них СССР). Ее приглашали читать лекции в Италии, Голландии, Англии, Бельгии, Чехословакии и др. Она часто ездила в Польшу, где в 1932 г. в Варшаве открыла Институт радия*. Триумф Марии был обусловлен как ее выдающимися открытиями, так и лечебными свойствами радия, обещавшими избавление от болезней.

Значительный авторитет у исследовательницы был в первую очередь в самих научных кругах. Именно поэтому Эйнштейн привлек ее к работе в комиссии Лиги Наций по научному сотрудничеству. Она занималась вопросами международного сотрудничества в библиографии и документации и разработала единую систему указателей и ссылок с целью облегчения ученым всех стран знакомства с литературой по их специальности, а также для создания единого формата научных публикаций.

Их дружба началась еще в 1912 г., когда она и Пуанкаре отправили свои отзывы в Цюрихский политехникум, куда Эйнштейна принимали на работу. Мария, дважды нобелевский лауреат, в своем отзыве подчеркивала, что ученые уже могут возлагать на него огромные надежды, ибо в будущем он

станет одним из ведущих теоретиков. Так и случилось: Эйнштейн — как ученый и мыслитель — вошел в историю.

Кюри постоянно проявляла заботу о молодых талантах. Разве не долг общества, вопрошала она, *способствовать расцвету научных дарований? Разве оно так богато ими, что может принести в жертву те, которые готовы проявиться? Я же думаю, что совокупность способностей, необходимых для настоящего научного призвания, — явление бесконечно ценное и тонкое, редкое сокровище, было бы нелепо и преступно давать ему гибнуть, а нужно заботливо ухаживать за ним, предоставляя все возможности для его расцвета...* [3, с.225].

Вся жизнь и научные интересы Марии напоминают нам о такой общечеловеческой стороне науки, как ее интернациональная природа. Задачи фундаментальной науки наднациональны, она возникает и развивается из стремления человека узнать и понять, какова наша природа и что происходит в ней. А язык науки интернационален и воспринимается учеными из любой страны. Осознавала это разумом и сердцем и Кюри — по своему рождению полька, жившая и проявившая себя как выдающийся ученый во Франции.

Облучение, полученное от рентгеновских установок во время войны, четыре операции на глазах



Музей М.Склодовской-Кюри. Основан в 1967 г. в ее родном доме №16 на ул. Фрета в Варшаве (Wikimedia Commons).

* Первым директором польского Института радия была Бронислава Длуска — сестра Марии. После Второй мировой войны он был переименован в Центр онкологии — Институт имени Марии Склодовской-Кюри в Варшаве в ведомстве здравоохранения Польши.

и все равно ухудшающее зрение, болезнь желчных протоков, нервные срывы и, наконец, злокачественная острая анемия — таковы основные страдания Марии. Они начались с 1920 г. и продолжались до ее кончины 4 июля 1934 г. На могильной плите рядом с именем Пьера Кюри легло имя сподвижника по науке и жизни Марии Склодовской-Кюри. В 1995 г. их прах был погребен в Пантеоне рядом с могилами великих людей Франции.

Сегодня Институт радия носит ее имя. В Павильоне Кюри, в лаборатории, построенной для нее Парижским университетом в 1910–1914 гг., располагается посвященный ей музей. В 1948 г. в Англии учрежден фонд имени Марии Кюри «Уход за онкологическими больными». Генеральная Ассамблея ООН провозгласила 2011 г. Международным годом химии в связи с сотой годовщиной присуждения М.Склодовской-Кюри Нобелевской премии в области химии, это стало и возможностью отметить вклад женщин в науку. Таковы прямые свидетельства, что ее помнят.



М.Кюри в лаборатории. Иллюстрация из журнала «Popular Science», 1912 г. (Wellcome Library, №M0004624).

Работа ученого в лаборатории — это борьба за истину

Оценивая свой путь в науке, Мария в дневниках написала: *Не усовершенствовав человеческую личность, нельзя построить лучший мир. С этой целью каждый из нас обязан работать над собой, над совершенствованием своей личности, возлагая на себя определенную часть ответственности за жизнь человечества; наш личный долг помогать тому, кому мы можем быть наиболее полезны* [2, с.49].

Как личность, подготовленная к научной деятельности, она имела довольно высокое математическое, физическое и химическое образование. По своей исключительной математической подготовке Мария была одним из тех редких ученых, которым Эйнштейн мог излагать свои теории. Но самое главное — она была искусным экспериментатором, влюбленным в свое дело, постоянно развивающим и совершенствующим свои исследовательские навыки и приемы.

Она прошла прекрасную школу у опытного экспериментатора Пьера Кюри. Исследования ее проходили с немалыми сложностями. О них напомнил Г.Н.Флёрв, написав, что в ее время *новые элементы открывались в условиях полного отсутствия данных об их химических свойствах, без применения каких-либо сложных (с нашей точки зрения) методик, но при очень требовательном отношении к собственным результатам и глубоком анализе получаемых данных* [12, с.33].

Но уже тогда (в 1930 г.) экспериментальные методы, согласно словам П.Ланжевена, *приобрели и продолжают приобретать тонкость и точность*. Теория же дает *...возможность лучше понять условия опыта и неуклонно увеличивать его точность, совершенствуя приборы и принимая необходимые меры предосторожности* [13, с.687]. Этим непреложным правилом руководствовалась и Мария-ученый, когда в ходе эксперимента использовала прежние приемы и отыскивала новые.

Как экспериментатор, она постоянно убеждалась, что одних лишь методов на пути к истине недостаточно. При подготовке условий, когда постановка эксперимента становится возможной, его проведение вопреки ожиданию может «подкинуть» ученому неожиданные эффекты, требующие немедленного анализа и компенсации их дополнительными усилиями. В таких ситуациях теоретические методы были подчас необходимы.

Пьер был сдержан в признании гипотез и отличался определенным недоверием к теоретическим выводам, до поры до времени не подтвержденным прямым экспериментом. В отличие от него, Мария (с ее рациональностью, подкрепленной теоретической подготовкой) в оценке данных и вытекающих из них логически оправданных гипотез благодаря интуиции исследователя имела

большую свободу в осмыслении ситуаций и больше предвидения в поисках нужных ответов.

По ее словам (из книги о муже), *жизнь большого ученого в его лаборатории не есть безмятежная идиллия... чаще это упорная борьба с тем, что кажется очевидным, с окружающими и, прежде всего, с самим собой. Великое открытие не выходит из мозга ученого в готовом виде... такое открытие — плод сосредоточенного предвзвешенного труда. Дни плодотворные чередуются с днями неуверенности, когда все кажется безрезультатным и когда окружающее представляется враждебным, и вот именно тогда и нельзя поддаваться унынию* [5, с.75].

За год до своей смерти Мария скажет: *Я отношусь к тем, кто убежден в великой красоте науки. Ученый в своей лаборатории — не только специалист. Это также и ребенок, стоящий перед явлениями природы, которые поражают его, как волшебная сказка. Мы должны суметь рассказать другим об этих чувствах. Мы не должны мириться с мнением, что весь научный прогресс сводится к механизмам, машинам, зубчатым передачам, хотя и они сами по себе тоже прекрасны* [5, с.136].

Впрочем, рационализм мышления и поступков присущ был Кюри как в научной деятельности, так и в воспитании дочерей. При этом ее рационализм не подавлял чувство любви к ним, но, напротив, вносил в их жизнь тот возможный порядок, что обычно работает на формирование разумного отношения к себе и к миру. В конечном итоге старшая дочь добилась выдающихся успехов в науке, а младшая — в литературе и общественной деятельности.

На всех этапах творчества Мария шла к решению научных задач с той целеустремленной настойчивостью, которую не могли ослабить или остановить любые обстоятельства, будь то неустроенность материального бытия, неприятие к ней самого общества, собственные болезни и недомогания. Подобным служением науке и успехами в ней Кюри удивляла современников и вдохновляла на познание потомков.

Последователи ученого

Не следует забывать, что Мария жила в эпоху, когда творческий потенциал женщины в точных науках оценивался обществом невысоко. Тем не менее, она как личность не сломалась, выстояла и добилась выдающихся успехов в науке.

В то же время в Берлине занималась ядерными превращениями Л.Мейтнер (1878–1968), не уступающая, а возможно, и превосходящая ее талантом. За способности и выдающиеся работы Эйнштейн называл ее «наша мадам Кюри». Обе испытали неприятие их как ученых, обе сделали великие открытия. Но Мейтнер — безусловно достойная Нобелевской премии — по ряду причин ее не получила.

Очевидно, для науки неважно, двигают ее мужчины или женщины. За работы по радиоактивности присуждено более 10 Нобелевских премий. Кроме М.Кюри (1903 и 1911) и И.Жолио-Кюри (1935) их были удостоены А.Беккерель и П.Кюри (1903), Э.Резерфорд (1908), Ф.Жолио-Кюри (1935), Э.Ферми (1938), Д. де Хевеши (1943), О.Ган (1944), Э.М.Макмиллан и Г.Т.Сиборг (1951), У.Ф.Либби (1960).

Позднее Сиборг, синтезировав вместе с сотрудниками в 1944 г. 96-й химический элемент, назвал его «кюрием» в честь супругов Кюри. Сегодня кюрий-242 в виде окиси с плотностью около 11.75 г/см³ и периодом полураспада 162 дня применяется, как правило, для производства компактных и мощных радиоизотопных источников энергии, ведь этот изотоп — практически чистый источник α -излучения.



Знаменитые женщины начала XX в. Верхний ряд: королева Нидерландов Вильгельмина, феминистка Ф.Уиллард, писательница С.Лагерлёф; средний ряд: писательница Дж.Элиот, королева Британии Виктория, основательница Американского Красного Креста К.Бартон; нижний ряд: М.Кюри, философ Дж.Адамс и писательница Дж.У.Хоу. Вклейка между с.3022 и с.3023 в книге «The Home and School Reference Work» (N.Y.; Chicago; L.A., 1917).

В 1945 г. П.Ланжевен в статье «Эра атомной энергии» заметил, что *о наличии этой энергии мы узнали благодаря открытию радиоактивности Беккерелем и Марией Кюри. Открытие радиоактивности по своему значению в истории цивилизации, быть может, будет поставлено наряду с открытием огня, а возможности его применения... далеко оставляют за собой паровую машину, водяные турбины и двигатели внутреннего сгорания* [13, с.399].

В середине 1960-х потребности атомной и квантовой физики сделали насущным увеличение доли молодежи в науке, а подъем феминистского движения в мире привел к росту числа жен-

щин, посвятивших себя науке [14]. Но принципиальный рост численности вступивших в науку молодых людей, к сожалению, так и не привел к появлению женщин-ученых масштаба М.Кюри. Видно, другим было и время, и ориентиры общества.

Своим научным подвигом Кюри вошла в историю науки и общества как пример возможного творческого потенциала ученых-женщин. Если за столетие с лишним существования Нобелевской премии по физике ее получили только две женщины: М.Кюри (1903) и М.Гёпперт-Майер (1963), то премию по химии уже четверо: М.Кюри (1911), ее дочь И.Жолио-Кюри (1935), Д.М. Кроуфут-Ходжкин (1964) и А.Йонат (2009). ■

Литература / References

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М., 1967; 4. [*Einstein A. Collection of scientific works. Moscow, 1966; 4. (In Russ.)*]
2. Кюри Е. Мария Кюри. М., 1967. [*Curie E. Marie Curie. Moscow, 1967. (In Russ.)*]
3. Алов Н. Мария Кюри: Подвиг длиною в жизнь. М., 2013. [*Alov N. Marie Curie: The life long feat. Moscow, 2013. (In Russ.)*]
4. Щербаков Р.Н. Высокое служение науке. К 150-летию со дня рождения Пьера Кюри. Вестник РАН. 2008; 10: 907–910. [*Shcherbakov R.N. High service to science. To the 150 anniversary since the birth of Pierre Curie. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2008; 10: 907–910. (In Russ.)*]
5. Кюри М. Пьер Кюри. М., 1968. [*Curie M. Pierre Curie. Moscow, 1968. (In Russ.)*]
6. Старосельская-Никитина О.А. История радиоактивности и возникновения ядерной физики. М., 1963. [*Starosel'skaya-Nikitskaya O.A. History of radioactivity and emergence of Nuclear Physics. Moscow, 1963. (In Russ.)*]
7. Иоффе А.Ф. О физике и физиках. Л., 1985. [*Ioffe A.F. About Physics and physics. Leningrad, 1985. (In Russ.)*]
8. Капица П.Л. Научные труды: Наука и современное общество. М., 1998. [*Kapitsa P.L. Scientific works: Science and modern society. Moscow, 1998. (In Russ.)*]
9. Лауреаты Нобелевской премии по физике: Биографии, лекции, выступления. Т.1: 1901–1950. СПб., 2005: 73–78. [Nobel Prize laureates on Physics: Biographies, lectures, performances. V.1: 1901–1950. Saint Petersburg, 2005: 73–78. (In Russ.)]
10. Кюри М. Радиоактивность. М., 1960. [*Curie M. Radioactivity. Moscow, 1960. (In Russ.)*]
11. Вайскопф В. Физика в двадцатом столетии. М., 1977. [*Weisskopf V. Physics in the twentieth century. Moscow, 1977. (In Russ.)*]
12. Флеров Г.Н. Перспективы синтеза новых изотопов и элементов. Успехи физических наук. 1968; 95(5): 25–33. [*Flyorov G.N. Prospects of synthesis of new isotopes and elements. Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences). 1968; 95(5): 25–33. (In Russ.)*]
13. Ланжевен П. Избранные труды. М., 1960. [*Langevin P. Selected works. Moscow, 1960. (In Russ.)*]
14. Социальная динамика современной науки. М., 1995. [*Social dynamics of modern science. Moscow, 1995. (In Russ.)*]

“At that time we have been entirely absorbed by a new field of knowledge...”

To the 150 anniversary since the birth of M.Sklodowska-Curie

R.N.Shcherbahov
Tallinn, Estonia

An eminent French physicist and chemist of Pole origin, twice Nobel Prize laureate, Marie Curie by her discoveries laid foundation to the investigations of Radioactivity and Radio-Chemistry, the development of Nucleus Physics. The unique feature of her scientific service is in the loyalty to ideals of cognition and aspiration to success.

Keywords: M.Curie, pioneering research on radioactivity, Nobel Prizes in Physics and in Chemistry.

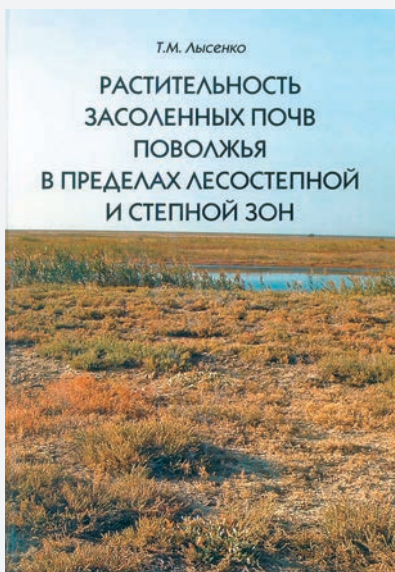
Механика. Кибернетика

Ш.Г.Алиев, Ю.И.Жуков. ТОРПЕДНОЕ ОРУЖИЕ. Т.9: Бесплатформенные инерциальные микроэлектромеханические навигационно-управляющие системы мини-торпеды. М.: Наука, 2017. 232 с.

Девятый том монографии «Торпедное оружие» подводит итоги почти двадцатилетней работы группы известных в кораблестроении ученых, руководимых генеральным конструктором системы автоматизированного проектирования Ш.Г.Алиевым. В годы перестройки завод «Дагдизель» уцелел во многом благодаря той принципиальной научной и государственной линии, которую проводил (и проводит) Алиев. В мировом торпедостроении явно наметилась тенденция к снижению весогабаритных характеристик. В книге дан анализ (на основе системы управления данными и бесплатформенной инерциальной микроэлектромеханической навигационно-управляющей схемы) различных подходов к построению функций, обеспечивающих пространственное маневрирование мини-торпеды без ограничений на величину углов ориентации. Для доставки изделия в район цели предложено использовать двухсредный аппарат, представляющий собой крылатую ракету, головная часть которого — мини-торпеда. Ракета может стартовать с подводного или надводного носителя. Для подтверждения работоспособности всех предложенных алгоритмов в пространственной ориентации и навигации мини-торпеды разработан инструментальный комплекс, сведения о котором даны в заключительной главе книги.

**Ботаника. Геоботаника. Почвоведение**

Т.М.Лысенко. РАСТИТЕЛЬНОСТЬ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ ПОВОЛЖЬЯ В ПРЕДЕЛАХ ЛЕСОСТЕПНОЙ И СТЕПНОЙ ЗОН. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 329 с.



Сообщества галлофилов связаны с засоленными почвами, содержащими в своем профиле ионы легкорастворимых солей. Галофильная растительность занимает обширные территории: она распространена на побережьях морей и океанов и во внутриконтинентальных местообитаниях. В Поволжье засоленные почвы характерны для степной и пустынной зон и отмечены в лесостепной. Теоретическое обобщение 20-летних полевых исследований автора позволило провести полную инвентаризацию растительности таких зон Поволжья с позиций эколого-флористического подхода к классификации. Показано, что разнообразие растительности засоленных почв представлено 141 синтаксоном (в лесостепной зоне выявлены ценозы 57, в степной — 102 синтаксонов), в том числе шестью классами, 10 порядками, 13 союзами, 44 ассоциациями, 43 субассоциациями, 20 вариантами и пятью безранговыми сообществами (в соответствии с «Международным кодексом фитосоциологической номенклатуры» 2000 г.). Для установленных синтаксонов составлена полная характеристика, выявлена их связь с формами рельефа и почвами. Определены основные экологические факторы, влияющие на дифференциацию и распространение растительных сообществ засоленных почв лесостепной и степной зон региона. Выполнен анализ природоохранной значимости синтаксонов, в качестве объектов охраны отмечены 14 ассоциаций.

Тематический указатель за 2017 год

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Математическая физика

О нашем учителе. **Семенов-Тянь-Шанский М.А.** 5 77

Механика жидкости, газа и плазмы

Подводное торнадо: микробилей открытия.

Бялко А.В. 7 3

Столбчатые базальты и конвекция Рэлея—Бенара.

Чудов С.В. 6 34

Астрометрия и небесная механика

Уникальное трио: карликовая планета Хаумеа

и ее спутники. **Кондратьев Б.П.** 2 3

Астрофизика и звездная астрономия

Большая наука астрономия.

Чернин А.Д., Бердников Л.Н., Расторгуев А.С. 5 11

Гравитационное линзирование сверхновой.

Цупко О.Ю. 5 69

Желтый гипергигант V1302 Aq1 в фазе быстрого

эволюционного перехода*. **Клочкова В.Г.** 11 83

Загадки странной галактики NGC 6946. **Ефремов Ю.Н.** 5 3

Звездообразование в газовом диске

линзовидной галактики*. **Прошина И.С.,**

Князев А.Ю., Сильченко О.К. 4 91

Как измеряют магнитные поля галактик.

От книги В.Л.Гинзбурга до фарадеевского синтеза.

Соколов Д.Д. 10 30

Модель с Q-шаром в центре нашей Галактики*.

Троицкий С.В. 5 86

Обнаружение столкновения нейтронных звезд*

Открытие далекого рентгеновского квазара*.

Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Еселевич М.В.,

Сазонов С.Ю. 1 82

Первые достоверные данные о переходе пульсаров

в режим «пропеллера»*. **Лутовинов А.А.**

Происхождение самых мощных сверхновых*.

Сорокина Е.И., Блинников С.И. 8 76

Список Гинзбурга: гравитационные волны,

черные дыры, темная энергия. **Черпащук А.М.,**

Чернин А.Д. 10 4

Техника спектроскопии звезд — первые 200 лет.

Панчук В.Е., Клочкова В.Г. 3 47

Хроники черной дыры, записанные

в молекулярных облаках. **Чуразов Е.М.,**

Хабибуллин И.И., Сюняев Р.А. 10 21

Центр галактики NGC 2617:

занавес остается открытым*. **Окнянский В.Л.,**

Гусейнов Н.А., Микаилов Х.М., Гаскелл К.М. 7 82

Планетные исследования

Были ли американцы на Луне? **Базилевский А.Т.** 7 47

Знаком * отмечены материалы, опубликованные в разделе «Новости науки».

Лунная база, полярная вода и опасность лунотрясений.

Базилевский А.Т. 11 67

Океан на Марсе: миф или реальность? **Иванов М.А.** 1 3

Последняя миссия космического аппарата «Кассини»* 7 81

Радиационные пояса Земли: открытие

и первые исследования. **Логачев Ю.И.** 12 12

Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий¹.

Зеленый Л.М. 12 22

Оптика

Захват света цепочкой диэлектрических наночастиц*.

Садреев А.Ф. 8 77

Как можно без потерь передавать сигнал в оптическом

компьютере? **Пухов А.А., Зябловский А.А.,**

Андрианов Е.С. 3 83

Физика конденсированного состояния

Лауреаты Нобелевской премии 2016 года.

По физике — Д.Таулесс, Д.Холдейн, М.Костерлиц.

Минеев В.П. 1 67

Новая жизнь теории среднего поля. **Фридкин В.М.** 10 43

Физика взаимодействия сверхпроводимости

и магнетизма. **Буздин А.И., Мельников А.С.** 10 37

Физика плазмы

Модернизированный токамак «Глобус-М2»

заработает в следующем году* 11 84

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Нейтрино — ключ к загадкам Вселенной? **Куденко Ю.Г.** 6 3

Лазерная физика

Лазерное дистанционное зондирование температуры

водной поверхности*. **Першин С.М., Бункин А.Ф.,**

Леднев В.Н., Гришин М.Я. 3 84

Манипулирование абрикосовскими вихрями

с помощью лазера*. **Вещунов И.С.** 3 82

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Органическая химия

Лауреаты Нобелевской премии 2016 года.

По химии — Ж.-П.Соваж, Ф.Стоддарт, Б.Феринга.

Вацадзе С.З. 1 71

РАЗДЕЛЕННАЯ СУДЬБА — НЕДЕЛИМАЯ ЖИЗНЬ

К 150-летию со дня рождения академика В.Н.Ипатьева.

Егоров М.П., Усачев Н.Я., Беланова Е.П. 11 35

Химические высоты академика Ипатьева.

Матвейчук А.А. 11 38

Физическая химия

Новый экологически чистый способ производства

олигосахаридов*. **Васильева Т.М.** 6 89

Высокомолекулярные соединения

Можно ли размягчить жесткий полимер?

Волынский А.Л. 2 11

¹ Материал подготовлен С.Е.Виноградовой и О.В.Закутней.

Кинетика и катализ

Наследие великого химика — сохраним ли?

Голосман Е.З., Боручкий П.Н. 11 47

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Биофизика

Биогенное управление образованием льда. **Пучков Е.О.** 2 27

Молекулярная биология

Знакомьтесь — это FАСТ! **Малоченко Н.В.,**

Валиева М.Е., Кирпичников М.П., Феофанов А.В.,

Студитский В.М. 11 3

Лауреаты Нобелевской премии 2016 года.

По физиологии или медицине — Ё.Осуми.

Поспелов В.А. 1 77

Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)

Начали продавать генетически

модифицированного лосося*. **Кузнецова Т.А.** 11 86

Микробиология

Биодеградация белого фосфора. **Миנדубаев А.З.,**

Волошина А.Д., Валидов Ш.З., Яхваров Д.Г. 5 29

Зоомикробные симбиозы и азотный метаболизм

у фитофагов. **Степаньков А.А., Кузнецова Т.А.,**

Умаров М.М., Вечерский М.В. 9 82

Микробиота пожилых: истоки долголетия.

Суворов А.Н. 1 22

Нитрогеназная активность

в бактериально-микотических сообществах,

ассоциированных с словым лубоедом.

Вечерский М.В., Кузнецова Т.А., Степаньков А.А. 12 71

Зоология

Гималайские медведи Большого Хехцира.

Ткаченко К.Н. 4 27

Паук-серебрянка выходит из воды? **Михайлов К.Г.,**

Ноговицын П.Р. 10 66

Подготовка молодых бакланов для рыбного промысла

в Китае. **Обозова Т.А.** 5 44

«Разумная предусмотрительность» и другие

особенности поведения врановых. **Зорина З.А.** 4 14

Самая сибирская лягушка. **Берман Д.И.,**

Булахова Н.А., Балан И.В. 8 3

Ихтиология

О происхождении ряпушки на Соловецких островах:

архивные документы в исследовании микроэволюции.

Алексеева Я.И., Махров А.А. 7 37

Рыбы в горных озерах бассейна Амура. **Антонов А.Л.** 2 54

Генетика

Аудиогенная эпилепсия грызунов. **Полетаева И.И.** 9 40

Неандертальцы нам ближе, чем казалось?*

ЭВОЛЮЦИЯ, НАПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА 11 87

К 100-летию со дня рождения Д.К.Беляева 6 46

Вступительное слово. **Бородин П.М.** 6 46

Доместикация. **Рувинский А.О.** 6 49

Дестабилизирующий отбор как фактор

изменчивости при доместикации животных.

Беляев Д.К. 6 63

Приручение серой крысы. **Кожемякина Р.В.** 6 70

Возрождение поруганной науки. Фрагменты

из книги воспоминаний об академике Д.К.Беляеве 6 79

«Я верю в добрые начала человека...».

Интервью с Д.К.Беляевым 6 86

Экология

Биодеградация белого фосфора. **Миנדубаев А.З.,**

Волошина А.Д., Валидов Ш.З., Яхваров Д.Г. 5 29

Вымирание сахалинской кабарги. **Приходько В.И.** 5 61

Пималайские медведи Большого Хехцира.

Ткаченко К.Н. 4 27

Как обезопасить население от воздействия ¹⁴C?*

Алексахин Р.М., Спириин Е.В., Соломатин В.М. 6 88

Мангровые леса. К 30-летию Российско-Вьетнамского

Тропического центра. **Бобров В.В.** 12 62

Почему на Сахалине и Кунашире отсутствуют

тропические земляные черви Dgawida? **Ганин Г.Н.** 2 49

Самая сибирская лягушка. **Берман Д.И.,**

Булахова Н.А., Балан И.В. 8 3

Трагедия гималайского медведя. **Колчин С.А.,**

Ткаченко К.Н., Юдин В.Г., Олейников А.Ю.,

Салькина Г.П. 9 58

Почвоведение

Фульгуриты: «автографы молний» в песчаных

дюнах Якутии. **Галанин А.А., Шишков В.А.,**

Климова И.В. 5 52

Физиология

Аудиогенная эпилепсия грызунов. **Полетаева И.И.** 9 40

Антропология

К проблеме происхождения скифов*.

Мовсесян А.А. 8 80

Неандертальцы нам ближе, чем казалось?*

Иммунология 11 87

Развитие редкой болезни: ДНК-полимераза

как регулятор иммунитета. **Старокадомский П.Л.** 1 39

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Конкурсы «Инженер года»*. **Голосман Е.З.** 11 85

Авиационная и ракетно-космическая техника

Лазерные системы реактивной тяги. **Резунков Ю.А.** 4 3

Плазменные двигатели и будущее космонавтики.

Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М. 12 33

Приборостроение, метрология

и информационно-измерительные приборы

и системы

Микрофокусный рентгеновский источник

с визуализацией излучения*. **Турьянский А.Г.** 2 81

Энергетика

Как обезопасить население от воздействия ¹⁴C?*

Алексахин Р.М., Спириин Е.В., Соломатин В.М. 6 88

Нанотехнологии и наноматериалы

(по отраслям)

Кремниевые наночастицы для нелинейных

наноантенн*. **Баранов Д.Г.** 4 92

Необычное окисление наночастиц кремния

в атмосфере кислорода*. **Успенский Ю.А.,**

Лепешкин С.В., Батуриин В.С., Оганов А.Р. 5 87

Ультратвердый углеродный нанокомпозит

на основе фуллерита*. **Квашнина Ю.А.,**

Квашнин А.Г., Чернозатонский Л.А.,

Сорокин П.Б. 7 85

Экологичный способ получения

кремниевых нанонитей* 2 81

Технология органических веществ

Перья жар-птицы. **Болотин Б.М.** 3 3

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Археология

Археология и история: хронологическо-методологический диссонанс родственных наук. **Черных Е.Н.** 3 57

Глиняное совершенство амурского неолита.

Медведев В.Е. 9 48

Первые на Шелковом пути*. **Анойкин А.А.** 1 87

По следам древних землетрясений в Горном Алтае*.

Деев Е.В., Бородовский А.П. 3 86

Подвеска с солярной символикой

из Северного Приохотья*. **Лебединцев А.И.** 4 95

Признаки древности китайских бронзовых сплавов.

Дронова Н.Д., Портнов А.М. 11 11

Следы землетрясения в пещерном городе Вардзиа.

Корженков А.М., Варданян А.А., Стаховская Р.Ю. 10 55

Стены и башни древнего Изборска. **Лопатин Н.В.** 1 55

Умревинский монетный клад: новые открытия*.

Бородовский А.П. 2 85

История науки и техники

А.Ф.Слудский — первый директор

Карадагской научной станции. **Любина Г.И.** 3 69

Артур Комптон — мастер тонкого

и точного эксперимента. **Щербаков Р.Н.** 9 86

Большая наука астрономия. **Чернин А.Д.,**

Бердников Л.Н., Расторгуев А.С. 5 11

«В ту пору мы были всецело поглощены

новой областью...» К 150-летию со дня рождения

М.Склодовской-Кюри. **Щербаков Р.Н.** 12 75

Жизнь под знаком исследования времени.

К 100-летию со дня рождения И.Р.Пригожина.

Щербаков Р.Н. 2 72

Земля Франца-Иосифа:

первые отечественные полярники. **Романенко Ф.А.** 11 18

Знаменит, но малоизвестен: академик П.С.Паллас,

ученый и путешественник. **Боркин Л.Я.** 8 68

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2016 ГОДА

По физике — Д.Таулесс, Д.Холдейн, М.Костерлиц.

Минеев В.П. 1 67

По химии — Ж.-П.Соваж, Ф.Стодарт, Б.Феринга.

Вацадзе С.З. 1 71

По физиологии или медицине — Ё.Осуми.

Поспелов В.А. 1 77

ОТ РОМАНТИКИ ДО ПРАКТИКИ. 60 ЛЕТ В КОСМОСЕ

Первые спутниковые научные исследования.

Батурин Ю.М. 12 4

Радиационные пояса Земли: открытие

и первые исследования. **Логачев Ю.И.** 12 12

Спутник: шестьдесят лет по дороге открытий¹.

Зеленый Л.М. 12 22

Плазменные двигатели и будущее космонавтики.

Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И.,

Кулыгин В.М. 12 33

Открытия и предчувствия физика Вильгельма Вебера.

Булюбаш Б.В. 10 74

РАЗДЕЛЕННАЯ СУДЬБА — НЕДЕЛИМАЯ ЖИЗНЬ

К 150-летию со дня рождения академика В.Н.Ипатьева.

Егоров М.П., Усачев Н.Я., Беланова Е.П. 11 35

Химические высоты академика Ипатьева.

Матвейчук А.А. 11 38

Наследие великого химика — сохраним ли?

Голосман Е.З., Боруцкий П.Н. 11 47

«Несмотря на всякого рода переживания

и невзгоды...». **Сорокина М.Ю.** 11 59

Сибирский графит Алибера. **Андреева И.П.,**

Бессуднова З.А. 11 73

Сто лет из жизни естественнонаучных музеев

Оренбургского края (1830–1930). **Савинова Т.Н.** 4 80

Техника спектроскопии звезд — первые 200 лет.

Панчук В.Е., Ключкова В.Г. 3 47

УЧЕНЫЙ ПЕРВОГО РЯДА

Памяти Л.Д.Фаддеева 5 74

Научное мировоззрение и «Природа». **Фаддеев Л.Д.** 5 75

О нашем учителе. **Семенов-Тянь-Шанский М.А.** 5 77

ФИЗИКА НА ЛЮБОЙ РАЗМЕР

Посвящается 101-й годовщине со дня рождения

В.Л.Гинзбурга 10 3

Список Гинзбурга: гравитационные волны,

черные дыры, темная энергия. **Черепашук А.М.,**

Чернин А.Д. 10 4

Хроники черной дыры, записанные

в молекулярных облаках. **Чуразов Е.М.,**

Хабибуллин И.И., Сюняев Р.А. 10 21

Как измеряют магнитные поля галактик.

От книги В.Л.Гинзбурга до фарадеевского синтеза.

Соколов Д.Д. 10 30

Физика взаимодействия сверхпроводимости

и магнетизма. **Будзин А.И., Мельников А.С.** 10 37

Новая жизнь теории среднего поля.

Фридкин В.М. 10 43

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

Инфекционные болезни

Форум «Кох—Мечников» по туберкулезу в Москве.

Линге И.А., Апт А.С., Кондратьева Т.К. 9 3

КУЛЬТУРОЛОГИЯ

Музееведение, консервация

и реставрация историко-культурных объектов

Признаки древности китайских бронзовых сплавов.

Дронова Н.Д., Портнов А.М. 11 11

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология

Геологическая история Байкала. **Мац В.Д.,**

Ефимова И.М. 3 13

Древняя карбонатитовая провинция

на Алданском щите*. **Прокопьев И.Р.** 6 90

Желтые алмазы из северных регионов Якутии*.

Зедгенизов Д.А. 6 91

Как каменная монетка стала «золотой».

Комаров В.Н., Агафонова Г.В., Ковальчук Е.В. 2 61

На севере Сибири открыта новая крупная

магматическая провинция*. **Веселовский Р.В.** 5 88

Оледенения Земли. **Чумаков Н.М.** 7 17

Сибирский графит Алибера. **Андреева И.П.,**

Бессуднова З.А. 11 73

¹ Материал подготовлен С.Е.Виноградовой и О.В.Закутней.

Урочище Кизил-Коба — жемчужина Горного Крыма.			
Комаров В.Н., Панова А.В.	1	60	
Палеонтология и стратиграфия			
В урочище Волчья грива обнаружена самая высокая в Азии концентрация костей мамонтов*.			
Лещинский С.В.	1	85	
Взаимодействие растений с насекомыми: палеозойская история. Наугольных С.В.	3	36	
Гигантская морская ящерица со склона Золотого хребта на Чукотке. Алифанов В.Р., Грабовский А.А.	1	43	
Новый плиозавр из Ульяновского Поволжья*.			
Архангельский М.С., Зверьков Н.Г.	7	86	
Сом-«палеонтолог». Комаров В.Н., Юшин К.И.	9	79	
Титанозавры: новые данные о возрастной и индивидуальной изменчивости зубов*.			
Аверьянов А.О.	2	83	
Геотектоника и геодинамика			
Биография Земли: основные этапы геологической истории. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.	6	12	
Тектоника плит: что дальше? Мирлин Е.Г.	8	15	
Петрология, вулканология			
Витрифицированные форты — что это такое?			
Глазовская Л.И., Щеккина Т.И.	7	30	
Минералогия, кристаллография			
Бозинит — новый минерал надгруппы турмалина*.			
Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д., Эртл А.	4	94	
Великаны в стране пигмеев. Расцветаева Р.К.	4	66	
Германий в решетке алмаза*. Пальянов Ю.Н.	1	83	
Игольчатые алмазные кристаллиты: необычная обычность*. Образцов А.Н.	7	83	
Кувьркающиеся железомарганцевые конкреции на дне Финского залива. Колокольцев В.Г.	10	71	
Признаки древности китайских бронзовых сплавов. Дронова Н.Д., Портнов А.М.	11	11	
С Луны на Землю: новые данные о пироксеноидах. Расцветаева Р.К., Щипалкина Н.В., Аксенов С.М.	1	30	
Содружество модулей: структура роймиллерита — нового минерала из Намибии. Расцветаева Р.К., Аксенов С.М.	6	41	
Литология			
Катастрофы на подводных склонах. Кузнецов В.Г.	9	70	
Рассказывает образец осадочной породы. Кузнецов В.Г.	4	58	
Гидрогеология			
Подземные воды Дагестана: рациональное использование. Самедов Ш.Г., Абдулганиева Т.И.	7	52	
Современные водные ресурсы Восточной Сибири. Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И.	8	24	
Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования. Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Миццаев М.Ш., Шаипов А.А.	3	28	
Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых			
Золото и органическое вещество земной коры. Кизильштейн Л.Я.	10	63	
Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых			
Аргонавты: испытание на пути в Понт. Никонов А.А.	2	38	
Балтика: тысячелетний катаклизм. Никонов А.А.	8	58	
Прогноз землетрясений. Почему молчат ученые? Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н.	5	18	
Следы землетрясения в пещерном городе Вардзиа. Корженков А.М., Вардания А.А., Стаховская Р.Ю.	10	55	
Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов			
Земля Франца-Иосифа: первые отечественные полярники. Романенко Ф.А.	11	18	
Остров Матуа: активный вулкан и военная база. Иванов А.И.	2	18	
Природноочаговые болезни в России. Малхазова С.М., Миронова В.А.	4	37	
Ульбанский залив. Махинов А.Н., Крюкова М.В., Пронкевич В.В.	8	32	
Черноморский шпрот: донный траловый промысел и его последствия. Фащук Д.Я.	12	52	
Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география			
Иодо — скала раздора в Восточно-Китайском море. Глушков В.В.	2	66	
Геоморфология и эволюционная география			
Удивительный карст в долине реки Синеи. Трофимова Е.В.	1	48	
Фульгуриты: «автографы молний» в песчаных дюнах Якутии. Галанин А.А., Шишков В.А., Климова И.В.	5	52	
Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия			
Каким может быть будущее Аральского моря? Аладин Н.В., Ермаханов З.К., Миклин Ф., Плотников И.С.	9	26	
Подземные воды Дагестана: рациональное использование. Самедов Ш.Г., Абдулганиева Т.И.	7	52	
Современные водные ресурсы Восточной Сибири. Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И.	8	24	
Океанология			
Марганцевые руды Японского моря (экономическая зона России). Астахова Н.В., Лопатников Е.А.	12	45	
Рифтовая долина — ключевая структура дна океана. Ильин А.В.	9	12	
Черноморский шпрот: донный траловый промысел и его последствия. Фащук Д.Я.	12	52	
Физика атмосферы и гидросферы			
Долгосрочный прогноз летнего муссона в Индии. Суровяткина Е.Д.	2	46	
Поможет ли климату парижское «лекарство»? Киселев А.А., Кароль И.Л.	1	14	
Радиоуглеродное свидетельство антропогенной причины потепления. Бялко А.В.	9	75	
Череда погодных аномалий — случайность или закономерность? Киселев А.А., Кароль И.Л.	7	9	
Метеорология, климатология, агрометеорология			
Годичные кольца китайского можжевельника: уникальная летопись климата. Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Кин Ч., Лиу Дж.-Дж., Янг Б.	10	48	

Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Космическая диагностика климатической системы Земли. Гансвинд И.Н.	8	44
Характеристика поверхностных волн по спутниковым изображениям солнечного блика*. Юрковская М.В., Кудрявцев В.Н.	8	78
Геоинформатика		
Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования. Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А.	3	28
Геоэкология		
Мамаев курган — природно-мемориальный ландшафт и объект культурного наследия. Брылёв В.А., Нязев Ю.П.	11	28
Россыпи радиоактивных песков в эстуарии реки Варзуги (Белое море). Сафьянов Г.А., Рязанцев Г.Б.	3	65
Сельское хозяйство России в «экологическом зеркале». Клюев Н.Н.	6	26

АПРЕЛЬСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

Великаны в стране пигмеев. Расцветаева Р.К.	4	66
О прокрастинации в научных исследованиях. Гельфанд М.С.	4	61

В КОНЦЕ НОМЕРА

Вулканы и облака. Быкасов В.Е.	8	86
Каменная береза Камчатки. Быкасов В.Е.	2	89
Подсказка Пьера Кюри: об открытии отрицательной люминесценции. Иванов-Омский В.И.	3	92
«Старички» из повести Чехова «Степь». Архипов В.Ю.	7	94
Эффект мезозойской бабочки, или Эволюция, которой не было. Архангельский М.С., Нелихов А.Е.	5	90

ВЕСТИ ИЗ ЭКСПЕДИЦИЙ

Мангровые леса. К 30-летию Российско-Вьетнамского Тропического центра. Бобров В.В.	12	62
---	----	----

ВРЕМЕНА И ЛЮДИ

А.Ф.Слудский — первый директор Карадагской научной станции. Любина Г.И.	3	69
Артур Комптон — мастер тонкого и точного эксперимента. Щербаков Р.Н.	9	86
«В ту пору мы были всецело поглощены новой областью...» К 150-летию со дня рождения М.Склодовской-Кюри. Щербаков Р.Н.	12	75
Жизнь наукой. Наточин Ю.В.	7	69
Жизнь под знаком исследования времени. К 100-летию со дня рождения И.Р.Пригожина. Щербаков Р.Н.	2	72
Знаменит, но малоизвестен: академик П.С.Паллас, ученый и путешественник. Боркин Л.Я.	8	68
Открытия и предчувствия физика Вильгельма Вебера. Булюбаш Б.В.	10	74
Сибирский графит Алибера. Андреева И.П., Бессуднова З.А.	11	73
Сто лет из жизни естественнонаучных музеев Оренбургского края (1830–1930). Савинова Т.Н.	4	80

УЧЕНЫЙ ПЕРВОГО РЯДА

Памяти Л.Д.Фаддеева	5	74
Научное мировоззрение и «Природа». Фаддеев Л.Д.	5	75
О нашем учителе. Семенов-Тянь-Шанский М.А.	5	77
ЭВОЛЮЦИЯ, НАПРАВЛЯЕМАЯ ВОЛЕЙ ЧЕЛОВЕКА		
К 100-летию со дня рождения Д.К.Беляева	6	46
Вступительное слово. Бородин П.М.	6	46
Доместикация. Рувинский А.О.	6	49
Дестабилизирующий отбор как фактор изменчивости при доместикации животных. Беляев Д.К.	6	63
Приручение серой крысы. Кожемякина Р.В.	6	70
Возрождение поруганной науки. Фрагменты из книги воспоминаний об академике Д.К.Беляеве	6	79
«Я верю в добрые начала человека...». Интервью с Д.К.Беляевым	6	86

ЗАМЕТКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

Кувыркающиеся железомарганцевые конкреции на дне Финского залива. Колокольцев В.Г.	10	71
Паук-серебрянка выходит из воды? Михайлов К.Г., Ноговицын П.Р.	10	66
Рассказывает образец осадочной породы. Кузнецов В.Г.	4	58
Урочище Кизил-Коба — жемчужина Горного Крыма. Комаров В.Н., Панова А.В.	1	60

ЛЕКТОРИЙ

Катастрофы на подводных склонах. Кузнецов В.Г.	9	70
---	---	----

НАУКА И ОБЩЕСТВО

Мифы о происхождении человека. Соколов А.Б., Власова Е.М., Боринская С.А., Березкин Ю.Е.	10	84
О лженаучности гомеопатии. Меморандум Комиссии по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований при Президиуме Российской академии наук	3	80
Трудности научного перевода: примеры стилистических дефектов с указанием возможных способов их устранения и попутными комментариями. Лашкевич Ю.И.	7	56

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Были ли американцы на Луне? Базилевский А.Т.	7	47
Гигантская морская ящерица со склона Золотого хребта на Чукотке. Алифанов В.Р., Грабовский А.А.	1	43
Гравитационное линзирование сверхновой. Цупко О.Ю.	5	69
Долгосрочный прогноз летнего муссона в Индии. Суровяткина Е.Д.	2	46
Золото и органическое вещество земной коры. Кизильштейн Л.Я.	10	63
Зоомикробные симбиозы и азотный метаболизм у фитофагов. Степаньков А.А., Кузнецова Т.А., Умаров М.М., Вечерский М.В.	9	82
Иодо — скала раздора в Восточно-Китайском море. Глушков В.В.	2	66
Как каменная монетка стала «золотой». Комаров В.Н., Агафонова Г.В., Ковальчук Е.В.	2	61

Лунная база, полярная вода и опасность лунотрясений.

Базилевский А.Т. 11 67

Нитрогеназная активность

в бактериально-микотических сообществах, ассоциированных с еловым лубоедом.

Вечерский М.В., Кузнецова Т.А., Степаньков А.А. 12 71

Подземные воды Дагестана: рациональное

использование. **Самедов Ш.Г., Абдулганиева Т.И.** 7 52

Почему на Сахалине и Кунашире отсутствуют

тропические земляные черви *Drawida*? **Ганин Г.Н.** 2 49

Радиоуглеродное свидетельство

антропогенной причины потепления. **Бялко А.В.** 9 75

Развитие редкой болезни: ДНК-полимераза

как регулятор иммунитета. **Старокадомский П.Л.** 1 39

Россыпи радиоактивных песков в эстуарии

реки Варзуги (Белое море). **Сафьянов Г.А.,**

Рязанцев Г.Б. 3 65

Рыбы в горных озерах бассейна Амура. **Антонов А.Л.** 2 54

Содружество модулей: структура роймиллерита —

нового минерала из Намибии. **Расцветаева Р.К.,**

Аксенов С.М. 6 41

Сом-«палеонтолог». **Комаров В.Н., Юшин К.И.** 9 79

Стены и башни древнего Изборска. **Лопатин Н.В.** 1 55

Столбчатые базальты и конвекция Рэлея—Бенара.

Чудов С.В. 6 34

Удивительный карст в долине реки Синеи.

Трофимова Е.В. 1 48

НЕКРОЛОГ

Об Алексее Андреевиче Ярошевском 10 92

НОВЫЕ КНИГИ

1 93, 2 87, 3 89, 6 95, 7 92, 8 84, 10 93, 11 91, 12 87

ОБЪЯВЛЕНИЯ

3 93, 7 93, 8 85

РЕЦЕНЗИИ

Геология Северной Евразии (на кн.: В.Б.Караулов.

Введение в региональную геологию России и ближнего

зарубежья). **Комаров В.Н.** 6 93

Замечательная книга о Космосе

(на кн.: М.Я.Маров. Космос. От Солнечной системы

вглубь Вселенной). **Черепашук А.М.** 7 88

Испаноязычное издание книги Н.И.Вавилова

«Пять континентов» (на кн.: N.I.Vavilov.

Cinco continentes). **Вишнякова М.А.** 11 93

О лисах и людях: сибирская повесть о рукотворной

эволюции (на кн.: L.A.Dugatkin, L.N.Trut. How to Tame

a Fox (and Build a Dog): Visionary Scientists and a Siberian

Tale of Jump-Started Evolution). **Винарский М.В.,**

Федотова А.А. 11 88

Петр Иванович Лисицын: судьба ученого на фоне эпохи

(на кн.: О.Ю.Елина. У истоков российской селекции

и семеноводства. Петр Иванович Лисицын

на Шатиловской опытной станции и Госсемкультуре).

Фандо Р.А. 8 81

Причастны ли охотники к сокращению

биоразнообразия? (на кн.: А.А.Данилкин.

Охота, охотничье хозяйство и биоразнообразии).

Приходько В.И. 1 89

Авторский указатель за 2017 год

Абдулганиева Т.И. (Самедов Ш.Г.)* 7 52

Аверьянов А.О. 2 83

Агафонова Г.В.

(**Комаров В.Н., Ковальчук Е.В.**) 2 61

Аксенов С.М. (Расцветаева Р.К.) 6 41

Аксенов С.М. (Расцветаева Р.К.,

Щипалкина Н.В.) 1 30

Аладин Н.В. (Ермаханов З.К.,

Миклин Ф., Плотников И.С.) 9 26

Алексахин Р.М. (Спирин Е.В.,

Соломатин В.М.) 6 88

Алексеева Я.И. (Махров А.А.) 7 37

Алифанов В.Р. (Грабовский А.А.) 1 43

Андреева И.П. (Бессуднова З.А.) 11 73

Андреианов Е.С.

(**Пухов А.А., Зябловский А.А.)** 3 83

* Здесь и далее в скобках указаны соавторы.

Анойкин А.А. 1 87

Антонов А.Л. 2 54

Апт А.С.

(**Линге И.А., Кондратьева Т.К.**) 9 3

Архангельский М.С. (Зверьков Н.Г.) 7 86

Архангельский М.С. (Нелихов А.Е.) 5 90

Архипов В.Ю. 7 94

Астахова Н.В. (Лопатников Е.А.) 12 45

Базилевский А.Т. 7 47

Бакшеев И.А. (Прокофьев В.Ю.,

Зорина Л.Д., Эрл А.) 4 94

Балан И.В.

(**Берман Д.И., Булахова Н.А.)** 8 3

Баранов Д.Г. 4 92

Батурин В.С. (Успенский Ю.А.,

Лепешкин С.В., Оганов А.Р.) 5 87

Батурин Ю.М. 12 4

Беланова Е.П.

(**Егоров М.П., Усачев Н.Я.**) 11 35

Беляев Д.К. 6 63

Бердников Л.Н.

(**Чернин А.Д., Расторгуев А.С.**) 5 11

Березкин Ю.Е. (Соколов А.Б.,

Власова Е.М., Боринская С.А.) 10 84

Берман Д.И.

(**Булахова Н.А., Балан И.В.)** 8 3

Бессуднова З.А. (Андреева И.П.) 11 73

Блинников С.И. (Сорокина Е.И.) 8 76

Бобров В.В. 12 62

Болотин Б.М. 3 3

Боринская С.А. (Соколов А.Б.,

Власова Е.М., Березкин Ю.Е.) 10 84

Боркин Л.Я. 8 68

Бородин П.М. 6 46

Бородовский А.П. 2 85

Бородовский А.П. (Деев Е.В.) 3 86

Боруцкий П.Н. (Голосман Е.З.)	11	47	Егоров М.П.		Комаров В.Н.			
Брылёв В.А. (Князев Ю.П.)	11	28	(Усачев Н.Я., Беланова Е.П.)	11	35	(Агафонова Г.В., Ковальчук Е.В.)	2	61
Буздин А.И. (Мельников А.С.)	10	37	Ермаханов З.К. (Аладин Н.В., Миклин Ф., Плотников И.С.)	9	26	Комаров В.Н. (Панова А.В.)	1	60
Булахова Н.А.			Еселевич М.В. (Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Сазонов С.Ю.)	1	82	Комаров В.Н. (Юшин К.И.)	9	79
(Берман Д.И., Балан И.В.)	8	3	Ефимова И.М. (Мац В.Д.)	3	13	Кондратьев Б.П.	2	3
Булюбаш Б.В.	10	74	Ефремов Ю.Н.	5	3	Кондратьева Т.К.		
Бункин А.Ф. (Першин С.М., Леднев В.Н., Гришин М.Я.)	3	84	Зверьков Н.Г. (Архангельский М.С.)	7	86	(Линге И.А., Апт А.С.)	9	3
Буренин Р.А. (Хорунжев Г.А., Еселевич М.В., Сазонов С.Ю.)	1	82	Зедгенизов Д.А.	6	91	Корженков А.М.		
Быкасов В.Е.	2	89	Зеленый Л.М.	12	22	(Варданян А.А., Стаховская Р.Ю.)	10	55
	8	86	Зорина З.А.	4	14	Крюкова М.В.		
Бялко А.В.	7	3	Зорина Л.Д. (Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Эртл А.)	4	94	(Махинов А.Н., Пронкевич В.В.)	8	32
	9	75	Зябловский А.А. (Пухов А.А., Андрианов Е.С.)	3	83	Куденко Ю.Г.	6	3
Валидов Ш.З. (Миндубаев А.З., Волошина А.Д., Яхваров Д.Г.)	5	29	Иванов А.Н.	2	18	Кудрявцев В.Н. (Юровская М.В.)	8	78
Валиева М.Е. (Малюченко Н.В., Кирпичников М.П., Феофанов А.В., Студитский В.М.)	11	3)	Иванов М.А.	1	3	Кузнецов В.Г.	4	58
Варданян А.А. (Корженков А.М., Стаховская Р.Ю.)	10	55	Иванов-Омский В.И.	3	92	Кузнецова Т.А.	11	86
Васильева Т.М.	6	89	Ильгисонис В.И. (Ковальчук М.В., Кулыгин В.М.)	12	33	Кузнецова Т.А. (Вечерский М.В., Степаньков А.А.)	12	71
Вацадзе С.З.	1	71	Ильин А.В.	9	12	Кузнецова Т.А. (Степаньков А.А., Умаров М.М., Вечерский М.В.)	9	82
Веселовский Р.В.	5	88	Кароль И.Л. (Киселев А.А.)	1	14	Кузьмин М.И. (Ярмолук В.В.)	6	12
Вечерский М.В.			Кашковский В.В. (Семенов Р.М., Лопатин М.Н.)	5	18	Кулыгин В.М. (Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И.)	12	33
(Кузнецова Т.А., Степаньков А.А.)	12	71	Квашнина Ю.А., Чернозатонский Л.А., Сорокин П.Б.)	7	85	Лашкевич Ю.И.	7	56
Вечерский М.В. (Степаньков А.А., Кузнецова Т.А., Умаров М.М.)	9	82	Квашнина Ю.А. (Квашнин А.Г., Чернозатонский Л.А., Сорокин П.Б.)	7	85	Лебединцев А.И.	4	95
Вещунов И.С.	3	82	Кизильштейн Л.Я.	10	63	Леднев В.Н. (Першин С.М., Бункин А.Ф., Гришин М.Я.)	3	84
Винарский М.В. (Федотова А.А.)	11	88	Кин Ч. (Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Лиу Дж.-Дж., Янг Б.)	10	48	Лепешкин С.В. (Успенский Ю.А., Батурын В.С., Оганов А.Р.)	5	87
Вишнякова М.А.	11	93	Кирпичников М.П. (Малюченко Н.В., Валиева М.Е., Феофанов А.В., Студитский В.М.)	11	3	Лещинский С.В.	1	85
Власова Е.М. (Соколов А.Б., Боринская С.А., Березкин Ю.Е.)	10	84	Киселев А.А. (Кароль И.Л.)	1	14	Линге И.А.		
Волошина А.Д. (Миндубаев А.З., Валидов Ш.З., Яхваров Д.Г.)	5	29	Климова И.В.			(Апт А.С., Кондратьева Т.К.)	9	3
Волынский А.Л.	2	11	(Галанин А.А., Шишков В.А.)	5	52	Лиу Дж.-Дж. (Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Кин Ч., Янг Б.)	10	48
Галанин А.А.			Клочкова В.Г.	11	83	Логачев Ю.И.	12	12
(Шишков В.А., Климова И.В.)	5	52	Клочкова В.Г. (Панчук В.Е.)	3	47	Лопатин М.Н. (Семенов Р.М., Кашковский В.В.)	5	18
Ганин Г.Н.	2	49	Клюев Н.Н.	6	26	Лопатин Н.В.	1	55
Гансвинд И.Н.	8	44	Князев А.Ю. (Прошина И.С., Сильченко О.К.)	4	91	Лопатников Е.А. (Астахова Н.В.)	12	45
Гаскелл К.М. (Окнянский В.Л., Гусейнов Н.А., Микаилов Х.М.)	7	82	Князев Ю.П. (Брылёв В.А.)	11	28	Лутовинов А.А.	4	92
Гельфанд М.С.	4	61	Ковальчук Е.В. (Комаров В.Н., Агафонова Г.В.)	2	61	Любина Г.И.	3	69
Глазовская Л.И. (Щекина Т.И.)	7	30	Ковальчук М.В.			Малхазова С.М. (Миронова В.А.)	4	37
Глушков В.В.	2	66	(Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М.)	12	33	Малюченко Н.В. (Валиева М.Е., Кирпичников М.П., Феофанов А.В., Студитский В.М.)	11	3
Голосман Е.З.	11	85	Кожемякина Р.В.	6	70	Матвейчук А.А.	11	38
Голосман Е.З. (Боруцкий П.Н.)	11	47	Колокольцев В.Г.	10	71	Махинов А.Н. (Крюкова М.В., Пронкевич В.В.)	8	32
Грабовский А.А. (Алифанов В.Р.)	1	43	Колчин С.А. (Ткаченко К.Н., Юдин В.Г., Олейников А.Ю., Салькина Г.П.)	9	58	Махров А.А. (Алексеева Я.И.)	7	37
Гришин М.Я. (Першин С.М., Бункин А.Ф., Леднев В.Н.)	3	84	Комаров В.Н.	6	93	Мац В.Д. (Ефимова И.М.)	3	13
Гусейнов Н.А. (Окнянский В.Л., Микаилов Х.М., Гаскелл К.М.)	7	82				Медведев В.Е.	9	48
Даценко Н.М. (Сонечкин Д.М., Кин Ч., Лиу Дж.-Дж., Янг Б.)	10	48				Мельников А.С. (Буздин А.И.)	10	37
Деев Е.В. (Бородовский А.П.)	3	86				Микаилов Х.М. (Окнянский В.Л., Гусейнов Н.А., Гаскелл К.М.)	7	82
Джамалов Р.Г. (Сафронова Т.И.)	8	24				Миклин Ф. (Аладин Н.В., Ермаханов З.К., Плотников И.С.)	9	26
Дронова Н.Д. (Портнов А.М.)	11	11				Миндубаев А.З. (Волошина А.Д., Валидов Ш.З., Яхваров Д.Г.)	5	29

Минеев В.П.	1	67	Садреев А.Ф.	8	77	Фархутдинов А.М. (Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А.)	3	28
Минцаев М.Ш. (Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Шаипов А.А.)	3	28	Сазонов С.Ю. (Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Еселевич М.В.)	1	82	Фашук Д.Я.	12	52
Мирлин Е.Г.	8	15	Салькина Г.П. (Колчин С.А., Ткаченко К.Н., Юдин В.Г., Олейников А.Ю.)	9	58	Федотова А.А. (Винарский М.В.)	11	88
Миронова В.А. (Малхазова С.М.)	4	37	Самедов Ш.Г. (Абдулганиева Т.И.)	7	52	Феофанов А.В. (Малюченко Н.В., Валиева М.Е., Кирпичников М.П., Студитский В.М.)	11	3
Михайлов К.Г. (Ноговицын П.Р.)	10	66	Сафронова Т.И. (Джамалов Р.Г.)	8	24	Фридкин В.М.	10	43
Мовсесян А.А.	8	80	Сафьянов Г.А. (Рязанцев Г.Б., Семенов Р.М. (Кашковский В.В., Лопатин М.Н.)	5	18	Хабибуллин И.И.		
Н аточин Ю.В.	7	69	Семенов-Тян-Шанский М.А.	5	77	(Чуразов Е.М., Сюняев Р.А.)	10	21
Наугольных С.В.	3	36	Сильченко О.К. (Прошина И.С., Князев А.Ю.)	4	91	Хорунжев Г.А. (Буренин Р.А., Еселевич М.В., Сазонов С.Ю.)	1	82
Нелихов А.Е. (Архангельский М.С.)	5	90	Соколов А.Б. (Власова Е.М., Боринская С.А., Березкин Ю.Е.)	10	84	Ц упко О.Ю.	5	69
Никонов А.А.	2	38	Соколов Д.Д.	10	30	Ч ерепащук А.М.	7	88
	8	58	Соломатин В.М. (Алексахин Р.М., Спирин Е.В.)	6	88	Черепашук А.М. (Чернин А.Д.)	10	4
Ноговицын П.Р. (Михайлов К.Г.)	10	66	Сонечкин Д.М. (Даценко Н.М., Кин Ч., Лиу Дж.-Дж., Янг Б.)	10	48	Черкасов С.В. (Фархутдинов А.М., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А.)	3	28
О бозова Т.А.	5	44	Сорокин П.Б.			Чернин А.Д. (Бердников Л.Н., Расторгуев А.С.)	5	11
Образцов А.Н.	7	83	(Квашнина Ю.А., Квашнин А.Г., Чернозатонский Л.А.)	7	85	Чернин А.Д. (Черепашук А.М.)	10	4
Оганов А.Р. (Успенский Ю.А., Лепешкин С.В., Батурич В.С.)	5	87	Сорокина Е.И. (Блинников С.И.)	8	76	Чернозатонский Л.А.		
Окнянский В.Л. (Тусейнов Н.А., Микаилов Х.М., Гаскелл К.М.)	7	82	Сорокина М.Ю.	11	59	(Квашнина Ю.А., Квашнин А.Г., Сорокин П.Б.)	7	85
Олейников А.Ю. (Колчин С.А., Ткаченко К.Н., Юдин В.Г., Салькина Г.П.)	9	58	Спирин Е.В. (Алексахин Р.М., Соломатин В.М.)	6	88	Черных Е.Н.	3	57
П альянов Ю.Н.	1	83	Старокадомский П.Л.	1	39	Чудов С.В.	6	34
Панова А.В. (Комаров В.Н.)	1	60	Стаховская Р.Ю. (Корженков А.М., Вардания А.А.)	10	55	Чумаков Н.М.	7	17
Панчук В.Е. (Клочкова В.Г.)	3	47	Степаньков А.А. (Вечерский М.В., Кузнецова Т.А.)	12	71	Чуразов Е.М. (Хабибуллин И.И., Сюняев Р.А.)	10	21
Першин С.М. (Бункин А.Ф., Леднев В.Н., Гришин М.Я.)	3	84	Степаньков А.А. (Кузнецова Т.А., Умаров М.М., Вечерский М.В.)	9	82	Ш аипов А.А. (Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш.)	3	28
Плотников И.С. (Аладин Н.В., Ермаханов З.К., Миклин Ф.)	9	26	Студитский В.М. (Малюченко Н.В., Валиева М.Е., Кирпичников М.П., Феофанов А.В.)	11	3	Шишков В.А.		
Полетаева И.И.	9	40	Суворов А.Н.	1	22	(Галанин А.А., Климова И.В.)	5	52
Портнов А.М. (Дронова Н.Д.)	11	11	Суроваткина Е.Д.	2	46	Ш екина Т.И. (Глазовская Л.И.)	7	30
Поспелов В.А.	1	77	Сюняев Р.А.			Щербаков Р.Н.	2	72
Приходько В.И.	1	89	(Чуразов Е.М., Хабибуллин И.И.)	10	21		9	86
	5	61	Т каченко К.Н.	4	27		12	75
Прокопьев И.Р.	6	90	Ткаченко К.Н. (Колчин С.А., Юдин В.Г., Олейников А.Ю., Салькина Г.П.)	9	58	Щипалкина Н.В.		
Прокофьев В.Ю. (Бакшеев И.А., Зорина Л.Д., Эртл А.)	4	94	Троицкий С.В.	5	86	(Расцветаева Р.К., Аксенов С.М.)	1	30
Пронкевич В.В. (Махинов А.Н., Крюкова М.В.)	8	32	Трофимова Е.В.	1	48	Э ртл А. (Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д.)	4	94
Прошина И.С. (Князев А.Ю., Сильченко О.К.)	4	91	Турынский А.Г.	2	81	Ю дин В.Г. (Колчин С.А., Ткаченко К.Н., Олейников А.Ю., Салькина Г.П.)	9	58
Пухов А.А. (Зябловский А.А., Андрианов Е.С.)	3	83	У маров М.М. (Степаньков А.А., Кузнецова Т.А., Вечерский М.В.)	9	82	Юровская М.В. (Кудрявцев В.Н.)	8	78
Пучков Е.О.	2	27	Усачев Н.Я.			Юшин К.И. (Комаров В.Н.)	9	79
Р асторгуев А.С.			(Егоров М.П., Беланова Е.П.)	11	35	Я нг Б. (Даценко Н.М., Сонечкин Д.М., Кин Ч., Лиу Дж.-Дж.)	10	48
(Чернин А.Д., Бердников Л.Н.)	5	11	Успенский Ю.А. (Лепешкин С.В., Батурич В.С., Оганов А.Р.)	5	87	Ярмолюк В.В. (Кузьмин М.И.)	6	12
Расцветаева Р.К.	4	66	Ф аддеев Л.Д.	5	75	Яхваров Д.Г. (Миндубаев А.З., Волошина А.Д., Валидов Ш.З.)	5	29
Расцветаева Р.К. (Аксенов С.М.)	6	41	Фандо Р.А.	8	81			
Расцветаева Р.К. (Щипалкина Н.В., Аксенов С.М.)	1	30						
Резунков Ю.А.	4	3						
Романенко Ф.А.	11	18						
Рувинский А.О.	6	49						
Рязанцев Г.Б. (Сафьянов Г.А.)	3	65						
С авинова Т.Н.	4	80						

Информация для авторов

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

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

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

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

ПРИРОДА

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Научные редакторы
М.Б.БУРЗИН
Т.С.КЛЮВИТКИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
О.И.ШУТОВА

Перевод содержания
Т.А.КУЗНЕЦОВА

Графика, верстка:
С.В.УСКОВ

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Президиум Российской академии наук

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

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

Подписано в печать 24.11.2017
Формат 60×88 ¹/₈
Бумага офсетная. Цифровая печать
Усл. печ. л. 11,16. Уч. изд. л. 12,2
Тираж 285 экз. Заказ 1782
Цена свободная

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

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

www.ras.ru/publishing/nature.aspx; www.naukaran.com/zhurnali/katalog/priroda/
При использовании материалов ссылка на журнал «ПРИРОДА» обязательна.