

# ЗЕМЛЯ И

№ 2 (338)

МАРТ-АПРЕЛЬ, 2021

ISSN 0044-3948

космонавтика  
астрономия  
геофизика

# ВСЕЛЕННАЯ

*Поздравляем с 60-летием  
первого полета человека в космос!*

**ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ:  
В КОСМИЧЕСКОЕ БУДУЩЕЕ С GAIA**

**УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ  
ЛАБОРАТОРНОЙ АСТРОХИМИИ**

**ОНИ БЫЛИ ПЕРВЫМИ!  
СУДЬБА ГАГАРИНСКОГО ОТРЯДА  
КОСМОНАВТОВ**



# НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ ЖУРНАЛЫ ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЫ ВСЕМ



## Уважаемые коллеги!

Открыта подписка для физических лиц  
на номера 2021г. научно-популярных журналов  
«Земля и Вселенная», «Природа»,  
«Энергия: экономика, техника, экология»

### **Журнал «Земля и Вселенная»**

Стоимость годового комплекта (6 номеров) 1560 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 42-31)

E-mail: zevs@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

### **Журнал «Природа»**

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3600 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 41-71)

E-mail: priroda@naukaran.com

Шубинский пер., д. 6, стр. 1

### **Журнал «Энергия: экономика, техника, экология»**

Стоимость годового комплекта (12 номеров) 3600 руб.

#### **Редакция журнала**

Тел.: +7 (495) 362-07-82

E-mail: energy@iht.mpei.ac.ru

ул. Красноказарменная, 17а

Журналы также можно приобрести в розницу в сети  
магазинов «Академкнига» по следующим ценам:

**«Земля и Вселенная» – 280 руб.**

**«Природа» – 320 руб.**

**«Энергия: экономика, техника, экология» – 320 руб.**

реклама

Подписаться можно в редакциях указанных журналов.  
Убедительная просьба связаться с редакциями перед визитом.

В случае возникновения вопросов можно также обращаться  
в Управление по выпуску журналов ФГУП «Издательство «Наука»:  
Тел.: +7 (495) 276-77-35 (доб. 43-01)  
E-mail: journals@naukaran.com

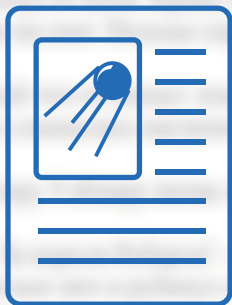


## Издательство “Наука” оказывает услуги:

- СОЗДАНИЕ ОРИГИНАЛ-МАКЕТА
  - редактирование
  - вёрстка
  - изготовление рисунков
- ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ
- ВЕСЬ КОМПЛЕКС ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ УСЛУГ
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ В РОЗНИЧНОЙ СЕТИ “АКАДЕМКНИГА”

Высокопрофессиональные специалисты “Науки”  
готовы к сотрудничеству

[naukapublishers.ru](http://naukapublishers.ru)



НАУКА

[www.libnauka.ru](http://www.libnauka.ru)

*Добро пожаловать  
в электронную библиотечную систему  
Издательства «Наука»!*

Электронная библиотечная система Издательства «Наука» – это простой и удобный доступ к огромной коллекции статей и книг, входящих в портфолио «Науки»

**Электронная библиотечная система это:**

- научная, научно-популярная и классическая литература, от статей до монографий
- оперативное обновление новинок благодаря тесной интеграции с редакционно-издательской системой «Науки»
- разветвленный тематический каталог
- простая и эффективная система поиска
- интуитивная и простая система оформления заказа и подписок
- прозрачная система статистики
- надежность доступа и стабильность работы

Реклама

*Присоединяйтесь к миру «Науки»!*

Научно-популярный журнал  
Российской академии наук  
Издается под руководством  
Президиума РАН  
Выходит с января 1965 года  
6 раз в год  
«Наука»  
Москва

#### На стр. 1 обложки:

«Он всех нас позвал в космос».  
(Нейл Армстронг)

60 лет назад состоялось  
выдающееся событие  
в истории человечества – полет  
Юрия Гагарина на космическом  
корабле «Восток». Эта дата стала  
праздником в нашей стране  
с 1962 г. – Днем космонавтики,  
в мире с 2011 г. – Международным  
днем первого полета человека  
в космос. Фото ТАСС,  
сайт bykovskiy.fprp.ru

#### В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора	3
СИЗОВА М.Д., ВЕРЕЩАГИН С.В., ТУТУКОВ А.В. Звездные скопления: в космическое будущее с Gaia	5
ВИБЕ Д.З., СТОЛЯРОВ А.В. Успехи и перспективы лабораторной астрохимии	19
СЫСОЕВ А.А., ИУДИН Д.И. Феноменология атмосферного электричества (окончание). Глоссарий	30

#### Космонавтика XXI века

РЫЖКОВ Е.А. Японские страхи и ужасы: Martian Moons eXploration	59
---	----

#### Обсерватории, институты

КОЗЛОВА О.В. Крымская астрофизическая обсерватория: на перекрестке эпох и времен	66
---	----

#### Люди науки

ГУБАРЕВ В.С. Три Звезды Героя: знания и страсти. Несколько страниц из жизни великого ученого нашей Родины М.В. Келдыша (окончание)	79
--	----

#### История космонавтики

ПОНОМАРЁВА В.Л. Судьба Гагаринского отряда: к 60-летию первого отряда космонавтов	93
Table of Content and Selected Abstracts	110

Earth&Universe: Astronomy, Geophysics, Cosmonautics  
Bimonthly popular scientific magazine of the Russian Academy of Sciences & NAUKA Publishing.  
Founded 1965.

Published by NAUKA Publishing, Profsoyuznaya Str., 90, 117997, Moscow, Russia.

### **Редакционная коллегия:**

главный редактор  
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,  
летчик-космонавт  
П.В. ВИНОГРАДОВ,  
зам. главного редактора  
кандидат филолог. наук  
О.В. ЗАКУТНЯЯ,  
доктор исторических наук  
К.В. ИВАНОВ,  
летчик-космонавт  
А.Ю. КАЛЕРИ,  
кандидат физ.-мат. наук  
О.Ю. ЛАВРОВА,  
доктор физ.-мат. наук  
А.А. ЛУТОВИНОВ,  
зам. главного редактора  
доктор физ.-мат. наук  
О.Ю. МАЛКОВ,  
доктор физ.-мат. наук  
И.Г. МИТРОФАНОВ,  
академик И.И. МОХОВ,  
член-корр. РАН  
И.Д. НОВИКОВ,  
доктор физ.-мат. наук  
С.П. ПЕРОВ,  
доктор физ.-мат. наук  
К.А. ПОСТНОВ,  
доктор физ.-мат. наук  
М.В. РОДКИН,  
научный директор  
Московского планетария  
Ф.Б. РУБЛЁВА,  
член-корр. РАН  
А.Л. СОБИСЕВИЧ,  
член-корр. РАН  
О.Н. СОЛОМИНА,  
член-корр. РАН  
В.А. СОЛОВЬЁВ,  
академик  
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,  
доктор физ.-мат. наук  
В.В. ШЕВЧЕНКО,  
член-корр. РАН  
Б.М. ШУСТОВ

### **Editorial Board:**

Editor-in-chief  
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI  
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK  
Dr. Konstantin V. IVANOV  
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI  
Dr. Olga Yu. LAVROVA  
Dr. Alexander A. LUTOVINOV  
Deputy Editor-in-chief  
Dr. Oleg Yu. MALKOV  
Dr. Igor G. MITROFANOV  
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV  
RAS Corr.Member Dr. Igor D. NOVIKOV  
Dr. Stanislav P. PEROV  
Dr. Konstantin A. POSTNOV  
Dr. Mikhail V. RODKIN  
Faina B. RUBLEVA  
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO  
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV  
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH  
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA  
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV  
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV  
Deputy Editor-in-chief  
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

## Колонка главного редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья!

Странно устроена человеческая память. День этот – великий день нашей истории 12 апреля 1961 года – был, страшно подумать, 60 долгих лет назад, – а память 12-летнего подростка сохранила все, даже мельчайшие, детали того, что происходило в этот день в Москве.

События той недели не стали полным сюрпризом и, конечно, даже не зная о всех перипетиях космической гонки с США, мы все были уверены, что в космосе Первым будет непременно советский человек. В конце занятий в моей 167 школе, днем 12 апреля объявили о полете, – но телевизоров в то время не было даже в московских центральных школах, и впервые фото Ю.А. Гагарина я увидел на крошечном экране (7 дюймов в нынешних цифрах) телевизора КВН-49, гордости нашего семейства, слегка увеличенном линзой с мутноватой водой. Помню, что я удивился его фамилии (потом выяснилось, что не только я), принадлежащей знаменитому княжескому роду. Только потом советские дикторы с оправданной иронией опровергли эту «утку» империалистических СМИ – наш родной, советский, смоленский. Вместе с одноклассниками мы помчались на Красную площадь, правда, бежать было недалеко – жил я в Дегтярном переулке рядом с Пушкинской площадью. Митинг там был сумбурный, явно проходивший без согласования с Моссоветом, но запомнившийся на всю жизнь именно своей спонтанностью и искренностью.

Многим тогда 12 апреля напомнило другой предыдущий великий день советской истории – 9 мая. Чистая беспримесная радость, гордость за страну

и любовь к ней – каждый рубль, вложенный СССР в освоение космоса, дал патриотическую отдачу в тысячу раз большую, чем миллиарды, без счета тратившиеся отделом пропаганды ЦК КПСС на тоскливые уроки марксизма-ленинизма и проталкивание идей социализма в развивающихся странах.

Много позже мои друзья в Индии и Аргентине рассказывали, каким дефицитом сразу стал в их странах журнал «Советский Союз», где печатались статьи о спутнике, Гагарине, космосе.

«Блажен, кто посетил сей мир в его минуты роковые», и я счастлив, что почувствовал тогда на переполненных московских улицах и Красной площади, это чувство единения с людьми и гордость за свою большую страну.

Второй раз такие ощущения удалось испытать почти через 40 лет в октябре 2003 года на площади Тяньаньмэнь, когда в космосе свои 14 витков совершил первый «тайконавт» КНР Ян Ливэй. Я был в это время в Пекине и на ликующих пекинских улицах увидел ту же искреннюю, не зарегулированную государством радость людей, их веру в возможности и великое будущее своей страны. Я искренне «кричал «ура»



*М.В. Келдыш с космонавтами Ю.А. Гагариным и К.П. Феоктистовым на пресс-конференции. 21.10.1964 г.*

и бросал чепчики» вместе с китайской толпой, еще ощущая себя представителем «старшего брата», не зная, что всего через 18 лет мы с громадным интересом и, чего греха таить, – с белой завистью будем вглядываться в интригующие панорамы, посланные китайскими аппаратами с поверхности Луны.

Господа политики, поверьте, – наибольшие политические дивиденды дадут Вам не футбол/хоккей, «патриотические» фильмы Фонда кино – а успехи Ваших стран в науке и космосе. Не недооценивайте Ваших избирателей. Китайские руководители быстро научились у нас использовать космос как рычаг внутренней и внешней политики, а мы сейчас – с унынием разбираем руины, оставленные в нашей космической программе секвестрами Минфина.

Но вернемся в 1961 год. В начале этой колонки мы поместили не самую известную фотографию первого человека в космосе рядом с великим и засекреченным тогда «теоретиком космонавтики» – Мстиславом Всеволодовичем Келдышем, президентом Академии наук СССР. Юрий Алексеевич не хотел оставаться символом успехов социализма, хотел летать, мечтал о новом полете, но уже в качестве инженера и специалиста. Он успешно закончил Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского, все больше интересовался возможностями космоса для научных исследований, и в этом, судя по многочисленным воспоминаниям современников, его всецело поддерживал М.В. Келдыш. Думаю, не случись страшной и не до конца понятной авиакатастрофы в 1968 году, Юрий Алексеевич пошел бы по пути многих своих космических коллег – стал бы ученым, специалистом в одной из областей науки и техники, которыми он так интересовался.

В апреле 2021 года РАН и Госкорпорация «Роскосмос» в рамках Общего собрания членов Российской академии

наук решили провести совместную научную сессию «Наука для космоса и космос для науки». Среди выступающих много космонавтов, ставших известными учеными, профессорами знаменитых технических вузов и членами РАН.

Академическая (в широком смысле) наука стала основой успехов СССР в создании ракетно-космической техники. Расчеты динамики тел с полостями, частично заполненными жидкостью, расчеты баллистики движения космических аппаратов и многие другие важнейшие вычисления выполнялись в академических институтах, в том числе и в Институте прикладной математики АН СССР, который тогда возглавлял М.В. Келдыш. В свою очередь, выход научных экспериментов за пределы земной атмосферы, которая не пропускает к Земле наиболее интересные энергичные заряженные частицы и разнообразные электромагнитные излучения, приходящие из космоса, открыл ученым, по словам Данте, «и новое небо и новую Землю». Я бы добавил – и «нового человека». Длительные полеты по околоземным орбитам выявили, неожиданные вначале, громадные возможности адаптации тренированного (!) и подготовленного человека к самым негативным факторам космического полета.

Материалы научной сессии РАН, доклады о космических проблемах, которые будут сделаны в эти дни на заседаниях РАН, будут изданы в 2021 году. Мы, безусловно, постараемся рассказать о самых интересных из них.

Поздравляю всех нас с замечательным праздником – Днем космонавтики! Очень надеюсь, что будущее даст нам поводы с гордостью отмечать не только прошлые грандиозные свершения, но и новые великие достижения нашей страны в космосе.

*Главный редактор журнала  
«Земля и Вселенная»  
академик Лев Матвеевич Зелёный*



# ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ: В КОСМИЧЕСКОЕ БУДУЩЕЕ С GAIA



**СИЗОВА Мария Дмитриевна,**  
младший научный сотрудник, аспирант

**ВЕРЕЩАГИН Сергей Викторович,**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

**ТУТУКОВ Александр Васильевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
Институт астрономии РАН



DOI: 10.7868/50044394821020018

**Название нашей статьи навеяно инструментальными и теоретическими успехами в изучении звездных скоплений, возникающими прямо сейчас, на наших глазах. Результаты последних лет резко ускорили понимание эволюции звездных скоплений. Множество ученых, как никогда ранее, принялись изучать звездные скопления и результат их эволюции – звездные потоки. Стимул этому дали результаты космического проекта Gaia, показав беспрецедентную точность измерений звездных параметров. Буквально «прямо сейчас» в научном обиходе появилась третья редакция данных Gaia. Это гарантия того, что в ближайшем будущем копилка знаний о звездных скоплениях пополнится.**

---

## ЛЕТЯЩИЕ ГРУППЫ ЗВЕЗД

---

Объекты Вселенной, хорошо заметные на ночном небе, всегда вызывали и вызывают сейчас повышенное внимание. Обзаводясь громкими назва-

ниями, они служат вдохновением для творчества, маяками, помогающими путешественникам, и основой календаря. Среди них всегда выделялись «Семь сестер» – Плеяды (рис. 1). Оказалось, это реальный дом не для семи, а для многих десятков звезд. Это стало



Рис. 1. Рассеянное звездное скопление Плеяды – М45. Любительский снимок получен с помощью фотоаппарата Canon 30D, HEQ5Pro, с объективом Юпитер 37A 135/3,5. Выставлена диафрагма 4, чувствительность ISO 1600. Экспозиция 8x5 мин, калибровка и медианное сложение выполнены в программе Iris. Снимок производит приятное впечатление при малом фокусе! Хотя есть небольшой сдвиг от неточно выставленной Полярной Звезды. Как видим, любительские средства позволяют получить вполне приемлемый результат! Автор: М.А. Наливкин. Полную версию можно посмотреть по адресу URL = [http://www.astroclub.kiev.ua/gallery/details.php?image\\_id=1455](http://www.astroclub.kiev.ua/gallery/details.php?image_id=1455)

понятным далеко не сразу. В марте 1610 г. Галилео Галилей опубликовал свои результаты наблюдений Плеяд, отобразив 36 звезд этого скопления. Лишь в XVIII в. стало ясно, что звезды Плеяд сгруппировались не случайно, а представляют собой скопление совместно живущих звезд.

И, как часто бывает в науке, не так давно стало понятно и то, что совсем небольшие светлые пятна на небе, которые еще Демокрит и Анаксагор определили плотными группами звезд, и огромные Плеяды – относятся к одному и тому же населению нашей Галактики: звездным скоплениям.

Изобретение Галилеем телескопа и введение его в астрономическую практику позволило Мессье (1781) и Гершелю (1786) приступить к созданию первых каталогов звездных скоплений. Отметим, что первое издание каталога включало объекты, номера которых принято записывать от М1 до М45. Именно под номером М45 в каталог включены Плеяды. Растущая точность наблюдательной техники сделала доступной астрометрическую оценку расстояний до близких скоплений Гершелем и со временем позволила обновить каталог звездных скоплений Дрейером.

В наше время число известных и хорошо атрибутированных скоплений достигает нескольких тысяч. И, конечно, в этой работе ведущую роль играют данные о более чем 1.3 млрд звезд, полученные с помощью КА Gaia (рис. 2).

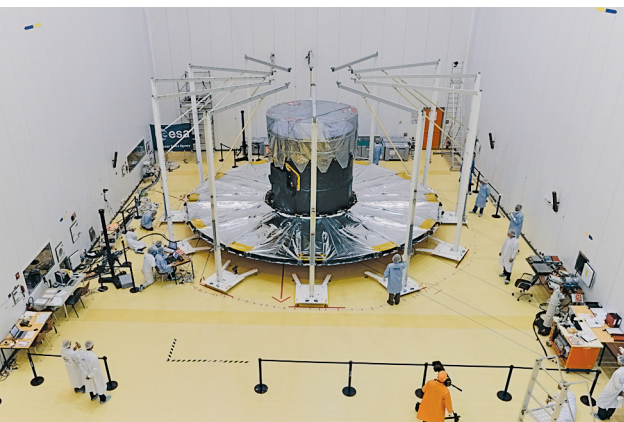


Рис. 2. «Гайя» на завершающем этапе сборки. Gaia Deployable Sunshield Assembly (DSA) во время тестирования развертывания в интеграционном здании S1B на европейском космодроме Куру, Французская Гвиана, 10 октября 2013 года. [http://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/10/Deployment\\_of\\_Gaia\\_s\\_DSA19](http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/10/Deployment_of_Gaia_s_DSA19) Права принадлежат ESA–M. Pedoussaut, 2013

Трудность на этом пути составляет лишь невозможность обзреть и выбрать «звездные кучи» на картах звездного неба, построенных по каталогам звезд Gaia. Очевидно, что пришла пора задействовать роботы вместо человеческого глаза. Естественно, что такая работа вызывает повышенный интерес у многих ученых и активно ведется.

Уже в конце XIX века Проктор (1869) показал, что распад звездных скоплений приводит к появлению звездных потоков в Галактике. Обнаружены такие потоки были уже в наше время. Исследованию их свойств в настоящее время, как мы увидим ниже, уделяется большое внимание.

---

## ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ – «ЗВЕЗДНАЯ КОЛЫБЕЛЬ» И «НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ»

---

Изучение звездных скоплений принадлежит к числу основных направлений звездной астрономии. За последние столетия этой проблеме было посвящено более 10 тыс. статей. Около пятисот статей ежегодно представляют результаты исследований, выполненных в этом направлении. Информацию о количестве публикаций в мире, их авторах, названиях и многом другом можно получить с помощью специализированного сайта ADS (Astrophysics Data System, URL: [http://adsabs.harvard.edu/ads\\_abstracts.html](http://adsabs.harvard.edu/ads_abstracts.html)). Простой интерфейс и открытый доступ позволяет использовать этот сайт любому желающему.

Звездные скопления – гравитационно-связанные группы звезд, которые хорошо заметны на небе. Наука различает два типа таких групп: шаровые и рассеянные звездные скопления. Шаровые скопления относятся к старому населению Галактики (возраст некоторых из них сопоставим с возрастом Млечного пути) и располагаются на орбитах

вокруг балджа – центральной, наиболее яркой сферической части Галактики. Рассеянные же скопления – молодое население тонкого диска Галактики, и далее речь пойдет именно о них. Замечательный, многим хорошо известный и уже упоминавшийся выше пример – это скопление Плеяды. Его нетрудно найти на небе даже невооруженным глазом. Обычное рассеянное звездное скопление включает от сотни до одной – двух тысяч звезд. Типичный возраст скопления составляет несколько сотен миллионов лет, т. е. порядка одного оборота Солнца вокруг центра Галактики.

Несколько причин вызывают постоянный и активный интерес астрономов к исследованию статистики, физики и эволюции звездных скоплений. Исследования скоплений разных возрастов показали, что они являются своего рода «космической лабораторией», в которой можно изучать разнообразные типы звезд, планет и другие астрономические объекты, объединенные общим местом происхождения – «звездной колыбелью». Оказалось, что они являются эффективным и во многом незаменимым инструментом для исследования эволюции звезд и галактик. Изучение движений звезд внутри скоплений и движения самих скоплений в пространстве стало основой для изучения строения нашей Галактики. Изучение процессов взаимодействия в звездных системах служит, как показала история, эффективным инструментом изучения структуры и эволюции, как звезд, так и скоплений.

Звезды не статичны, они рождаются, живут, изменяясь со временем и превращаясь в конечном итоге в белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Иногда в финале звезды взрываются как сверхновые, яркость которых на неделю становится сравнимой с яркостью галактики. Теория

звездной эволюции, можно сказать, выросла в исследованиях скоплений. Говоря языком астрономов, сопоставление диаграмм Герцшпрунга–Рессела для скоплений разных возрастов явилось в свое время отправной точкой теории эволюции звезд.

Звезды в скоплениях образовались одновременно. Благодаря этому на небольшом участке неба в распоряжении астрофизиков оказываются «лаборатории», где на небольшой площади, доступной для одного кадра широкоугольного телескопа, расположены разнообразные звезды одного возраста. Среди этого населения очень удобно поискать что-нибудь новенькое, делающее какую-либо из звезд «особенной». Популярностью пользуются кратные системы, экзотические и переменные звезды. В скоплениях все чаще стали находить звезды с планетами. Хорошо, когда это – далекая планета (по современной терминологии экзопланета), похожая на нашу Землю! Здесь лежит ключ к разгадке многих явлений.

Различия пространственной формы скоплений довольно многообразны, однако их изучение ограничивается техническими возможностями наблюдателей – далеко не для всех звезд, входящих в скопления, надежно измерены расстояния от Солнца, а также существуют трудности с отождествлением слабых звезд, входящих в их состав.

Наблюдения показали, что в современную эпоху в нашей Галактике всего несколько процентов звезд входят в состав скоплений. Один из авторов данной публикации, А.В. Тутуков, выдвинул ставшую классической идею о распаде большинства скоплений практически в момент их образования. Это время составляет около 100 млн лет, что по масштабам эволюции совсем немного. Статья А.В. Тутукова опубликована в 1978 г., точная ссылка на нее приводится ниже, в списке Дополнительной

литературы. Иными словами, практически все звезды возникают в скоплениях, и более 90% из них быстро распадаются из-за потери газа. Поэтому мало кому могла прийти в голову мысль о том, что скопления на самом деле являются колыбелью всего звездного населения Галактики. Сегодня существует общепринятое мнение, что они представляют собой «родильные дома» для всех звезд. В том числе и для нашего Солнца (см. последний раздел данной публикации). Однако звезды в этих домах, как правило, не могут жить долго. Большинство ассоциаций (ассоциации, как увидим ниже, – это те места, где рождаются сами скопления) и скоплений вскоре после рождения, как уже говорилось, распадаются. Распад представляет собой необычную, фантастическую картину превращения их со временем не в хаос, а в конечном итоге – в упорядоченные кольцевые звездные структуры вокруг галактического центра, напоминающие нити!

---

## С ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ В КОСМОС – GAIA

---

Итак, шло время и несколько важных событий произошли в XX веке. К началу века число известных звездных скоплений увеличилось до нескольких сотен благодаря работе над созданием Нового общего каталога (New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars или NGC), опубликованного в 1888 г. Дж. Дрейером. В 1925 г. возникла первая классификация скоплений, предложенная Р. Трюмплером, которая используется до сих пор. Эволюцию интереса к их исследованию мы видим на рис. 3, где показан рост числа публикаций по скоплениям с годами. Резкий скачок числа публикаций начался в конце 1940-х годов, а затем снова – с 2000-х.

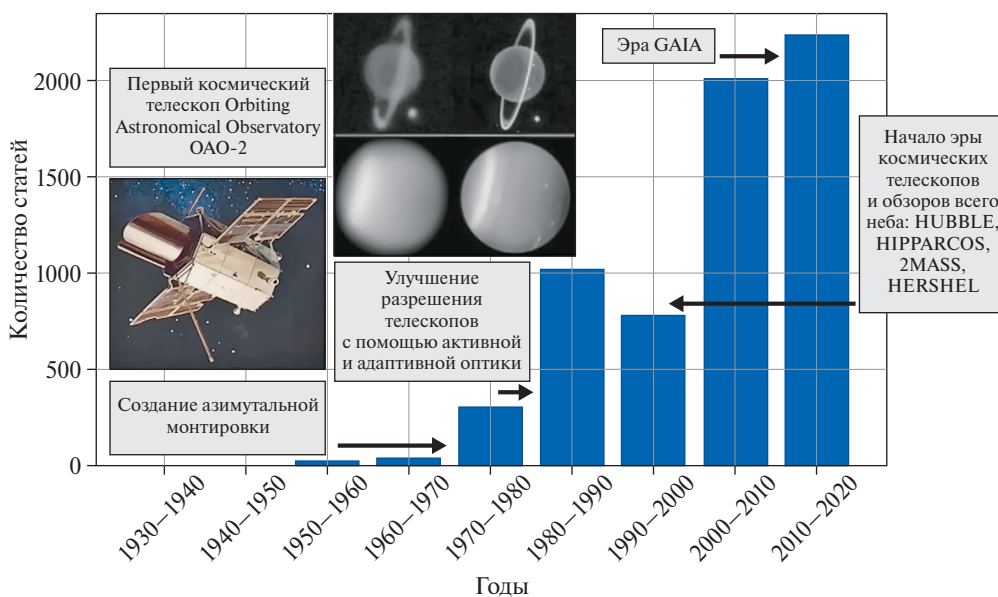


Рис. 3. Результат поиска научных статей с помощью упомянутой выше базы данных ADS, по ключевым словам *open&cluster*. Запрос выдал в сумме около 6000 публикаций с 1930 г. Подписаны основные этапы исследований звездных скоплений. Показано появление первого космического телескопа (OAO-1, Орбитальная астрономическая обсерватория). Проработал очень недолго, поэтому реально первый космический телескоп НАСА запустило в 1968 г., это был OAO-2, показанный на нашем рисунке. Им стала обсерватория, изучалось ультрафиолетовое излучение звезд и галактик. Приблизительно в то же время введены в строй крупнейшие телескопы. Так, знаменитый 6-метровый телескоп с зеркалом-монокристаллом потребовал постройку азимутальной монтировки. Многие крупнейшие телескопы используют составные зеркала с адаптивной оптикой, URL: <https://skyandtelescope.org/sky-and-telescope-magazine/adaptive-optics-before-and-after/>

Это и понятно – ведь рост объема данных в астрономии тесно связан с введением в строй новых крупных телескопов. Статистика строительства телескопов такова: рефракторы с диаметром объектива больше 70 см (это 11 телескопов) были построены в период 1880–1917 гг. и дали пищу исследователям 20-х годов XX в. (рис. 3), а телескопы-рефлекторы с диаметром зеркала 6 м и более (14 телескопов) – в период 1975–2005 гг. Известный Паломарский 5.1-м телескоп им. Хейла был введен в строй в 1948 г. Именно после этого момента начался заметный рост объема информации о звездных скоплениях (рис. 3), и с 2000-х годов возник новый максимум, связанный с появлением

данных КА HIPPARCOS (1997), который продолжается благодаря данным КА Gaia.

С запуском космического аппарата Gaia перед астрономами открылась фантастически привлекательная перспектива детального изучения строения Галактики по беспрецедентно высокоточным измерениям параметров звезд, полученным с помощью этого космического телескопа. Интересно, что Gaia – не спутник Земли – находится в точке L2 системы Солнце–Земля на расстоянии от Земли 1.5 миллиона километров, что приблизительно в четыре раза больше, чем отдаление Луны от Земли. То есть Gaia является спутником Солнца!

С появлением таких высокоточных измерений наступает время изучать внутреннюю кинематику и структуру скоплений. Уже активно изучаются процессы внутренней эволюции скоплений по мере их жизни в Галактике. К описанию этих интересных процессов мы перейдем ниже.

---

## РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ ИЗ ГАЗА

---

Основной материал, из которого рождаются ассоциации, скопления и, собственно, сами звезды в них – это газовые облака. Наша Галактика, являясь прекрасной на вид плоской дисковой системой, на самом деле имеет гораздо более сложную структуру. Галактика окружена звездным гало, которое по современным представлениям играет непосредственную роль в формировании спирального узора.

Сценарий эволюции, о котором пойдет речь, представлен на рис. 4.

Как видим на рис. 4, скопления возникают из гигантских газовых облаков будучи внутри ОВ-ассоциаций. Что такое звездная ассоциация? В истории астрономии этот термин занимает важное место.

Итак, сделаем небольшое отступление и расскажем о звездных ассоциациях Амбарцумяна. Что же такое звездная ОВ-ассоциация? Это группа звезд с ядром из одного или нескольких скоплений одного возраста. Звездные ассоциации открыл голландский астроном А. Блаау (A. Blaauw). Он же проанализировал собственные движения звезд в ОВ-ассоциациях и пришел к выводу об их неустойчивости, которая в конечном итоге ведет к распаду. В.А. Амбарцумян по аналогии с расширяющейся Вселенной придал им природу расширяющихся D-тел. Правда, это предположение, как показало

время, оказалось неверным. Амбарцумяна занимал вопрос о том, почему мы наблюдаем только разлет групп молодых звезд, а не коллапс – он именно увидел распад, а не предсказал его. Итак, В.А. Амбарцумян прямо указывал на места образования молодых звезд и отметил парадокс: если звезды образуются путем коллапса газа, то почему ассоциации распадаются? Виктор Амазаспович пишет (в Сборнике Трудов Амбарцумяна, 1988 г., см. разд. «Литература»): «... звездные ассоциации представляют собой очаги звездообразования в Галактике, где процесс группового образования звезд в настоящее время продолжается...» В работе 1954 года (полная ссылка в конце статьи) он показал, что в звездных ассоциациях имеют место движения нового типа – расхождение звезд из области звездообразования, которые сильно отличаются от движений, ранее известных в звездной динамике, как по характеру, так и по причинам, их вызывающим. «Распознавание звездообразования в звездных ассоциациях, содержащих группы недавно возникших звезд, имело принципиальное значение для нашего понимания происхождения и эволюции звезд. Среди первых аргументов в пользу недавнего возникновения наблюдаемых в Галактике ОВ-ассоциаций особое место занимало представление об их неустойчивости. Именно анализ ситуации в этих системах дал серьезное основание предсказать явление расширения звездных ассоциаций» (цитата взята из публикации в «Астрономическом журнале», см. разд. «Литература»).

Возникает вопрос о том, что служит причиной их сжатия и фрагментации. Одна из гипотез – спирали. Они хорошо видны в галактике М33, показанной на рис. 5. Существуют несколько гипотез о причинах появления

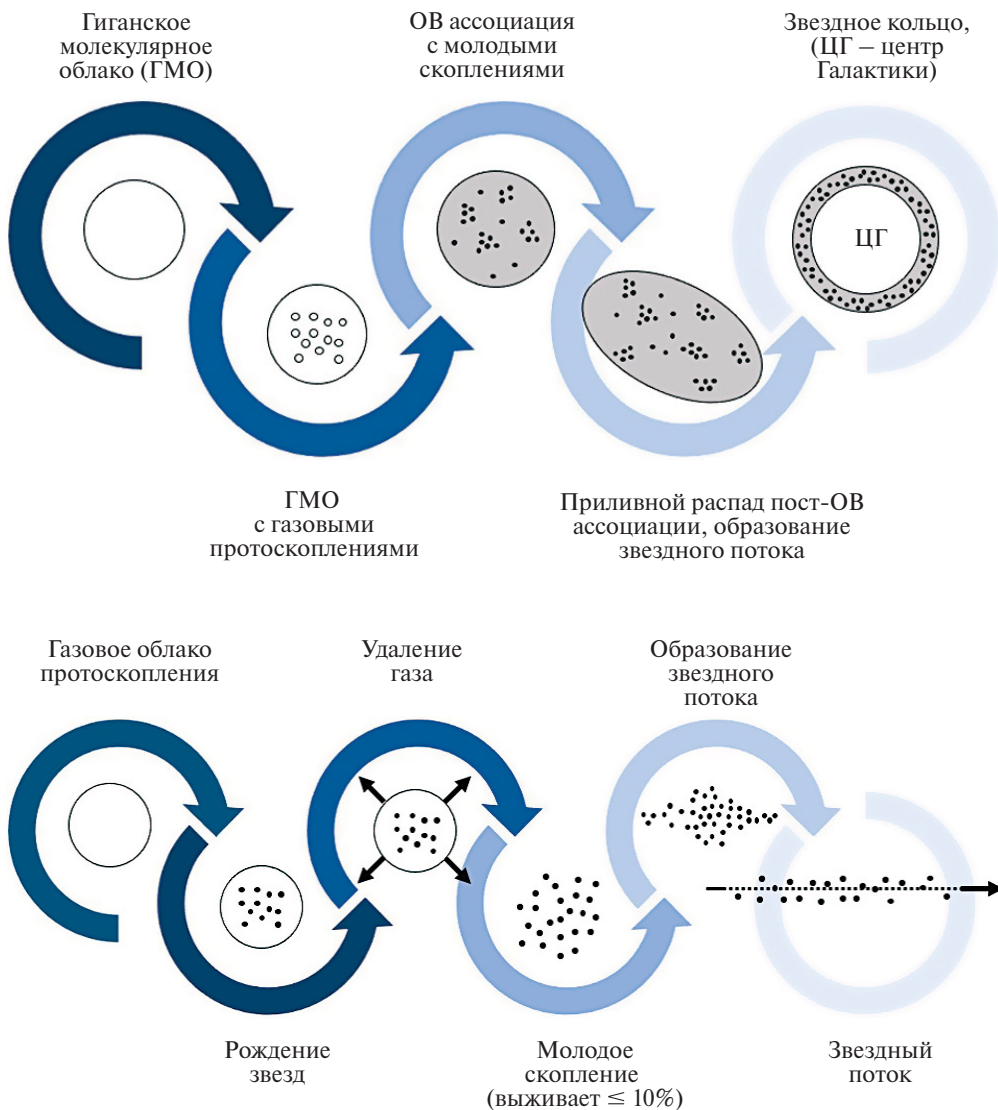


Рис. 4. Сценарий эволюции звездной ассоциации (верхняя панель) и рассеянного звездного скопления (на нижней панели). Показаны цепочки превращений гигантских газовых облаков в ОВ-ассоциации, затем звездные кольца вокруг галактического Центра. И превращений газового облака в скопление, которое превращается в поток. На верхней панели в круге слева – звезды ОВ-ассоциации. Далее расширяющаяся ОВ-ассоциация, в кольце – звезды предельно старой ОВ-ассоциации. На нижней панели аналогичное развитие претерпевает скопление, расположенное внутри ассоциации. Замкнуться в кольцо звездный поток не успевает за время жизни Галактики



Рис. 5. Галактика М33. Спиральная галактика в созвездии Треугольника. По диаметру в 2 раза меньше Млечного Пути. Итак, технические данные: SW ньютон 254/4+паракорр тип I+QHY8L+внеосевик с QHY6, все это на EQbrго. Фокусное расстояние с учетом паракорра 1135 мм. Поле 71'x47', масштаб 1.4 на пиксель. 25 кадров по 1200 секунд. Две июльские ночи на даче под Луганском. Обработка в MaximDL, PI, Fitstacker, PS, Photomatix.  
Автор фото: М.А. Наливкин

в галактическом диске ее главного украшения – спиральной структуры. Одна из самых популярных гипотез предполагает, что гало нашей галактики имеет несимметричную форму (см. статью Хаттори и Валлури, опубликованную в «Трудах Международного астрономического союза», см. разд. «Литература»), возмущения от которой служат триггером возникновения спиралей. Итак, несимметричность гало порождает неустойчивость газового диска и спиральные волны (т. е. увеличение плотности вследствие малых возмущений диска). Изображения галактик позволяют убедиться в том, что газ хорошо заметен лишь в спиралах – ярких местах звездообразования (рис. 5).

Именно здесь происходит и первоначальная фрагментация газовой составляющей на облака – протоассоциации. В спиралах газ сжимается и раз-

бивается на облака радиусом приблизительно 100–300 пк, из которых и рождаются ассоциации, в начале своего существования имеющие массы в пределах  $10^5$ – $10^6$  масс Солнца.

Картина физических процессов на начальном этапе образования ассоциации из газового облака неоднозначна. Возможен такой сценарий, когда газовое облако остывает вследствие излучения энергии тяжелыми элементами и пылью при их достаточно высокой концентрации. Из-за этого нарушается баланс между силой гравитации, стремящейся сжать облако, и силой газового давления, препятствующей сжатию, в пользу первой. Этот возникающий дисбаланс может спровоцировать коллапс. В процессе коллапса плотность увеличивается и происходит фрагментация газа. Во фрагменте образуется ОВ-ассоциация. Таким образом, основные механизмы обра-



зования ОВ-ассоциаций – спиральная волна и коллапс в результате охлаждения газа.

Ассоциации и рассеянные звездные скопления располагаются иерархически: ассоциации включают скопления (схема на рис. 4). Следовательно, их эволюция представляет единый процесс, и молодые ассоциации наполняются протоскоплениями (в среднем в ассоциации рождается несколько десятков скоплений массами  $10^2$ – $10^4$  масс Солнца). Таким образом, молодая ассоциация состоит из скоплений и из отдельных звезд.

Однако в молодом скоплении продолжается образование новых звезд (зоны ионизированного водорода HII), этот мощный процесс создает звездный ветер, который буквально выметает оставшийся газ из молодых маломассивных скоплений, поскольку скорость расширения зоны ионизированного водорода (10 км/с) выше дисперсии скоростей звезд внутри самого скопления (около 1 км/с). В итоге большинство молодых скоплений распадаются. Отметим, что массой, достаточной для удержания газа, обладают шаровые скопления и именно поэтому они являются долгожителями в Галактике. Этот этап отражен на рис. 4.

---

## ЗВЕЗДНЫЕ «РОИ» И «КОПЬЯ»

---

Наряду с этим процессом сама ассоциация также претерпевает изменения вследствие воздействия на нее приливных сил галактики (см. ниже по схеме на рис. 4). А звездный ветер разрушает порядка 90% ее скоплений, заполняя ассоциацию отдельными звездами. Таким образом, ранее заполненная массивными группами звезд – скоплениями, ассоциация точно заполняется отдельными звездами, сохраняя малую часть скоплений, что приводит к ослаб-

лению гравитационной связанности ОВ-ассоциации.

Интересно отметить, что между отдельными скоплениями в молодой ОВ-ассоциации нет сильной гравитационной связи. Скопление, напротив – гравитационно-связанная система звезд.

Итак, звездный ветер удаляет газ из молодой ассоциации с характерной скоростью 10 км/сек. В результате удаления газа эволюция ассоциации разветвляется на два направления. В одном выживают одно или несколько скоплений. Именно их мы и наблюдаем в современную эпоху. Другой путь (верхняя панель рис. 4) – распад всех скоплений. Это происходит со временем за счет близких прохождений звезд, а также при взаимодействии так называемых кратных звездных систем.

В итоге ассоциации растягиваются приливными силами Галактики вдоль их орбиты вокруг центра Галактики (рис. 4). Структуры, которые включают выжившие скопления, состоят как из самих скоплений со шлейфами потерянных звезд, так и звезд распавшихся скоплений-родственников.

Постепенно звездные системы, напоминающие «рои» звезд, идущие по обоим путям сценария на рис. 6, растягиваются в системы, похожие на «копья» – это хорошо известные звездные потоки (рис. 4). Вытянутые структуры на верхней панели (рис. 4) могут быть обнаружены на небе за счет выживших скоплений (они узнаваемы по увеличенной поверхностной звездной плотности). Поскольку внутри ассоциации остаются не успевшие распаться скопления и звезды распавшихся скоплений, на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, построенной для такого скопления, будут как его собственные звезды, так и звезды распавшихся скоплений одного поколения на начальной стадии и разных поколений

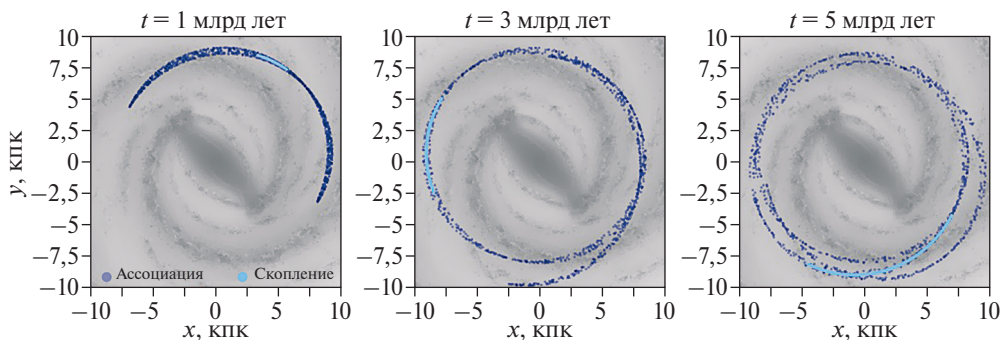


Рис. 6. Эволюция облака точек, представляющих звезды скопления (голубые точки) и OB-ассоциации (красные точки). Согласно с этапами эволюции, звезды на рис. 4 скопления растягиваются в звездный поток. Звездные ассоциации, двигаясь намного быстрее, успевают сделать полный оборот вокруг галактического Центра, а звездный поток превращается в кольцо. Рисунок показан в проекции на галактическую плоскость XY, время эволюции подписано над панелями.

на последующих этапах. Эти звезды попадают в состав наблюдаемого скопления благодаря стандартной процедуре отбора. Все они родились в одной ассоциации и обладают сходной кинематикой (близость собственных движений, расстояний и лучевых скоростей), химическим составом и даже возрастом.

Поговорим о пространственной форме скоплений, имея в виду беспрецедентно точные данные Gaia. Благодаря им получены реально наблюдаемые шлейфы звезд, потерянных скоплением Гиады. Эти работы были сделаны независимо и практически одновременно летом 2019 г. двумя группами ученых из Австрии (Мейнгауст и Алвен) и Германии (Зигфрид Розер, Елена Шильбах и др.). Детальные расчеты показали, что скопление растягивается приливными силами, превращаясь сначала в эллипсоид с большой осью, направленной под углом 30–40 градусов по направлению к галактическому центру. При этом скопление теряет звезды в основном из точек Лагранжа, расположенных на концах большой оси эллипсоида. Эти звезды отстают от скопления в дальней от центра Галактики точке истечения и обгоняют его

с ближней к центру стороны скопления. Таким образом, скопление растягивается вдоль его галактической орбиты благодаря дисперсии скоростей его звезд и законам Кеплера. Подчеркнем, что из-за разницы скоростей звезд, находящихся ближе и дальше от Центра Галактики, образуются так называемые звездные шлейфы.

Остатки скоплений дрейфуют по галактической орбите как нечто целое (рис. 6). Наблюдается множество движущихся групп. Движущиеся группы могут быть старыми, такими как движущаяся группа звезд HR1614 возрастом в 2 млрд лет (рис. 6), или молодыми, такими как движущаяся группа звезд АВ Золотой Рыбы возрастом в 50 млн лет. Хороший пример АВ Dor (статья в знаменитом Ар J Zuckerman and Song 2004). В ее составе остались кратные звезды. Если посмотреть подробнее, то она похожа на ассоциацию в финале. Движущиеся группы интенсивно изучались Олином Эггеном в 1960-х годах, (см. разд. «Литература»: Эгген, 1965, Дьяченко А.И. Летящие группы Эггена, ЗиВ, 2004, 6, с. 12–25). Олин Эгген первым ввел понятие движущихся звездных групп, самой из-

вестной из которых являются Гиады (а также и Большая Медведица!). Самой близкой является движущаяся группа звезд или звездный поток Большой Медведицы, который включает часть звезд в Ковше Большой Медведицы и простирается до Южного Треугольника.

Как видим на рис. 4, в конечной стадии эволюции оба пути дают «звездные нити» или копыя. Длина копий зависит от времени эволюции. Движущаяся звездная группа растягивается дифференциальным вращением Галактики по замкнутой орбите вокруг галактического Центра, образуя копыя или кольца. Так, для ОВ-ассоциаций процесс идет с большей скоростью и копыя замыкаются в кольца вокруг Центра Галактики. Галактика, можно сказать, похожа на клубок нитей, поскольку пронизана звездными потоками. В частности, именно из звездных колец, скорее всего, состоит население диска. Кольца пока никто не наблюдал ввиду их малой пространственной плотности, однако, гипотетически нужно ожидать именно такую ситуацию после полного распада ассоциации и скопления (рис. 7).

На рис. 4 в конечных стадиях эволюции образуются множество копий и замкнутых круговых потоков. На схеме видно, как со временем звездный поток дифференциальным вращением растягивается и образует кольцевую структуру вдоль галактической орбиты. Наступает стадия «колец». Длина нити (круга) равна радиусу Солнечной орбиты (8 кпк), умноженному на  $2\pi$ , что составит около 50 кпк. Это означает, что ассоциация растягивается в нить с плотностью 20 звезд на пк. Как уже говорилось, Галактика состоит из множества звездных нитей, как это показано на рис. 7.

Итак, подведем итоги. В течение жизни звездное скопление и ОВ-ассоциация меняют пространственную

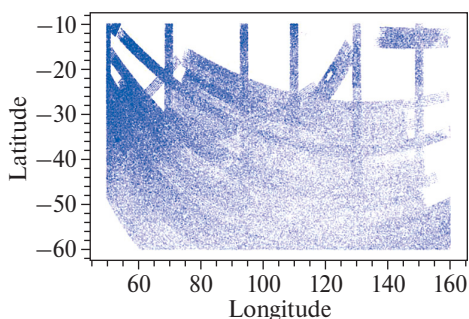


Рис. 7. Звездные структуры, напоминающие нити, аналогичный рисунок есть в публикации Perottoni и др. 2019. Этот рисунок любезно предоставлен H elio Perottoni

форму от унаследованной от фрагментации первичного газового облака к вытянутой системе – копыю и далее кольцу. Большинство скоплений внутри ассоциации распадаются и перестают существовать, наполняя ассоциацию звездами. Приливными силами ассоциация (в конце концов превратившаяся в звездную систему, состоящую из отдельных звезд и выживших скоплений) растянулась дифференциальным вращением вдоль своей орбиты в диске. Превратившись сначала в звездный поток (копые) и далее в кольцо. В финале образуются множество замкнутых круговых потоков-колец. На этой стадии большинство потоков, образовав кольца, дали структуру звездного населения диска, распределенную в «кольцах», кинематически упорядоченную наподобие нитей. Вышло так, что из нитей судеб отдельных скоплений сплетается полотно жизни ассоциаций и Галактики.

## СОЛНЕЧНОЕ ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ

«Если бы вы жили в эпоху молодости Солнечной системы, то могли бы читать при свете ночного неба», – пишет Симон



Рис. 8. Комета Хейла–Боппа. Изображение получено на Астрографе Звенигородской обсерватории Института астрономии РАН

Портегис Цварт (S. Portegies Zwart, Leiden Observatory, Leiden University, The Netherlands). Понятно почему: на начальных этапах жизни Солнце находилось внутри звездного скопления, где было настолько тесно, что свет звезд освещал Землю постоянно. Естественно, близкие прохождения звезд могли воздействовать на содержимое облака Оорта и некоторые твердые тела, астероиды и кометы круто меняли свою орбиту. Часть из них, попадая близко к Солнцу, превращались в кометы (такие, как комета Хейла–Боппа, рис. 8).

Полезно для вышеизложенной картины эволюции звездных скоплений и ОВ-ассоциаций попытаться найти расстояние в Галактике до ближайших «родственников» нашего Солнца, возникших с ним в одном скоплении и в одной ОВ-ассоциации. Дисперсия скоростей примерно тысячи звезд в типичном звездном скоплении с массой порядка одной тысячи масс Солнца около одного км в секунду. А в ассоциации с массой  $10^6$  масс Солнца – около 10 км/сек. При возрасте Солнца приблизительно  $5 \cdot 10^9$  лет его «братья и сестры» по скоплению рассеяны по орбите Солнца вокруг центра Галактики на расстоянии, составляющем примерно

10 кпк, а «братья» и «сестры» по исходной ОВ-ассоциации – на 100 кпк. То есть последние уже замкнули кольцо около Галактического Центра.

Теперь можно оценить характерное расстояние между Солнцем и ближайшей «сестрой» или «братом». К ним относятся коричневые и вырожденные карлики и звезды спектральных классов К, М звезд главной последовательности с массами, меньшими Солнечной. Ближайшие «родственники» по скоплению окажутся друг от друга на расстоянии приблизительно 10 пк, с «родственниками» по ОВ-ассоциации – на расстоянии приблизительно 50 пк (из-за больших скоростей). Много это или мало? Это настолько далеко, что соседи не могут повлиять на объекты во внешних частях Солнечной системы.

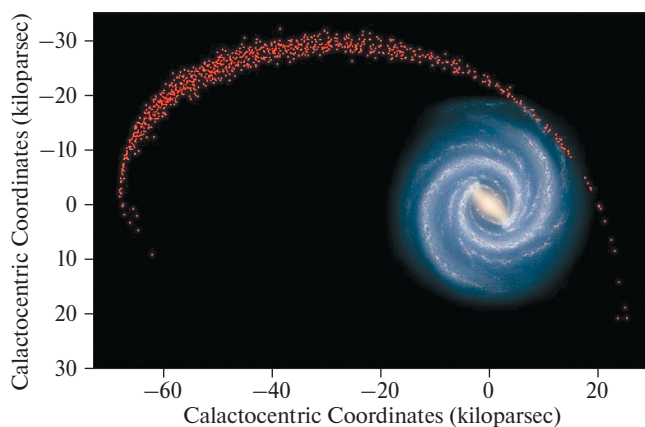
## ЗВЕЗДНЫЕ ПОТОКИ НА «ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОКРАИНАХ»

Выше мы говорили о нитеобразном упорядочении звездных потоков и строении кинематической структуры то всей Галактики, то галактического диска. Что это, путаница или ошибка? Совсем нет. По данным, полученным с помощью КА Gaia, подобные звездные потоки обнаружены в том числе и на периферии Галактики, в галактическом гало.

Так, изучение самых далеких звезд с помощью Gaia, расположенных на расстояниях 10–50 кпк, привело к открытию звездных потоков совершенно иной природы. Они возникали в результате действия приливных сил, возникающих при сближениях межгалактических шаровых скоплений и карликовых галактик с нашей Галактикой. Результаты расчетов встречи спутника с галактикой на примере простейшей численной модели показан на рис. 9.

Разумеется, направления движений в пространстве таких потоков имеют

Рис. 9. Спутник галактики превращается в поток. Картина на момент времени эволюции, равному  $t = 5$  млрд лет. Расчеты выполнены нами (красные точки – это распадающиеся звездные ассоциации ( $N = 1000$ )), рисунок галактики, подписи координатных осей сохранены в той форме, как они предоставлены библиотекой для Python и galpy (URL = [https://github.com/henrysky/milkyway\\_plot](https://github.com/henrysky/milkyway_plot))



произвольный характер. Обнаружение потоков с данным ретроградным движением в галактике служит одним из важных признаков его «внегалактической» природы. Они являются продуктами распада близких спутников Галактики. Далекие (100 кпк) карликовые галактики попадают в галактическое гало и, теряя звезды, образуют потоки. Их открыто уже более 15. Причина возникновения таких потоков – это поглощение Галактикой ШС и карликовых галактик.

Естественно, что процессы поглощения идут не только в спиральных галактиках. Гигантская эллиптическая галактика также поглощает другие галактики. Последние превращаются в потоки вокруг центра галактики.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Представленная картина образования и эволюции астрономических систем от компактных объектов к «копьям» свойственен не только звездным скоплениям и ассоциациям. Любопытно, что самые близкие к Солнцу звезды при пролетах около облака Оорта извлекают из него долгопериодические кометы. К этому процессу может иметь отношение, как уже говорилось выше, комета Хейла–Боппа (рис. 8). Ледяные

ядра комет, теряемые звездами за счет взаимодействия этих ядер с планетами-гигантами, наполняют межзвездное пространство копьями, состоящими из комет, тем самым образуя не только звездное, но и кометное население Галактики. Оно состоит из комет, потерявших связь со своими звездами – бывшими хозяйками.

Как мы уже отметили, большинство звездных скоплений разрушаются в момент их возникновения после потери газовой компоненты. Оставшиеся гравитационно-связанные скопления продолжают свой путь в Галактике. Высокоточная фотометрия позволила найти, что некоторые из скоплений не являются однородными группами звезд-родственников, а представляют ансамбли звезд нескольких хорошо выделенных поколений. Причиной этого могли быть либо слияния однородных скоплений разного возраста, либо несколько последовательных вспышек звездообразования в одном скоплении. Сейчас эта тема находится в центре внимания астрономов, занимающихся звездными скоплениями.

Степень изученности звездного населения Млечного Пути составляет чуть более 1% (звездные каталоги, полученные КА Gaia, включают данные об

около 1.3 из 100 млрд звезд Галактики). Каталогизировано около 5 тыс. скоплений из как минимум 100 тыс. скоплений. Gaia предоставляет возможность открыть еще 100 тыс. скоплений! В далеком будущем можно открыть около 1 млн скоплений, которые расположены в пределах Млечного Пути, состоящем из приблизительно 100 млрд звезд.

В заключение нельзя не вспомнить наших ученых, которые стояли у истоков изучения звездных скоплений. В нашей стране исследование скоп-

лений приобрело популярность благодаря П.П. Паренаго, Б.В. Кукаркину, П.П. Холопову и К.А. Бархатовой. В частности, Клавдия Александровна, будучи одновременно и ученым, и организатором, создала школу по изучению звездных скоплений в Уральском Государственном Университете (г. Свердловск, ныне Екатеринбург). Материалы о ее биографии см. в разд. «Литература». Тему для исследований Клавдии Александровне предложил ее руководитель, известный астроном Павел Петрович Паренаго.

## Литература

*Бархатова К.А.* *Астрономический Журнал*, № 27 (180), 1950.

*Дьяченко А.И.* *Летающие группы Эггена*. *ЗиВ*, 2004, № 6. С. 12–25.

*Zeldovich Ya.B.* *A&A*, 1970, N 5, pp. 84–89.

*Kohei Hattori and Monica Valluri.* The shape of the dark matter halo revealed from a hypervelocity star. *Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 14, Symposium S353: Galactic Dynamics in the Era of Large Surveys*, June 2019, pp. 96–100. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1743921319008718>

*Tutukov A.V.* *Astro. Ap.*, N 70, 57, 1978.

*Perottoni H. et al.* A cold stellar stream in Pegasus *MNRAS*486, pp. 843–850 (2019).

*Portegies Zwart S.* (Симон Портегис Цварт) *Leiden Observatory, Leiden University, P.O. Box 9513, 2300 RA, Leiden, The Netherlands* <http://galspace.spb.ru/index337.html>

*Eggen O.J.* (Олин Эгген) *Moving Groups of Stars. Galactic structure*, ed. Adriaan Blaauw and Maarten Schmidt. University of Chicago Press, Chicago, p. 111 (1965).

*Zuckerman B. and Inseok Song.* The AB Doradus Moving Group. *The Astrophysical Journal*, 613: L65-L68, 2004, September 20.

### Некоторые труды В.А. Амбарцумяна

*Амбарцумян В.А.* *Эволюция звезд и астрофизика*. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1947.

*Амбарцумян В.А.* *Астрономический Журнал*, № 26, 3, 1949.

*Амбарцумян В.А.* *Звездные ассоциации и области активного звездообразования в них // Научные труды под ред. В.В. Соболева. Т. 3. Ереван, Изд. АН Армянской ССР, 1988. С. 290–298.*

*Ambartsumian V.A.* *IAU Transactions, Vol. 8, ed. P. Tb. Oosterhoff, Cambridge University. Press, Cambridge, 1954, p. 665.*

### Материалы о жизни К.А. Бархатовой

*Бархатова К.А.* Past Organizing Committee Member of Commission 37 Star Clusters & Associations IAU. <https://www.iau.org/administration/membership/individual/17258>

*Давыдов И. К.А. Бархатова.* С-У кн. Изд., Свердловск, 1985.

*Левитская Т.И.* К 100-летию со дня рождения Клавдии Александровны Бархатовой, «Звездного профессора» – *Физика Космоса / Труды 46-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2017 г.)*. Екатеринбург.

*Еремеева А.И.* Звездный профессор Клавдия Александровна Бархатова (к 100-летию со дня рождения). *ЗиВ*, 2018, № 3. С. 29–41.

# УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАБОРАТОРНОЙ АСТРОХИМИИ



**ВИБЕ Дмитрий Зигфридович,**

*доктор физико-математических наук*

*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

**СТОЛЯРОВ Андрей Владиславович,**

*доктор физико-математических наук*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

*Химический факультет, Москва, Россия*



DOI: 10.7868/5004439482102002X

*«Чем дальше эксперимент от теории, тем ближе он к Нобелевской премии»*

---

## ВВЕДЕНИЕ

---

За последние несколько десятков лет в наблюдательной астрономии накоплено множество неоспоримых свидетельств того, что в межзвездной и околозвездной среде работает мощный химический реактор по выработке молекулярного вещества – сложного, даже по «земным» меркам, элементного состава и строения. Более того, неожиданное многообразие и уникальность регистрируемых в космосе молекул

явно противоречат нашим «земным» представлениям о возможных путях и механизмах протекания реакций неорганического и органического синтеза в «суровых» космических условиях. Установление детальной кинетической схемы образования и причин выживания сложных молекулярных соединений, обнаруженных на разных стадиях эволюции космических объектов, оказалось нетривиальной задачей для «земной» химии. Решение этой головоломки привлекло внимание профессиональных химиков,

специализирующихся в области молекулярной спектроскопии, квантовой механики и строения молекул, химии высоких энергий и низких температур, химии твердого тела, а также кинетики и гетерогенного катализа.

Для моделирования астрохимических процессов в космологическом масштабе времени необходимо знать полноценную «сетку» (цепочку) химических реакций, эффективных в конкретных физических («космических») условиях, дополненную наборами термодинамических и кинетических констант, справедливыми в широком диапазоне внутримолекулярных возбуждений и поступательных температур. Эта проблема оказалась принципиально сложной для опыта «земной» химии, особенно с учетом кардинальной разницы во временных и пространственных шкалах протекания химических процессов на Земле и вне ее. Кроме того, для однозначной идентификации и контроля концентраций «интермедиатов» предполагаемых астрохимических реакций необходимо также знать их энергетические и радиационные свойства, причем в максимально широком диапазоне электромагнитного спектра.

Требуемые структурно-динамические параметры для устойчивых молекул и их «интермедиатов» можно узнать двумя способами: рассчитав теоретически из первых принципов и/или измерив непосредственно в эксперименте. Учитывая объективную ограниченность использования только теоретического подхода, у астрохимиков возникла настоятельная потребность в проведении лабораторных физико-химических экспериментов, направленных на систематическое воспроизведение (симулирование), спектроскопическую диагностику и кинетическое моделирование элементар-

ных стадий ключевых астрохимических превращений в земных условиях.

В настоящий момент однозначно установлено, что в газовой фазе межзвездной среды (МЗС) протекают в основном независимые от поступательной температуры безбарьерные химические реакции, вызванные действующими межмолекулярными взаимодействиями радикалов и ионов с нейтральными частицами. Главным же источником химической активности Вселенной от Большого Взрыва и до формирования планетных систем является синтез и эволюция нейтральных молекул на поверхности и внутри космической пыли. Важнейшим элементом этих очень эффективных, с точки зрения «земной» химии, гетерогенных химических процессов является каталитическое влияние поверхности пылинки на реакции между адсорбированными молекулами, которые, в свою очередь, могут активироваться космическими лучами, а также рентгеновским и ультрафиолетовым излучением ближайших звезд.

---

## НАЧАЛА МЕЖЗВЕЗДНОЙ ХИМИИ

---

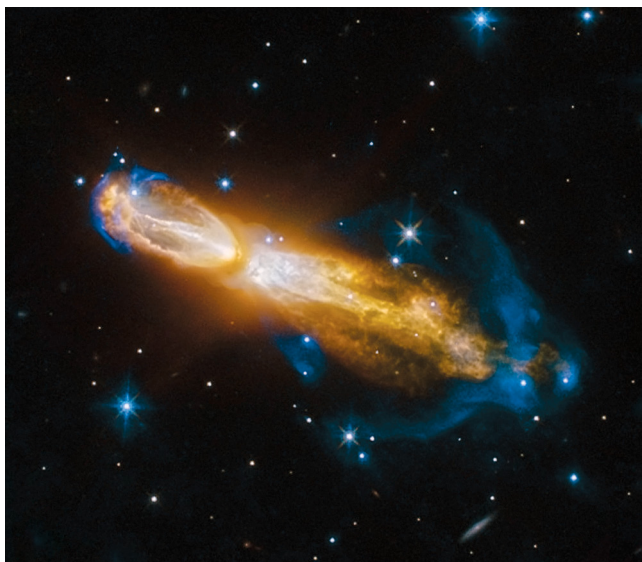
Первые молекулы за пределами Солнечной системы были обнаружены еще в конце 1930-х годов в разреженном пространстве между близкими к нам звездами. Поначалу список молекул содержал в себе всего три наименования –  $\text{CH}$ ,  $\text{CN}$  и  $\text{CH}^+$ , – и казалось, что объяснить их происхождение не составит большого труда. Действительно, если в газовой фазе присутствуют, скажем, атомы углерода ( $\text{C}$ ) и водорода ( $\text{H}$ ), то легко предположить, что их бинарные столкновения приведут к объединению в радикал  $\text{CH}$ . Однако первые расчеты констант скоростей радиационной ассоциации молекул  $\text{CH}$ ,  $\text{CN}$  и  $\text{CH}^+$ , проведенные еще в 1940-е годы, при-



вели к неоднозначным результатам. Объяснить с их помощью наблюдаемое количество молекул так и не удалось, но поначалу это не казалось серьезной проблемой, поскольку появление простейших соединений можно было связать с альтернативными процессами, например, с разрушением углеводородных пылевых частиц, рождающихся в звездах.

Тем временем развитие инструментальной техники астрономических наблюдений (в первую очередь, радиотелескопов) привело к тому, что, начиная с 1960-х годов, инвентарный список межзвездных молекул начал быстро пополняться. Сейчас их известно уже более двух сотен, начиная с одной из первых молекул Вселенной  $\text{HeN}^+$  и заканчивая молекулами фуллеренов с числом атомов углерода 60 и 70. Нетрудно догадаться, что реальное число различных видов молекул в МЗС должно быть гораздо больше того, что мы сейчас способны идентифицировать, так как часть молекул (без которых никак не обойтись в астрохимических цепочках) вообще не имеют радиочастотного спектра (просто потому, что у них нет дипольного момента), а концентрации других находятся ниже уровня предельного обнаружения с помощью существующих телескопов.

Накопление результатов радиоастрономических наблюдений показало, что основным резервуаром химических соединений являются так называемые гигантские молекулярные облака, в которых зарождаются новые звезды, и околозвездные оболочки, появление которых, напротив, знаменует финальный этап звездной эволюции. Интересно, что



*Протопланетарная туманность Тухлое Яйцо, получившая название благодаря высокому содержанию сероводорода*

<https://www.spacetelescope.org/images/potw1705a/> © ESA/Hubble & NASA, Judy Schmidt

практически на всех этапах круговорота космического вещества во Вселенной встречаются молекулы, существование которых в земных условиях практически невозможно. К ним относятся, прежде всего, ионы (как положительно, так и отрицательно заряженные), а также радикалы, имеющие неспаренные электроны. Их химическая активность настолько высока, что на Земле в процессе бинарных столкновений они немедленно вступают в химические реакции и/или нейтрализуются, тогда как в предельно разреженной МЗС время их жизни оказывается достаточно большим, чтобы их можно было обнаружить традиционными спектральными методами. Сейчас считается общепринятым, что в газовой фазе МЗС реализуется сложная цепь физико-химических превращений, которая включает не только столкновительную ассоциацию, но и реакции ионизации, диссоциации и рекомбинации, а также

многостадийные фотопроцессы, индуцируемые квантами ультрафиолетового и рентгеновского излучения, а также частицами космических лучей.

Уже с середины прошлого века стало очевидным, что химические превращения могут происходить не только в газовой фазе МЗС, но и на поверхности и внутри космической пыли, состоящей в основном из углеродных, углеводородных и силикатных частиц

микронного и субмикронного размера с небольшой примесью переходных металлов (Fe, Ni), которые имеют чрезвычайно высокую каталитическую активность. Нежелание покидать привычный мир газофазных превращений из-за отсутствия надежной физико-химической информации о гетерогенных процессах в твердой фазе МЗС вполне объяснимо, но этот трудный шаг был пройден после астрономического обнаружения так называемых «ледяных мантий», состоящих из простейших молекул (CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>OH, ...) и многослойно покрывающих по-

верхность космической пыли. Стало очевидным, что гетерогенные реакции на поверхности и внутри космических льдов, инициализируемые космическим излучением и катализируемые поверхностью пыли, в состоянии объяснить большинство неудач существующих газофазных схем, в том числе, самую главную – невозможность объяснить газофазными процессами синтез молекулярного водорода, самой распространенной молекулы во Вселенной.

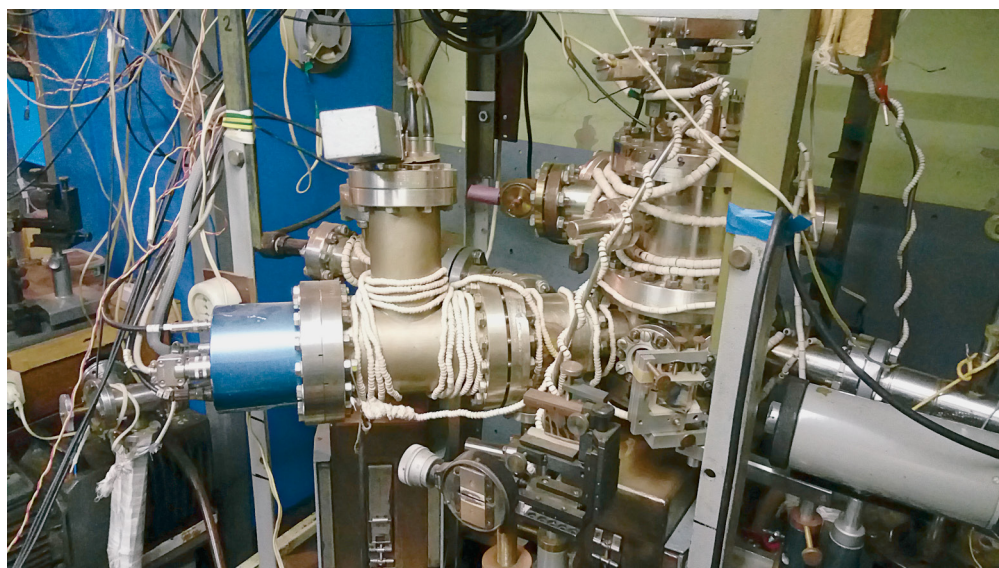
## АНАЛИТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АСТРОХИМИЧЕСКИ ВАЖНЫХ МОЛЕКУЛ

Ключевая задача астрономической молекулярной спектроскопии заключается в определении спектра излучения и/или поглощения астрохимически важных соединений в максимально широком диапазоне длин волн – от вакуумного ультрафиолета

до сантиметрового радиодиапазона. Это непростая задача, и одна из фундаментальных сложностей в ее решении состоит в том, чтобы приготовить достаточное количество исследуемого вещества. Как уже говорилось выше, межзвездные молекулы и их «интермедиаты» часто оказываются химически крайне активными, а это значит, что необходимо каким-то образом удержать их от химического взаимодействия. Один из способов добиться этого состоит в «заморозке» исследуемых молекул в криогенной матрице инертного газа (например,

неона или аргона). Этот метод, известный как метод матричной изоляции, широко применяется для регистрации спектров поглощения различных молекул в ультрафиолетовом и видимом диапазонах. Разумеется, спектры матричной изоляции лишь отчасти сопоставимы с их астрохимическими аналогами, поскольку взаимодействие молекулы с твердотельной матрицей искажает положение и форму линий по сравнению с сильно разреженной газовой фазой МЗС. Однако таким

*Нежелание покидать привычный мир газофазных превращений из-за отсутствия надежной физико-химической информации о гетерогенных процессах в твердой фазе МЗС вполне объяснимо, но этот трудный шаг был пройден после астрономического обнаружения так называемых «ледяных мантий», состоящих из простейших молекул (CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>OH, ...) и многослойно покрывающих поверхность космической пыли.*



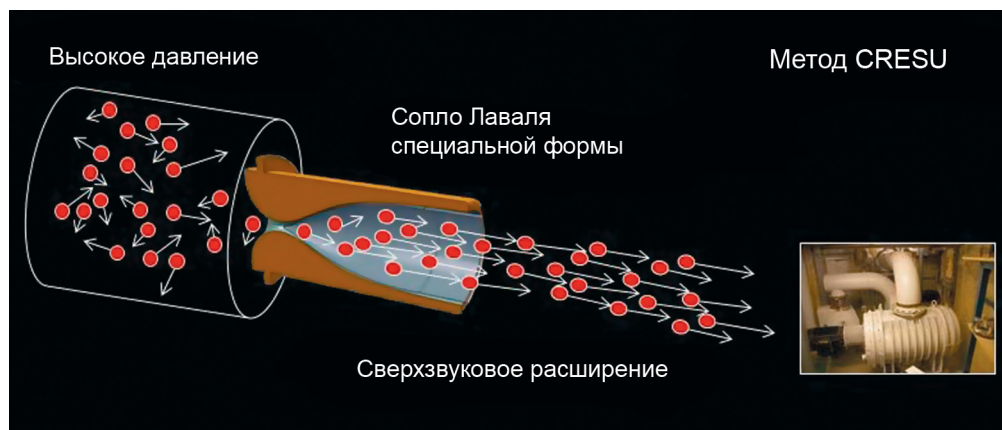
*Установка для исследования фотолитических процессов, Химический факультет МГУ*

способом можно определить общую структуру электронно-колебательных уровней «активной» молекулы, а затем, опираясь на полученную информацию, детально исследовать ее электронно-колебательно-вращательные (ровибронные) переходы при помощи спектральных методов высокого и сверхвысокого разрешения, основанных на эксплуатации перестраиваемых лазерных источников оптического возбуждения и высокочувствительных масс-спектрометрических методов регистрации.

В одном из таких методов – резонансной двухфотонной ионизации – одновременно используется излучение двух лазеров. У первого длина волны сканируется с высокой точностью в широких пределах для систематического возбуждения ровибронных уровней энергии исследуемой молекулы, а длина волны второго зафиксирована на значении, достаточном для ионизации молекулы из исследуемого возбужденного состояния, но недостаточном для ее ионизации из низшего по энергии

электронного состояния. При совпадении частоты излучения первого лазера с энергией дискретного внутримолекулярного перехода наступает резонанс, который регистрируется как максимум интенсивности масс-спектрометрического сигнала. Регистрируемые молекулярные катионы образуются в результате поглощения излучения второго лазера с резонансно возбужденного уровня нейтральной молекулы в ее ионизационный континуум.

В качестве источника изолированных молекул в лазерных экспериментах используется, как правило, метод молекулярных пучков, который позволяет охладить внутренние степени свободы исследуемой молекулы до очень низких колебательных и вращательных температур, что существенно упрощает спектральное отнесение наблюдаемых ровибронных переходов. Более того, молекулы в пучке двигаются с очень большой поступательной скоростью, но почти коллинеарно (параллельно). Это, с одной стороны,



*Экспериментальный метод CRESU получил свое название от французского Cinétique de Réaction en Ecoulement Supersonique Uniforme – Кинетика реакций в однородном сверхзвуковом потоке*

нивелирует отрицательное влияние эффекта Доплера на точность спектральных измерений (при использовании перпендикулярной геометрии лазерного луча молекулярному), а с другой, позволяет (в варианте так называемых скрещенных молекулярных пучков) успешно их использовать для изучения механизма и скоростей элементарных стадий газозофазных реакций (см. следующий раздел).

Другой лазерный метод изучения электронно-колебательной структуры не очень сложных органических молекул – метод возбуждения лазерно-индуцированной флуоресценции (ВЛИФ) – обычно применяется для получения электронного спектра поглощения полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) или их производных, способных излучать избыточную энергию поглощенных УФ-квантов в инфракрасном диапазоне. В эксперименте ВЛИФ поток исследуемых молекул ПАУ, охлажденных сверхзвуковой струей буферного (инертного) газа, адиабатически расширяемого в вакуум, облучается перестраиваемым УФ-лазером, а регистрируется суммарно широко-

полосное излучение в ИК-диапазоне длин волн. Этот же способ, в принципе, годится и для более детального исследования эмиссионного ИК-спектра исследуемых молекул. Однако интенсивность спонтанного ИК-излучения, возникающего в результате УФ-возбуждения, как правило, слишком мала по сравнению с тепловым фоном регистрационного оборудования (за исключением совсем коротких длин волн, порядка 3 мкм). Проблему повышения отношения полезного сигнала к шуму можно решить, охладив ИК-приемник до криогенных температур парами жидкого азота или гелия.

В любом случае, для исследования ИК-диапазона надежнее всего использовать спектры поглощения, а не испускания. Так, например, можно использовать двухступенчатую схему, которая идеологически подобна методу резонансной двухфотонной ионизации, только теперь поток охлажденных молекул сначала облучается перестраиваемым ИК-лазером (например, лазером на свободных электронах), чтобы перевести их в возбужденное колебательное состояние, а затем облучается

УФ-лазером, который способен ионизовать только молекулы, находящиеся в возбужденном состоянии. В этом случае индикатором поглощения ИК фотона служат катионы исследуемой молекулы, но можно также разработать масс-спектрометрическую схему, в которой индикатором поглощения будут нейтральные фрагменты (атомарные и/или молекулярные) ее диссоциации.

Как уже говорилось, в ближнем и среднем ИК-диапазоне основные усилия спектроскопистов сосредоточены на исследовании ПАУ и их производных, поскольку в газовой фазе МЗС в ИК-диапазоне наблюдаются именно эти молекулы. Этот же диапазон важен и с точки зрения исследования космических молекул в твердой фазе МЗС, точнее в ледяных мантиях на поверхностях космической пыли или в ледяных оболочках тел Солнечной системы. Однако в этом случае речь идет исключительно об ИК-спектрах поглощения, и эксперименты оказываются не такими сложными (по крайней мере, организационно): лед нужного состава напыляется на химически инертную подложку и просвечивается непрерывным ИК излучением.

Переходя в более длинноволновые диапазоны спектра – дальний ИК, субмиллиметровый, миллиметровый – мы сталкиваемся с существенно большим разнообразием молекул, спектры которых удастся однозначно идентифицировать (по крайней мере, в лабораторных условиях). И если в УФ-диапазоне речь идет об электронных переходах, а в ИК-диапазоне – о колебательных переходах, то на больших длинах волн мы имеем дело преимущественно (хотя и не исключительно) с чисто дискрет-

ными вращательными переходами в изолированной молекуле.

С точки зрения организации эксперимента тут все просто – это традиционная спектроскопия поглощения: с одной стороны емкости с исследуемым газом находится источник излучения, с другой – приемник. Излучение частично поглощается, проходя через газ, приемник регистрирует изменение начального сигнала. Однако тут возникают новые трудности. Одна из них связана с тем, что даже у не очень многоатомной молекулы есть очень много вращательных переходов, и чтобы получить о них полную и качественную информацию, весь спектральный диапазон нужно сканировать с высоким простран-

*С точки зрения организации эксперимента тут все просто – это традиционная спектроскопия поглощения: с одной стороны емкости с исследуемым газом находится источник излучения, с другой – приемник.*

ственным разрешением, что занимает немало времени. Вторая трудность состоит в том, что интерес в химии МЗС вызывают не только устойчивые молекулы, но и «гиперактивные» радикалы и ионы, а также слабосвязанные молекулярные комплексы. Их нужно не только научиться создавать в условиях эксперимента, но и успевать проанализировать за недолгое время их существования. Один из способов уберечь короткоживущие молекулы от исчезновения состоит в том, чтобы формировать их в расширяющейся со сверхзвуковой скоростью струе газа. Это так называемое адиабатическое расширение подавляет (как и в случае с молекулярным пучком) взаимодействие между молекулами, а общие низкие температуры и давления приближают параметры эксперимента к условиям в МЗС. Но организовать этот процесс удастся только в небольшом объеме пространства. Это означает, что

на пути поглощения излучения оказывается очень небольшое количество молекул и суммарный сигнал от них, естественно, слаб. Методика проведения обсуждаемых экспериментов совершенствуется сейчас в двух направлениях – увеличение скорости сканирования и повышение чувствительности детекторов. В результате спектральное исследование каждой новой молекулы пополняет астрономические базы данных тысячами новых линий, причем не только прецизионной информацией об их положении, но величинами их относительных интенсивностей.

---

## ГАЗОФАЗНАЯ ХИМИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

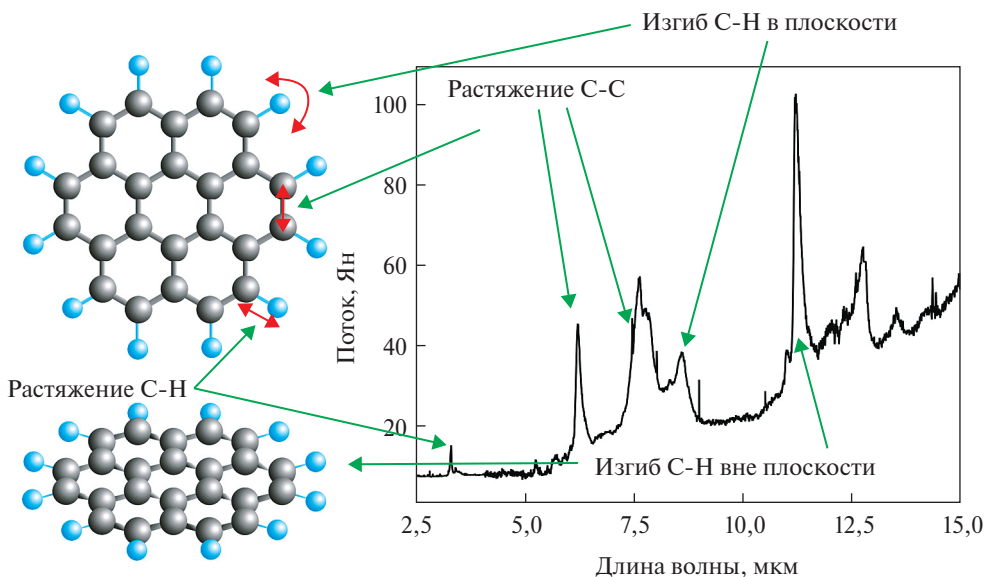
---

Основная задача проводимых газокинетических лабораторных исследований заключается в определении констант скоростей и выхода продуктов реакций бинарных столкновений между астрофизически важными молекулами при различных значениях поступательной температуры, интенсивности потока космического излучения и прочих внешних параметров. Проблема здесь состоит в том, что искомая реакция должна происходить в условиях, максимально приближенных к космическим, т. е. при низком давлении и низкой температуре. Минимальное давление, достигаемое сейчас в лучших вакуумных установках, на порядки величины превышает типичное давление в МЗС. Но это не такая большая проблема, поскольку для измерения скорости бинарной реакции достаточно снизить давление до величин, при которых уже можно пренебречь вкладом трехчастичных столкновений. А вот требование к стабилизации температуры нужно соблюдать строго, так как скорость реакции столкновений может очень резко (по Аррениусу – экспо-

ненциально) зависеть от поступательной температуры. При этом важно не только обеспечить космический холод, но и возможность плавно варьировать температуру эксперимента в достаточно широких пределах, адекватных наблюдаемым астрономическим условиям. Одним из таких инструментов являются упомянутые выше скрещенные молекулярные пучки.

При лабораторном исследовании механизма двухчастичных столкновений необходимо, естественно, подготовить реагенты, обеспечить возможность их взаимодействия, а затем определить результат, причем результатом взаимодействия необязательно должен быть продукт какой-либо химической реакции. Важным направлением подобных исследований является измерение так называемых сечений столкновений, определяющих вероятность того, что молекула в результате удара с другой частицей перейдет в иное энергетическое состояние. Знание этих коэффициентов крайне необходимо для моделирования заселенности молекулярных уровней в МЗС, а следовательно, и распределения интенсивностей в наблюдаемых астрономических спектрах.

Изначально для определения скоростей газофазных реакций использовалась оптическая регистрация спектров послесвечения продуктов газового разряда, наблюдаемых в стационарном или проточном химическом реакторе. В последнем случае набор исходного реагента переносится потоком буферного газа по реакционной колонке, а по пути к нему подмешивается второй реагент. В конце колонки концентрация продуктов и остаточное количество исходных реагентов определяется при помощи масс-спектрометрии или ВЛИФ. Искомые константы скорости можно определить, зная оставшееся



Структура молекулы коронена – полициклического ароматического углеводорода – и наблюдаемые инфракрасные эмиссионные полосы

количество реагентов и скорость течения в реакционной трубе.

Одна из современных методик исследования двухчастичных столкновений использует для формирования потока реагирующих молекул сопло Лаваля, позволяющее добиться необходимой однородности потока по давлению и температуре. В потоке смешиваются оба реагента и, как правило, какой-либо буферный газ. При помощи этой методики можно исследовать не только нейтральные молекулы, но и ионы. Для ионизации истекающего вещества на него сразу за соплом воздействуют электронным ударом.

Для определения кинетических параметров реакций диссоциативной рекомбинации, то есть реакций, в которых молекулярный ион рекомбинирует с электроном, как правило, разваливаясь на несколько нейтральных молекул, обычно используют циклические ускорители, позволяющие создать долгоживущий пучок заряженных частиц.

В двух расположенных рядом накопительных кольцах ускорителей создаются пучки молекулярных ионов определенного вида и электронов, движущиеся с одинаковыми скоростями. Затем оба пучка объединяются в общей камере. Поскольку пучки движутся одинаково, относительные скорости ионов и электронов малы, что соответствует низкой поступательной температуре столкновений.

Подобными же способами можно исследовать не только бимолекулярные реакции, но и реакции, в которых состав и строение изолированной молекулы меняется под воздействием частиц высоких энергий (имитирующих космические лучи) или ультрафиолетовых фотонов (имитирующих межзвездное или околозвездное поле излучения). В последнем случае возникает проблема подготовки хорошо откалиброванного источника излучения, спектр которого был бы похож на спектр типичного межзвездного поля.

В качестве источников оптического излучения в экспериментах по определению скоростей фотопроцессов часто используются ультрафиолетовые лазеры, и здесь возникает еще одна проблема – интенсивность лазерного излучения существенно превосходит интенсивность поля излучения в МЗС, поэтому адаптация результатов лазерных экспериментов к астрохимическим условиям оказывается нетривиальной задачей.

---

## ГЕТЕРОГЕННАЯ ХИМИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ И ВНУТРИ КОСМИЧЕСКИХ ЛЬДОВ

---

В последние годы одной из ключевых задач лабораторной астрохимии стало определение характеристик формирования ледяных мантий и их разрушения, в частности, измерение энергии десорбции молекул в зависимости от состава мантии и ядра пылинки, ее структуры и пр. Важнейшей задачей химии поверхности является также изучение механизмов и скоростей каталитических реакций, происходящих на поверхности пыли и в их толще.

Считается, что скорость реакций на поверхности пылевой частицы (или ее ледяной оболочки) определяется скоростью тепловых «блужданий» адсорбированных молекул. Очевидно, что эта скорость тем больше, чем слабее молекула связана с поверхностью, поэтому важным параметром моделирования поверхностных процессов оказывается именно энергия связи молекулы с поверхностью. Ее величина определяет не только степень подвижности молекулы на поверхности, но и вероятность ее отрыва от пылинки и перехода в газовую фазу МЗС. Неудивительно, что лабораторным экспериментам по определению энергии десорбции уде-

ляется большое внимание. Здесь ключевой является методика температурно-программируемой десорбции (TPD), которая состоит в том, что сначала на подложке формируется слой льда, а затем температуру подложки начинают повышать с запрограммированной скоростью, детектируя (как правило, при помощи масс-спектрометра), какие молекулы начинают испаряться из слоя льда.

В последнее время большое внимание привлекают к себе фотоиндуцированные процессы в ледяных оболочках космических пылинок, когда поглощение фотона приводит к диссоциации/ионизации молекул и образованию активных радикалов/ионов, которые, в свою очередь, реагируют друг с другом, начиная новый этап химической эволюции межзвездных льдов. В экспериментах по разрушению льда фотонами или частицами высоких энергий важной величиной оказывается выход реакции, т. е. среднее количество молекул, переходящих из твердой в газовую фазу при поглощении одного фотона или одной частицы.

Следует отметить, что круг задач гетерогенной астрохимии определяется не только сложными молекулами. Удивительно, но до сих пор нет абсолютной ясности с синтезом даже самой простой молекулы – молекулы водорода, которая в нашу эпоху может формироваться за счет бинарных столкновений только на поверхности пылинок. Экспериментаторы прилагают большие усилия, чтобы определить эффективность образования молекулы  $H_2$  на различных поверхностях и при различных температурах, однако вопросов пока остается слишком много. Это отчасти связано с тем, что характер любых физико-химических процессов в ледяном слое (перемещения молекул, реакций между ними,



испарения) сильно зависит от «истории» приготовления льда. И здесь мы сталкиваемся с фундаментальной проблемой временных шкал. Можно обеспечить нужный химический состав и температуру льда, нужное поле излучения или поток частиц высоких энергий, но совершенно невозможно соблюсти время: процессы, которые в космосе длятся тысячами лет, в лаборатории необходимо завершить за несколько часов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пятидесятилетняя история «неземной» химии ознаменовалась поразительными успехами, породившими новые идеи как в понимании механизмов химических реакций в «экзотических» межзвездных средах, так и в наблюдательной диагностике областей космического пространства.

Основным инструментом определения фундаментальных физико-химических параметров многостадийных химических процессов, протекающих как в газовой, так и твердой фазе МЗС – стали в последние годы экспериментальные и теоретические лабораторные исследования, моделирующие в ряде случаев реальные астрохимические превращения на экспериментальном (наблюдательном) уровне точности. Сочетание прямых астрономических наблюдений и земного астрохимического (экспериментального и квантовохимического) моделирования вносит синергетический вклад в наше понимание особенностей протекания сложной цепи химических превращений в далекой и чуждой для нас межзвездной среде.

*А.В. Столяров благодарит за поддержку грант Российского научного фонда (проект № 18-13-00269).*



**ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА 1727**  
naukapublishers.ru

# ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

реклама

**Рисунок на коже**  
**Все виды тиснения**  
**Кожанный переплет**  
**Рельефное тиснение**  
**Клише любой сложности**  
**Полноцветная роспись обзоров**

**А также адресные папки, дипломы, футляры**

**Берёмся за работы любой сложности!**  
По всем интересующим вопросам пишите на почту [kiseleva@tnauka.ru](mailto:kiseleva@tnauka.ru)

# ФЕНОМЕНОЛОГИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

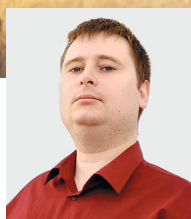


СЫСОЕВ Артем Андреевич,  
ИУДИН Дмитрий Игоревич<sup>1</sup>,

доктор физико-математических наук

Институт прикладной физики РАН,

Приволжский исследовательский медицинский университет



DOI: 10.7868/50044394821020031

**Продолжение статьи *ЗиВ* №1, 2021, стр. 46–58**

## ПАРАМЕТРЫ ТИПИЧНОГО МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА ТИПА «ОБЛАКО–ЗЕМЛЯ»

Чтобы дать читателю общее представление о параметрах и этапах развития молнии, приведем краткое описание наиболее типичного отрицательного разряда типа «облако–земля». Хотя, как уже было сказано выше, общая доля достигающих земли молний не так уж велика, именно они представляют наибольшую опасность для народного хозяйства, причем подавляющее большинство из них имеют именно отрицательную полярность.

<sup>1</sup> Также Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

В развитии разряда типа «облако–земля» можно выделить две основные стадии: до и после контакта с землей (рис. 8). Во время продвижения к поверхности земли отрицательный лидер распространяется с характерной средней скоростью  $2 \cdot 10^5$  м/с, преодолевая дистанцию в несколько километров от облака до земли за время порядка нескольких десятков миллисекунд. На данном этапе типичные значения тока, проводимости, продольного электрического поля и температуры молниевое канала составляют порядка 100–200 А, 10 кСм/м, 10 кВ/м и 10 кК соответственно, что типично для дугового разряда.

С момента контакта нисходящего лидера с землей или с развивающимся навстречу ему восходящим лидером противоположной полярности

начинается главная стадия развития молнии. Данный этап характеризуется волной **возвратного удара (return stroke)**, со скоростью  $(1-2) \cdot 10^8$  м/с распространяющейся от точки контакта с землей вверх по каналу молнии и приводящей к его разрядке.



Дело в том, что распространение лидерного канала сопровождается формированием чехла пространственного заряда вокруг него, причем знак данного заряда совпадает с полярностью лидера (подробности данного процесса для случаев положительного и отрицательного лидеров описаны ниже). Вопреки распространенному мнению, во время развития волны возвратного удара разрезается именно чехол лидерного канала, а не ячейка заряда внутри грозового облака. Типичный импульс тока возвратного удара отрицательного лидера молнии характеризуется пиковым током на уровне 30 кА, длится примерно 70–80 мкс и переносит на землю порядка 5 Кл заряда. Данный импульс практически мгновенно повышает температуру канала молнии примерно до 30 кК (для сравнения, температура видимой поверхности Солнца составляет примерно 6 кК), что приводит к появлению ударной акустической волны, называемой громом. Большинство (75–80%) разрядов на землю не ограничивается первым импульсом тока возвратного удара и имеет несколько (обычно 3–5) **последующих компонент (subsequent return stroke)**. Каждая из них характеризуется пиковым током, длительностью импульса и перенесенным зарядом на уровне 10–15 кА, 30–40 мкс и 1 Кл соответственно, значительно уступая по интенсивности первой. Паузы между последовательными компонентами

Рис. 8. Последовательность процессов, связанных с развитием отрицательного разряда типа облако-земля. На первых двух кадрах виден разветвлённый канал нисходящего отрицательного лидера молнии. На третьем кадре (главная стадия, первый компонент) виден ярко светящийся заземлённый канал, по которому распространяется импульс тока возвратного удара. На четвёртом кадре видны каналы нисходящего стреловидного лидера (последующий компонент) и восходящего лидера противоположной полярности. Адаптированный рис. 1 из работы: Petersen D.A. High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader / D.A. Petersen, W.H. Beasley // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V. 118, No. 21. P. 12, 110–112, 119.

тока возвратного удара составляют порядка 60 мс.

Примечательно, что основная часть заряда (10–20 Кл) переносится на землю не во время данных импульсов, а в промежутках между ними, в фазах **непрерывного тока (continuing current)**, суммарная длительность которых достигает порядка 100 мс. При этом амплитуда непрерывного тока составляет те же 100–200 А, что и на стадии нисходящего лидера.

Интересно, что интегральная энергия молниевое разряда, равная  $10^9-10^{10}$  Дж, относительно невелика. Даже если каким-либо образом удалось бы аккумулировать всю эту энергию, ее

хватило бы на поддержание непрерывной работы 60-ваттной лампочки в течение времени от полугода до пяти лет, что говорит о бесперспективности идеи утилизации молниевой энергии.

## ФОРМИРОВАНИЕ ЗАРЯДОВОЙ СТРУКТУРЫ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА

Молниевый разряд зарождается в зонах сильного электрического поля напряженностью порядка 100 кВ/м внутри грозового облака, которое формируется при наличии холодного плотного воздуха в верхних слоях и теплого влажного в нижних. Мощные восходящие потоки разреженного теплого воздуха, скорость которых составляет 5–30 м/с, образуют облака, при этом более плотный холодный воздух опускается вниз.

В целом механизм электрификации облака сводится к двум процессам: (1) мелкомасштабные, в которых происходит электризация гидрометеоров (взвешенные в потоке частицы жидкой и твердой воды), и (2) крупномасштабные, которые приводят к разделению положительного и отрицательного облачных зарядов на зарядовые слои, расстояние между центрами которых (по вертикали) составляет несколько километров.

Существует множество механизмов, отвечающих за электризацию грозового облака в зависимости от стадии его развития и агрегатного состояния воды в нем. Глобально их можно разделить на безындукционные и индукционные. Первые реализуются без участия электрического поля и сводятся к электри-

зации за счет механического трения частиц друг о друга (трибоэлектричество) с их последующим разделением в рамках крупномасштабных конвективных потоков внутри облака. Индукционная зарядка вступает в действие позднее, к моменту, когда в результате реализации безындукционного механизма в облаке устанавливается отличное от нуля электрическое поле, и базируется на поляризации гидрометеоров. На данный момент доминирует представление о том, что решающую роль

в процессе электризации играют безындукционные соударения между частицами крупы и мелкими льдинками, происходящие в присутствии переохлажденных капель воды. Остановимся на данном механизме подробнее.

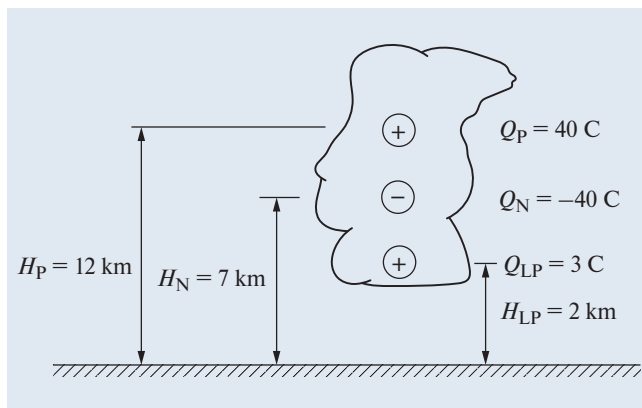
Существенная передача заряда при соударениях частиц крупы со льдинками происходит только в присутствии капель воды, в условиях грозового облака находящихся в основном в переохлажденном состоянии. Тяжелые частицы крупы падают вниз под действием гравитации, проходя через суспензию из переохлажденной воды и кристалликов льда, которые достаточно легки, чтобы подниматься восходящим потоком на вершину облака.

Тяжелые частицы крупы падают вниз под действием гравитации, проходя через суспензию из переохлажденной воды и кристалликов льда, которые достаточно легки, чтобы подниматься восходящим потоком на вершину облака. Капельки воды при контакте с льдинками примерзают к ним, образуя корочку инея. Эксперименты показывают, что знак заряда, приобретаемого частицами крупы при контакте с заиндевевшими льдинками, зависит от температуры. При температуре выше некоего порогового значения (на меньших высотах), называемого температурой

*Существенная передача заряда при соударениях частиц крупы со льдинками происходит только в присутствии капель воды, в условиях грозового облака находящихся в основном в переохлажденном состоянии. Тяжелые частицы крупы падают вниз под действием гравитации, проходя через суспензию из переохлажденной воды и кристалликов льда, которые достаточно легки, чтобы подниматься восходящим потоком на вершину облака.*

Рис. 9. Схематичное представление наиболее типичной трипольной структуры грозового облака (сверху вниз: основной положительный, основной отрицательный и нижний положительный слой).

Рис. 3.2а из монографии: Rakov V.A. *Lightning: Physics and effects* / V.A. Rakov, M.A. Uman. New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p.



реверса, крупа заряжается положительно, в ином случае (на больших высотах) – отрицательно. Оказалось, что температура реверса лежит в пределах от  $-20$  до  $-10$  °C, что как раз соответствует характерной высоте основного отрицательного слоя, составляющей 6–8 км. Осаждаясь еще ниже, положительно заряженная крупа формирует нижний положительный слой. Легкие кристаллики льда, получающие положительный заряд при соударениях на больших высотах, где температура ниже реверсной, поднимаются вверх, создавая основной положительный слой, центр которого находится примерно на 10-километровой высоте. Отрицательный заряд остается на промежуточной высоте, формируя отрицательный зарядовый слой. Заряд каждого слоя может достигать многих десятков кулон. Средний дипольный момент заряженного облака составляет около  $100 \text{ Кл} \cdot \text{км}$  (до  $500 \text{ Кл} \cdot \text{км}$ ).

Таким образом, данный механизм объясняет наиболее типичную трипольную структуру заряда грозового облака (рис. 9). Данная структура, по-видимому, объясняет бимодальный характер распределения высот инициации молний, которые лежат между 7.5 и 10.5 км для внутриоблачных разрядов и между 4.5 и 7.5 км для отрицательных

разрядов типа «облако-земля»<sup>2</sup>. Возможны и другие ситуации, например, когда положительный заряд облака находится снизу, а отрицательный сверху (инвертированный диполь или триполь). Отметим, что деление облака на вертикальные слои заряда одного знака является лишь упрощением, в то время как реальная структура заряда сильно неоднородна и меняется как в пространстве, так и во времени.

Средняя плотность зарядов в грозовом облаке порядка  $10^{-9}$ – $10^{-8} \text{ Кл/м}^3$ , средняя скорость зарядки облака порядка  $10^{-10}$ – $10^{-8} \text{ Кл/(м}^3 \cdot \text{с)}$ . Обычно грозовое облако активно на протяжении 30–40 минут. Типичная площадь небольшой грозовой системы размером 10–20 км составляет около  $100$ – $300 \text{ км}^2$ . Она порождает молниевый разряд каждые 20–30 секунд на протяжении 40–60 минут.

<sup>2</sup> Данные по работе: Karunarathna Nadeeka. Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small florida thunderstorms / Nadeeka Karunarathna, Thomas C. Marshall, Sumedhe Karunarathne, Maribeth Stolzenburg // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. V. 122, No. 12. P. 6565–6591. Для сравнения, в более ранней работе были получены значения 5.3 и 9.2 км (Proctor D.E. Regions where lightning flashes began / D.E. Proctor // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 5099–5112).

---

## ИНИЦИАЦИЯ МОЛНИИ В ГРОЗОВОМ ОБЛАКЕ

---

Теперь, когда мы обозначили основные механизмы зарядки грозового облака, в результате которой внутри него формируются зоны относительно сильного электрического поля, отдельно остановимся на самом важном вопросе физики молнии. Каким образом происходит инициация молниевых разрядов в безэлектродной облачной среде, максимальная напряженность электрического поля внутри которой примерно на порядок ниже диэлектрической прочности воздуха? Действительно, согласно данным прямых зондовых измерений, максимальные внутриоблачные поля крайне редко превышают 200–300 кВ/м, в то время как поле пробоя воздуха, при котором частота ударной ионизации сравнивается с частотой прилипания электронов к нейтралам, составляет примерно 3 МВ/(м · атм). Предпринятые многочисленными научными коллективами попытки решения данной проблемы вылились в ряд конкурирующих гипотез, каждая из которых сталкивается с определенными трудностями.

Исторически первый механизм восходит к работам Лэба, Фелпса и Гриффитса 1960–1970-х годов, в которых изучалась возможность инициации стримеров с гидрометеоров. Предполагалось, что положительный стример зарождается в области усиленного поля, возникающего при поляризации одиночного гидрометеора во внешнем поле или при сближении пары противоположно заряженных гидрометеоров. При этом считалось, что развивающаяся с гидрометеора система положительных стримеров или несколько перекрывающихся стримерных систем, развивающихся с соседних гидрометеоров, выносят положительный заряд в направлении

роста и аккумулируют отрицательный заряд в точке старта. Это, в конце концов, приводит к появлению пучка отрицательных стримеров, растущих в противоположном направлении. Прогреваясь токами поляризации, биполярная стримерная система формирует внутри себя горячий лидерный канал, способный к самостоятельному поддержанию своего дальнейшего распространения. Недостаток данного механизма состоит в том, что для обеспечения устойчивого развития стримерной системы необходимо электрическое поле, в два-три раза превосходящее максимальные значения, наблюдаемые в грозовом облаке.

Вторая гипотеза основана на предложенном А. Гуревичем с соавторами в 1992 г. механизме пробоя на высокоэнергичных убегающих электронах, для которых эффективная сила трения убывает в интервале от 0.1 кэВ до 1 МэВ. В данном энергетическом диапазоне электрон может набирать энергию вплоть до 1 МэВ, при которой сила трения становится достаточной для компенсации ускоряющего действия электрического поля. При удачном месте возникновения первых затравочных убегающих электронов, появляющихся под действием ионизации нейтралов частицами космических лучей, они могут породить электронную лавину, что, в свою очередь, способно привести к электрическому пробую облачной среды. Предполагается, что пробой на убегающих электронах способен создать плазменное пятно, поляризация на границах которого приводит к существенному усилению поля. Если плазма, поляризуясь, локально приобретает форму стримерной головки, запускается описанный выше стримерный механизм формирования лидера молнии. Несмотря на то, что пробой на убегающих электронах требует полей, примерно равных максимальным значениям, в грозовом облаке значениям,

необходимая для реализации данного процесса протяженность области сильного поля составляет порядка нескольких километров, что далеко не всегда подтверждается данными наблюдений.

В своей работе 2005 г. Двайер оспаривает возможность данного сценария, указывая на то, что затравочные электроны, произведенные частицами космического ветра, должны иметь большой поперечный разброс, вследствие чего производимая ими плазма будет сильно разреженной. Вместе с тем в той же работе Двайер предлагает позитронную модернизацию механизма пробоя на убегающих электронах. В ее рамках развитие разряда поддерживается петлей положительной обратной связи между позитронными и гамма-лучами и может привести к возникновению локальной зоны сильного электрического поля вблизи границы распространения разрядной активности. Проведенные Двайером вычисления показывают, что за счет данного механизма электрическое поле даже в относительно компактной области может достичь значений, превышающих 1 МВ/м при давлении на уровне моря, и, таким образом, поддерживать процесс «традиционного» пробоя, приводящего к инициации молнии. Данный подход, однако, предполагает наличие в грозовом облаке нереалистично большой разности потенциалов, составляющей несколько сотен миллионов вольт (450 МВ при поле 350 кВ/м и 200 МВ при поле 600 кВ/м).

Еще один гибридный механизм, соединяющий идею пробоя на убегающих электронах с инициацией положительных стримерных систем с поверхности гидрометеоров, был предложен Петерсеном с соавторами в 2008 г. В рамках данной модели пробой на убегающих электронах обеспечивает наличие предварительной ионизации и достаточно сильного электрическо-

го поля, возникающего за счет поляризации наработанной электронной лавиной холодной плазмы, необходимых для инициации оложительных стримеров с поляризованных локальным полем гидрометеоров. Возникающий пучок положительных стримеров по мере развития накапливает отрицательный заряд в точке своего основания, локально усиливая поле и создавая условия для возникновения противоположно направленных отрицательных стримеров. Менее многочисленные, но более мощные отрицательные стримеры теперь уже биполярной стримерной системы, прогреваясь, формируют канал пространственного лидера и, участвуя в процессе разделения заряда, усиливают поле на периферии разрядной структуры, провоцируя появление еще одной (вторичной) системы положительных стримеров, развитие которой происходит подобным же образом. Далее вторичная стримерная система поляризуется по аналогии с исходной. В ходе совместного развития положительные стримеры вторичной системы сливаются с отрицательными стримерами первичной, создавая единый канал, прогреваемый токами выравнивания потенциалов. В результате многократного повторения данного процесса перекрывающаяся и сливающаяся цепочка биполярных стримерных систем формирует канал лидера молнии.

Фактически работа Петерсена обозначила тенденцию возврата к исходным идеям Лэба, Фелпса и Гриффитса, в которых ключевую роль играет возникновение стримерного разряда с поверхности гидрометеора, и породила новую группу исследований. Однако и данные работы имеют ряд проблем, связанных с необходимостью либо чрезвычайно интенсивной предварительной ионизации, которая обеспечивается затравочной концентрацией электронов на уровне  $10^{15}$ – $10^{17}$  м<sup>-3</sup>

(за счет коронных разрядов с поверхности гидрометеоров), либо меньшей исходной концентрации электронов в присутствии нереалистично больших гидрометеоров с высоким аспектным отношением, либо иных труднореализуемых условий.

Например, даже при наличии космических частиц с энергиями не менее  $5 \cdot 10^{15}$  эВ, обеспечивающих фоновую концентрацию свободных электронов на уровне  $10^8 \text{ м}^{-3}$ , для инициации одиночного стримера на высоте 5.5 км во внешнем поле, составляющем 15% от пробойного, требуются веретенообразные частички льда с размерами 6 см и более. Кроме того, даже при выполнении этих благоприятных условий данные механизмы обеспечивают возникновение положительного стримера в полях, составляющих от 10 до 50% от поля пробоя воздуха, наличие которых далеко не всегда подтверждается прямыми измерениями. Стоит отметить, что и появление положительного стримера само по себе не обеспечивает формирования горячего лидерного канала.

В недавнем эксперименте с искусственным облаком заряженного аэрозоля, который провела группа под руководством А.Ю. Костинского, были открыты необычные плазменные образования (рис. 10), которые заслуживают особого внимания. Хотя параметры их плазмы оказались близки к таковым для типичной лабораторной длинной искры, специфическая морфология обнаруженной формы разряда позволяет отнести его к новому (ранее неизвестному) типу. Более того, авторами было высказано предположение о том, что именно необычные плазменные образования, будучи сетью взаимодействующих друг с другом посредством положительных и отрицательных стримеров плазменных каналов, являются промежуточным звеном при переходе от

слабо проводящей стримерной формы разряда к горячему самоподдерживающемуся лидерному каналу. Вероятно, наиболее прогретые в местах слияния токов множества стримеров сегменты необычных плазменных образований могут эффективно поляризоваться и удлиняться, формируя лидерный канал за счет концентрации собранной с достаточно большого объема электростатической энергии в малой области пространства. В работах А.Ю. Костинского с коллегами утверждается, что необычные плазменные образования «металлизируют» облачный объем, формируя зародыш молнии. По-видимому, сам факт их открытия закрывает собой «темное пятно» любого сценария инициации молнии, заключающееся в переходе от неспособной к самостоятельному развитию стримерной формы разряда к самоподдерживающемуся лидерному каналу.

Опираясь на успехи экспериментов с искусственным облаком, А.Ю. Костинский и соавторы в недавней работе (2020 г.) объясняют процесс инициации молнии с точки зрения исключительно анализа имеющихся на настоящий момент данных лабораторных и натурных наблюдений. Предполагается, что основные события разворачиваются в объеме порядка  $0.1\text{--}1 \text{ км}^3$ , в котором существует среднее электрическое поле, не меньшее  $0.28\text{--}0.35 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ . Согласно предложенному сценарию, данный объем заполняется сильно локализованными в пространстве областями надкритического ( $>3 \text{ МВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ ) электрического поля с объемами порядка  $10^{-4}\text{--}10^{-3} \text{ м}^3$ , которые фактически являются облачными аналогами лабораторных электродов. Авторы приходят к выводу о том, что триггером, запускающим процесс появления положительных стримеров с «электродов», являются т. н. широкие атмосферные ливни.



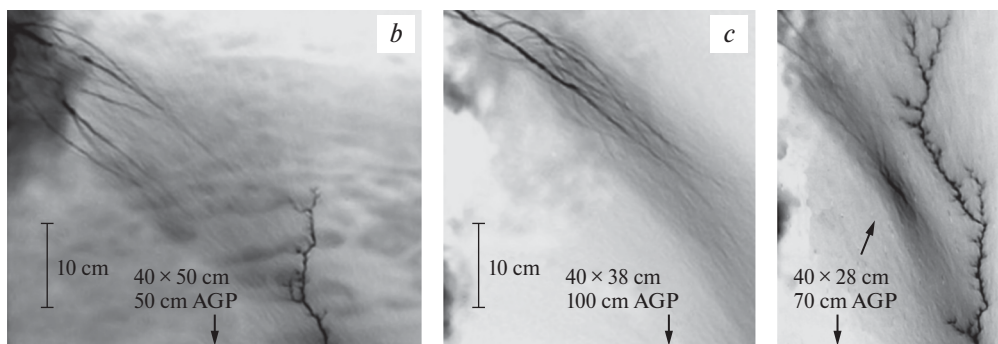


Рис. 10. Структура необычных плазменных образований, формирующихся в рамках биполярной стримерной сети внутри искусственного облака заряженного аэрозоля. Снизу справа на левой панели и справа на правой панели виден канал положительного лидера, растущего с анода. Рис. 3 (справа) и 5 (b, c) (слева) из работы: Kostinskiy A. Yu. Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds / Kostinskiy A. Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 8165–8171.

После того, как высокоэнергичные космические частицы «поджигают» области надкритического электрического поля, с них начинают развиваться положительные и отрицательные стримеры, образующие единую объемную сеть, которая эволюционирует аналогично т. н. необычным плазменным образованиям. Поскольку в рамках необычных плазменных образований формируются лидерные каналы, слияние двух или нескольких плазменных сетей сопровождается мощным всплеском поля и окончательным оформлением лидера молнии. Сильной стороной данного механизма является то, что он может объяснить наблюдаемые особенности электромагнитного излучения грозового облака на стадии инициации молнии. Однако авторы никак не поясняют процесс формирования и устойчивого существования областей надкритического электрического поля. Кроме того, при описанных в работе значениях внутриоблачных полей и масштабов, на которых они существуют, вполне способен работать пионерский механизм Лэба, Фелпса

и Гриффитса. Неясно также, почему локализованные области повышенного поля будут «ждать» прихода космических частиц, которые, по мнению авторов, поставляют затравочные электроны, поскольку в грозовом облаке и так всегда есть свободные электроны, источником которых является их отщипывание от отрицательных ионов.

Недавно в работах Д.И. Иудина и коллег был предложен принципиально новый механизм инициации молнии, основанный на индуцированном шумом кинетическом переходе, происходящем в стохастическом поле заряженных гидрометеоров. Результатом кинетического перехода являются пятна ионной плазмы с линейными размерами, достигающими нескольких дециметров, и временами жизни порядка 1–10 с. При этом подчеркивается, что резкий рост ионной проводимости происходит в экспоненциально редких компактных областях пространства на фоне исчезающе малых изменений средней проводимости среды. В ходе поляризации, обусловленной крупномасштабным электрическим полем грозы, поле на

концах плазменных пятен усиливается до величины, достаточной для инициации положительных стримеров. Коллективная динамика стримерных систем обеспечивает появление связанной сети плазменных каналов за счет их объединения вдоль направления внешнего поля. При этом внутри сети появляются горячие сегменты, подобные уже упоминавшимся выше необычным плазменным образованиям, которые поляризуются и по мере роста кластеризуются в «зародыш» молнии, даже если величина поля сама по себе недостаточна для распространения положительных стримеров. Преимуществом данного механизма является факт того, что он, по мнению авторов, способен работать в условиях типичного грозового облака.

---

## МНОГООБРАЗИЕ ТИПОВ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

---

Поговорим теперь о различных типах молниевых разрядов и способах их распространения. Как уже было отмечено, в зависимости от знака переносимого на головке канала заряда – выделяют положительные и отрицательные лидеры молнии.

### Ступенчатые отрицательные лидеры

Прежде всего поговорим о наиболее практически значимых (поскольку более 90% разрядов типа «облако-земля» вызваны нисходящими лидерами отрицательной полярности) **ступенчатых отрицательных лидерах молнии** (negative lightning stepped leaders).

Начиная с 1930-х годов, когда Шонланд с коллегами начал свои пионерские оптические наблюдения, стало известно, что отрицательные лидеры молнии, в отличие от положительных, всегда распространяются ступенчатым

образом. Наблюдаемые с помощью стрик-камеры ступени имели длину порядка десятков метров, а интервалы времени между ними насчитывали десятки микросекунд.

Современные наблюдения ступенчатого развития триггерных и натуральных молний свидетельствуют о меньших длинах ступеней и паузах между ними. Выяснилось, что формирование ступени молниевоего лидера в целом происходит так же, как и в случае длинной отрицательной искры. Циклическая последовательность процессов, составляющих образование ступени модельного отрицательного лидера, схематично представлена на рис. 11 и может быть описана следующим образом:

(1) вспышка короны отрицательных стримеров, возникающая с новообразованной головкой отрицательного лидера, завершает процесс формирования предыдущей ступени и внедряет большое количество отрицательного заряда в область пространства перед головкой лидера, что показано на стадии А рис. 11;

(2) внедренный вспышкой отрицательный заряд создает перед головкой отрицательного лидера область с сильно неоднородным электрическим полем. В результате этого внутри или вблизи области, занятой отрицательным пространственным зарядом, возникают сильно локализованные, вытянутые вдоль поля, плазменные образования, называемые **пространственными стеями (space stems)**. Тройка конкурирующих пространственных стемов, расположенных ниже области вспышки стримерной короны, показана на стадии Б рис. 11;

(3) пространственные стеи испускают положительные стримеры в направлении канала отрицательного лидера. Происходящее при этом накопление отрицательного заряда в точке стеи создает условия для возникновения растущих из него в противополож-

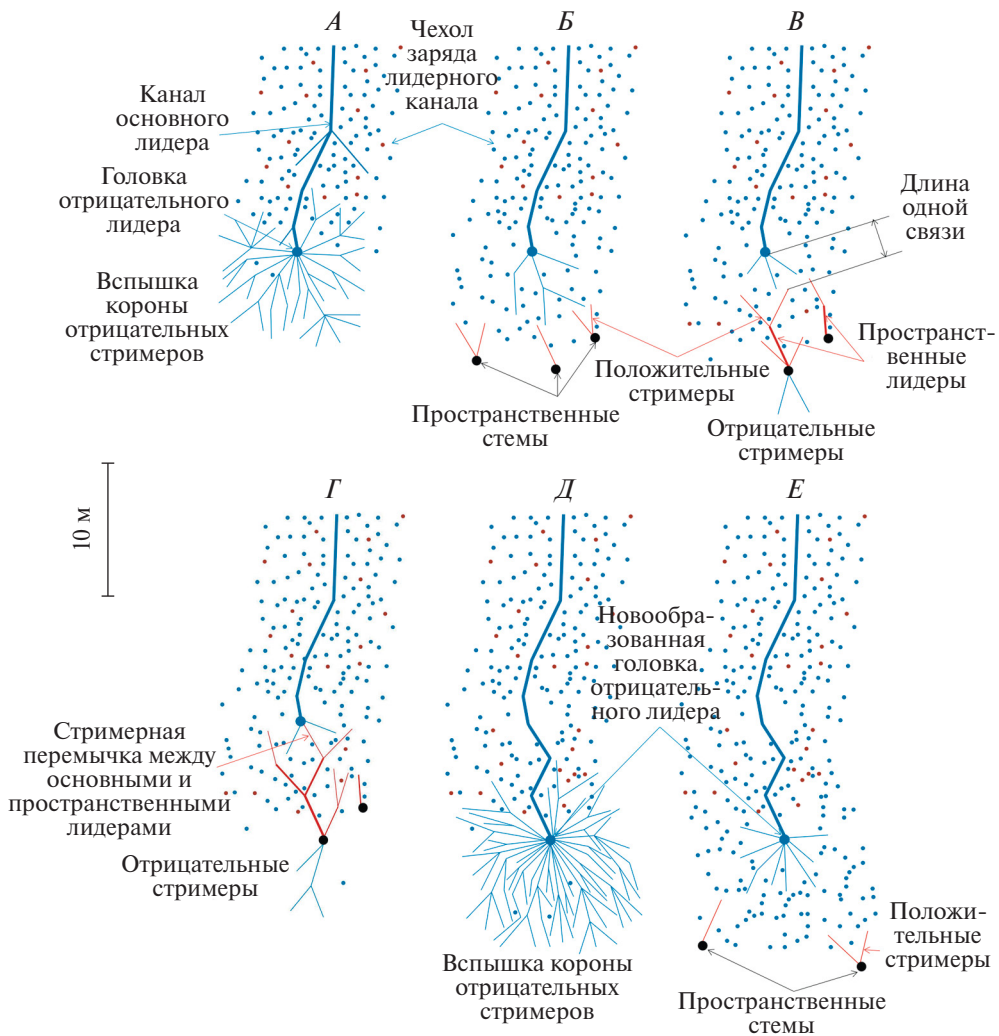


Рис. 11. Схема формирования ступени отрицательного лидера. Полный цикл (А–Д) обычно длится несколько десятков микросекунд. Темно-красный и голубой цвета отвечают положительной и отрицательной полярностям соответственно. Более жирные линии отвечают большим проводимостям каналов. Черные кружки символизируют пространственные стемы. Положительные и отрицательные пространственные заряды обозначены темно-красными и голубыми точками соответственно. Адаптированный рис. С.1 из работы: Syssoev A.A. Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders / Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125, No. 7. P. e2019JD031360.

ную сторону отрицательных стримеров (стадия В рис. 11);

(4) по мере того, как пространственные стримеры прогреваются токами поляризации и увеличивают свою

проводимость, они трансформируются в пространственные лидеры, показанные на стадии В рис. 11;

(5) положительный конец пространственного лидера прорастает навстречу

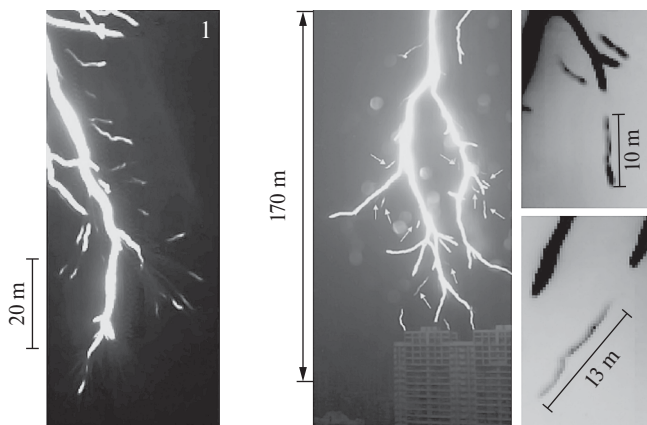


Рис. 12. Кадры высокоскоростной съемки, визуализирующие «тонкую структуру» головной части канала отрицательного лидера молнии. Более толстый канал отрицательного лидера окружен многочисленными каналами пространственных лидеров (на правой секции рисунка они отмечены желтыми стрелочками). Фрагменты рис. 5 из работы: Petersen D.A. High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader / Petersen D.A., Beasley W.H. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V. 118, No. 21. P. 12, 110–112, 119 (слева) и рис. 1(b) и 6 из работы: Qi Q. High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance / Qi Q., Lu W., Ma Y. et al. // *Atmospheric Research*. 2016. V. 178–179. P. 260–267 (справа)

основному (отрицательному) лидеру. Происходит слияние стримерных корон двух лидеров противоположной полярности (стадия Г рис. 11);

(6) объединение каналов двух лидеров приводит к быстрому перераспределению заряда по всей длине общего канала. Возникающий при этом ток выравнивания потенциалов прогревает все каналы, по которым протекает, увеличивая их проводимость. Головка отрицательного лидера перемещается в отрицательный конец бывшего пространственного лидера. Большое

количество отрицательного заряда, внедренного в новообразованную головку отрицательного лидера токами поляризации нового сегмента канала, становится причиной возникновения новой вспышки короны отрицательных стримеров (см. стадию Д рис. 11);

(7) после стадии Д, аналогичной стадии А, перед новообразованной головкой

отрицательного лидера формируется следующее поколение пространственных стемов, некоторые из которых развиваются в пространственные лидеры и дают начало новым ступеням, то есть весь описанный процесс повторяется (стадии Б и Е рисунка рис. 11 также аналогичны друг другу).

Из приведенного описания процесса образования ступени можно выделить два важных факта. Во-первых, стримерные зоны отрицательных лидеров, в отличие от положительных, одновременно содержат стримеры обеих полярностей. Во-вторых, процесс образования ступени включает в себя формирование активного элемента, так называемого пространственного лидера, перед головкой канала основного отрицательного (рис. 11 и 12). Источниками пространственных лидеров являются пространственные стемы, вытянутые вдоль поля поляризованные плазменные образования сантиметрового масштаба (в лабораторных условиях). Возникновение и эволюция пространственных стемов остаются недостаточно изученными. Существующие на данный момент наблюдения ступенчатого развития отрицательных лидеров ограничены и не могут дать достаточного понимания физической сущности процесса.

В данной ситуации наиболее приемлемым методом исследования является

численное моделирование. В недавней работе А.А. Сысоева и др. 2020 г. была предложена продвинутая модель распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии. Впервые была учтена асимметрия пороговых полей распространения положительных и отрицательных стримеров, что позволило воспроизвести полный цикл процесса формирования ступени. Авторы исследования делают вывод, что причина ступенчатого способа развития отрицательного лидера связана именно с данной асимметрией. Фактически получается, что отрицательному лидеру «выгоднее подождать», пока навстречу к нему прорастет канал положительной части пространственного лидера, способный расти в условиях вдвое меньшего поля, чем распространяться самостоятельно. Было также показано, что причиной появления пространственных стемов является усиление поля на неоднородностях отрицательного заряда, распределяемого перед новообразованной головкой отрицательного лидера во время вспышки короны отрицательных стримеров, завершающей формирование ступени. На сегодняшний день это первая попытка объяснить, почему отрицательные молниевые лидеры распространяются не путем самостоятельного роста (как это делают по большей части непрерывно растущие положительные лидеры молнии), а посредством присоединения к ним пространственных лидеров.

С точки зрения наиболее значимых параметров отрицательных лидеров можно выделить следующее. Типичная скорость распространения нисходящего отрицательного лидера равна  $2 \cdot 10^5$  м/с. Характерные значения межступенчатых интервалов составляют 16 и 25 мкс по данным измерений электрического поля во Флориде и Аризоне соответственно и 16 мкс (усредненное значение) по данным оптических

наблюдений. Длины ступеней, полученные на основе наблюдений с использованием фотоэлектрических и оптических камер, лежат в диапазоне 1.3–20 м. Минимальные значения амплитуды импульса тока ступени, а также величина заряда, внедряемого в новообразованную головку отрицательного лидера, составляют 2–8 кА и 1–4 мКл соответственно. Погонный заряд чехла канала отрицательного лидера может быть оценен как 1 мКл/м. Проводимость канала молниевое лидера составляет типичное для дугового разряда значение  $10^4$  См/м. Благодаря ступенчатому способу распространения, включающему в себя такие интенсивные процессы, как слияние двух лидеров противоположной полярности, ступени отрицательных лидеров являются мощным источником излучения в диапазоне частот от 30 до 300 МГц. Кроме того, во время слияния стримерных зон пространственного положительного и основного отрицательного лидеров генерируются тормозное рентгеновское излучение с энергией порядка нескольких сотен кэВ. Оно свойственно также описанным ниже стреловидным и стреловидно-ступенчатым лидерам.

Как уже было отмечено, типичная амплитуда тока первого компонента возвратного удара отрицательного лидера составляет порядка 30 кА. За ним обычно следует несколько менее интенсивных последующих компонентов (subsequent components), разделенных паузами непрерывного тока. Последний переносит основную часть заземляемого разрядом заряда (всего за вспышку разряжается около 20 Кл облачного заряда).

### Положительные лидеры

Поговорим теперь о **положительных лидерах молнии (positive lightning leaders)**. Наблюдения показывают, что стримерная зона лабораторного поло-

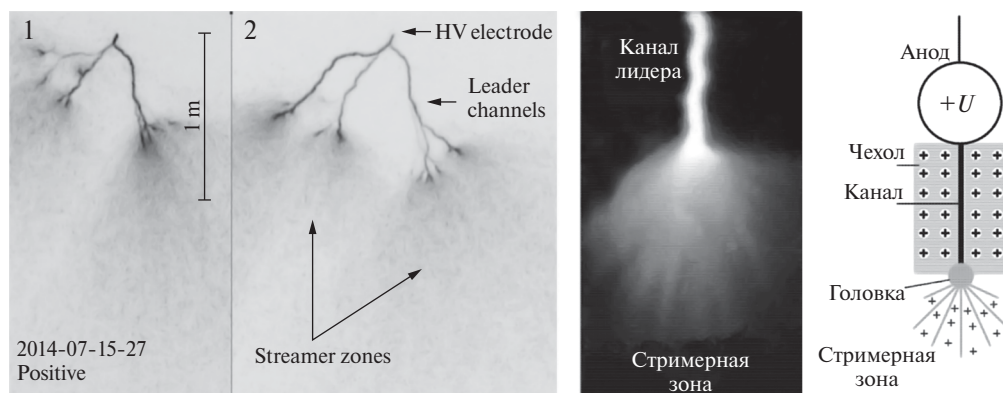


Рис. 13. Примеры лабораторных положительных лидеров, растущих с высоковольтных электродов. Рис. 8 из работы: Kostinskiy A. Yu. Abrupt elongation (stepping) of negative and positive leaders culminating in an intense corona streamer burst: Observations in long sparks and implications for lightning / Kostinskiy A. Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. V. 123, No. 10. P. 5360–5375 (слева) и рис. 2.2 из монографии: Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Базелян Э.М., Райзер Ю.П. М.: Физматлит, 2001. 320 с., показывающий структуру положительного лидера (справа).

жительного лидера состоит только из положительных стримеров. Примеры лабораторных положительных лидеров показаны на рис. 13. Распространение лабораторных положительных лидеров происходит непрерывно, по крайней мере когда абсолютная влажность воздуха ниже  $10 \text{ г/м}^3$  и когда длительность фронта импульса напряжения не превышает 1 мс. В случае молниевых разрядов наблюдались как непрерывные, так и ступенчатые положительные лидеры. При этом ступенчатый характер распространения всегда был характерен только для незначительного периода развития лидера и никогда не являлся основным. Отсутствие ступеней делает положительный лидер «невидимым» для работающей на очень высоких и ультравысоких частотах аппаратуры, используемой для картирования молниевых разрядов (кроме случаев описанных ниже обратных лидеров).

Исследуемые в лабораториях искровые разряды положительной полярности в силу относительной простоты своей структуры изучены гораздо лучше,

чем отрицательные. Типичный лабораторный положительный лидер с током в районе 1 А, проводимостью порядка 1 См/м и температурой канала, составляющей около 5 кК, оканчивается головкой, из которой растет стримерная зона лидера. В ней одновременно присутствует, по данным электронно-оптических разверток и осциллограмм тока, не менее  $10^3$ – $10^4$ , а по данным сравнения тока одиночного стримера с полным током, стекающим с электрода, более ста тысяч положительных стримеров.

Будучи холодным слабоионизованным плазменным образованием, одиночный стример не способен обеспечить формирование горячего хорошо проводящего лидерного канала. Но поскольку типичная частота, с которой выступающая в роли анода головка лидера испускает стримеры, составляет порядка  $10^9$  Гц, непрерывно выходящие из нее стримерные пучки в совокупности приводят к значительному прогреву небольшого участка воздуха, непосредственно примыкающего к лидерной головке. Этот участок с характерным масшта-

бом порядка сантиметра, которому суждено стать новой головкой лидера, называется **стемом (stem)**. В рамках стема формирование лидерного канала происходит в результате ионизационно-перегревной неустойчивости, начальным звеном которой является прогрев воздуха. Строго говоря, можно считать, что и положительный лидер прирастает сантиметровыми сегментами (ступенями), однако малая длина последних не позволяет отличить его распространение от непрерывного (по крайней мере, оптически).

Выделим ряд черт, отличающих положительные разряды типа «облако-земля» от отрицательных. Во-первых, главная стадия положительных разрядов обычно ограничивается единственным возвратным ударом, в то время как наличие последующих компонент является редкостью. Во-вторых, как амплитуда (единицы – десятки килоампер), так и длительность (десятки – сотни миллисекунд) непрерывного тока, следующего за импульсом возвратного удара, в случае положительных лидеров значительно больше, чем у отрицательных. Это обстоятельство отвечает за

огромные величины заземляемого положительным лидером разряда (сотни кулон), что делает их чрезвычайно опасными с точки зрения молниезащиты.

Стоит отметить, что средние значения амплитуд токов возвратного удара положительных лидеров (35 кА) лишь ненамного превышают таковые для отрицательных (30 кА). Однако среди разрядов с пиковыми токами порядка нескольких сотен ампер положительных гораздо больше, чем отрицательных. Измерения показывают, что положительным разрядам на землю обычно предшествует длительная (100–200 мс) внутриоблачная разрядная активность, а траектории самих каналов положительных лидеров обычно включают протяженные (иногда с длинами порядка десятков километров) горизонтальные участки. Скорости распространения положительных лидеров лежат в широком диапазоне (от десятков до тысяч км/с) и могут быть как много больше, так и много меньше типичной скорости развития отрицательных лидеров (порядка  $2 \cdot 10^5$  м/с). Отметим также, что, поскольку поверхность Земли заряжена отрицательно,

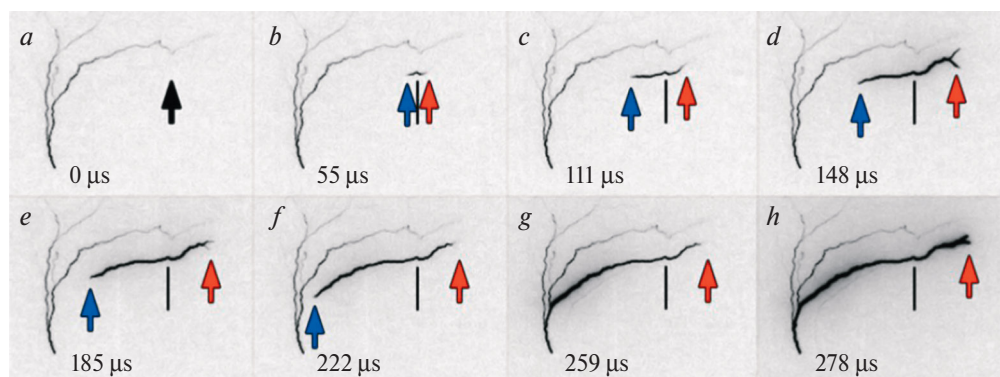


Рис. 14. Последовательность кадров высокоскоростной съемки, визуализирующей развитие обратного лидера молнии. Черная, красная и синяя стрелки указывают на точку инициации обратного лидера и его положительный и отрицательный концы соответственно. Рис. 6 из работы: Warner T.A. Characteristics of upward leaders from tall towers / Warner T.A., Saba M.M.F., Orville R.E. // 22th International Lightning Detection Conference, Vaisala, Boulder, Colo. 2012

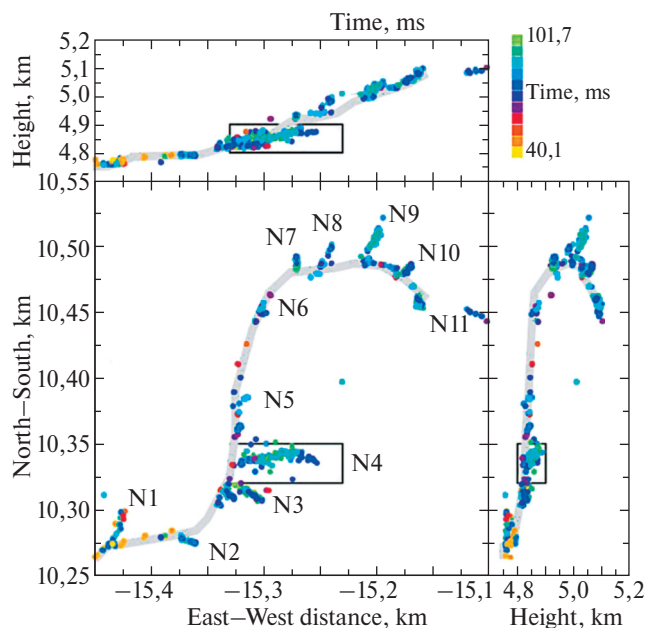


Рис. 15. Изображение канала положительного лидера (выделен серым), окружённого растущими из него излоподобными разрядами (N1–N11) отрицательной полярности в LMA формате. Цветом закодированы времена возникновения источников излучения. Фрагмент Рис. 2 из работы Hare B.M. Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches / Hare B.M., Scholten O., Dwyer J. et al. // Nature. 2019. V. 568. P. 360–363

положительные разряды на землю, как и токи утечки (хорошей погоды), вносят вклад в разрядку глобальной электрической цепи.

Хотя положительные лидеры молнии распространяются преимущественно непрерывно, для них характерны резкие высокоэнергичные процессы другого рода, называемые **обратными лидерами (recoil leaders)**. Принято считать, что биполярные обратные лидеры возникают на концах затухших ветвей основного положительного и прорастают к нему своими отрицательными концами, как показано на рис. 14. При этом отрицатель-

ный конец обратного лидера имеет более выгодные условия развития, поскольку распространяется не в невозмущенном, а в прогретом воздухе, приведенное электрическое поле в котором тем больше, чем меньше успел остыть остановившийся в развитии канал основного положительного лидера. Встреча обратного лидера с положительным сопровождается мощной волной светимости и импульсом непрерывного тока (M-компонент). Иногда отрицательный конец обратного лидера не доходит до

канала основного положительного, сворачивает с траектории затухшего канала и начинает распространяться в невозмущенном воздухе как типичный ступенчатый отрицательный лидер. Причины появления обратных лидеров во многом остаются непонятными. Изучение обратных лидеров осложнено тем, что оно подразумевает учет не только электродинамической стороны вопроса, но и термодинамики затухших (обесточенных) каналов.

Недавно с помощью радиотелескопа LOFAR (LOw Frequency ARray), работающего в диапазоне частот 30–80 МГц, способного разрешать события с шагом по времени, равным 1 мкс, и имеющего пространственное разрешение, составляющее 2 м, был открыт новый вид разрядной активности, сопровождающей развитие положительного лидера, названный **иглоподобными разрядами (needle-like structures)**<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Hare B.M. Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches / Hare B.M., Scholten O., Dwyer J. et al. // Nature. 2019. V. 568. P. 360–363.



Было обнаружено, что, в отличие от отрицательных лидеров, источниками излучения которых являются образующиеся на фронте их распространения ступени, в случае положительного лидера источники излучения возникали вдоль его канала, визуализируя его структуру (рис. 15). Иглоподобные разряды распространяются по направлению от канала положительного лидера на длину 30–100 м со средней скоростью  $3 \cdot 10^5$  м/с и имеют отрицательную полярность (уносят отрицательный заряд от канала основного лидера). При этом ширина каждого иглоподобного разряда не превышает 5 м. Возникновение данных «игл» вдоль канала положительного лидера регистрируется каждые 3–7 мс.

Авторы данной работы объясняют возникновение иглоподобных разрядов следующим образом. В результате ионизации на переднем фронте роста положительного лидера (внутри его стримерной зоны) происходит разделение заряда, причем отрицательный заряд движется от головной части канала к его хвосту. По мере разрастания головной части положительного лидера количество разделяемого ей заряда увеличивается. На каком-то этапе транспортной способности тянущегося за головкой лидера канала становится недостаточно для того, чтобы своевременно отводить отрицательный заряд к головке отрицательной части единого билидерного древа. Накапливающийся в канале отрицательный заряд локально меняет полярность продольного поля внутри него, что приводит к разрыву токовой связи между положительным и отрицательным лидерами. Изолированный канал положительного лидера (на данном этапе он в какой-то степени становится биполярным) поляризуется, в результате чего поле вокруг его задней части меняет направление. В конце концов это приводит к иници-

ации иглоподобных разрядов отрицательной полярности, уносящих избыточный отрицательный заряд от задней части канала положительного лидера, выступающей в роли катода.

Учитывая все вышеописанные особенности развития положительных лидеров молнии, сложно не согласиться с утверждением<sup>4</sup>, что положительные молниевые лидеры изучены даже хуже, чем отрицательные.

В «чистом» виде положительный и отрицательный лидеры существуют только в лабораторных условиях, где их источниками служат высоковольтные электроды соответствующей полярности (кроме экспериментов с искусственно заряженным аэрозольным облаком, в которых формировались биполярные лидеры). Любой более или менее развитый молниевый лидер всегда содержит как положительную, так и отрицательную части, то есть распространяется двунаправленным образом. При этом ток в рамках разрядного древа всюду течет в одном направлении (от головки отрицательной части к головке положительной). Существуют наблюдения, говорящие о том, что связь между положительной и отрицательной частями биполярного лидера может периодически исчезать и вновь восстанавливаться.

### Биполярные молнии

Говоря о положительных и отрицательных лидерах молнии, стоит также упомянуть о так называемых **биполярных молниях (bipolar lightnings)**. К биполярным относят такие молнии, токи которых во время главной стадии меняют полярность в рамках одной и той же вспышки. Для инициированных

<sup>4</sup> Rakov V.A. A review of positive and bipolar lightning discharges / Rakov V.A. // Bulletin of the American Meteorological Society. 2003. V. 84, No. 6. P. 767–776.

с высоких объектов или триггерных молний может также наблюдаться смена полярности тока на стадии, предшествующей развитию возвратного удара (в англоязычной литературе его принято называть *initial continuous current*). Смена полярности тока может происходить более одного раза. При этом между положительным и отрицательным импульсами тока может существовать бестоковая пауза. Возможной причиной существования биполярных молний может быть последовательное заземление внутриоблачного заряда, собираемого различными ветвями разрядного древа, находящимися в противоположно заряженных областях. Хотя биполярные молнии принято относить к разряду «экзотики», их распространенность может быть не меньшей, чем у положительных.

### М-компонент

Как отмечалось выше, за первым импульсом тока возвратного удара могут следовать последующие компоненты. В зависимости от свойств оставшегося после первого компонента канала это могут быть либо **М-компоненты (M-components)** – названы так по первой букве фамилии Д.Ж. Малана, который впервые их исследовал), либо **стреловидные лидеры (dart leaders)**. М-компоненты представляют собой широкие практически симметричные импульсы тока со временем нарастания (от 10 до 90%) порядка 0.3–0.5 мс (на два порядка больше, чем для импульса тока возвратного удара), амплитудой в районе 100–200 А (на два порядка меньше, чем для импульса тока возвратного удара), иногда достигающей нескольких килоампер, и переносимым зарядом 0.1–0.2 Кл (на порядок меньше по сравнению с последующим компонентом возвратного удара).

М-компонент сопровождается усилением яркости свечения канала и всегда наблюдается на фоне непрерывного тока межкомпонентной паузы порядка 100 А. Они могут следовать один за другим, причем первый из них практически всегда возникает не позже, чем через 4 мс после возвратного удара. Чем больше задержка между возвратным ударом и первым в последовательности М-компонентом, тем шире импульсы самих М-компонентов и тем больше паузы между ними. М-компоненты также могут наблюдаться во время начальной стадии (до начала возвратного удара) развития восходящего лидера и триггерной молнии.

### Стреловидный лидер

Если заземленный канал оказывается обесточенным, но все еще сохраняет повышенную по отношению к окружающему воздуху температуру, вместо М-компонента возникает нисходящий **стреловидный лидер**, имеющий отрицательную полярность (верхняя часть канала нисходящего стреловидного лидера показана на четвертом фрагменте рис. 8).

Головная часть стреловидного лидера имеет масштаб порядка нескольких десятков метров, характеризуется ярким свечением и распространяется со скоростью порядка  $(1-2) \cdot 10^7$  м/с (положительно коррелирует с амплитудой последующего импульса тока возвратного удара), что совпадает с предельной скоростью роста высоковольтных стримеров. Авторы монографии Э.М. Базелян и Ю.П. Райзер отмечают, что столь высокая, нетипичная для «обычного» лидера, скорость распространения и отсутствие наблюдаемой стримерной зоны указывают на скорее стримерную природу фронтальной части стреловидного лидера (ее, собственно, и называют наконечником стре-

лы – *dart*). Поскольку он распространяется в рамках предварительно прогретого канала, остающийся за фронтом волны ионизации плазменный след теряет проводимость гораздо медленнее, чем в непрогретом воздухе. Поэтому отпадает необходимость аккумуляции энергии джоулевым выделением множества обреченных на вымирание стримеров с целью создания стема, зародыша лидерного канала, и стандартный процесс стримерно-лидерного перехода не реализуется. Поскольку из-за пониженной плотности воздуха условия распространения вдоль канала, фактически играющего роль непроводящего волновода, являются более выгодными (см. ионизационно-перегревную неустойчивость), заполняющая пространство перед головкой лидера стримерная зона не формируется, а весь связанный с развитием разряда дополнительный прогрев концентрируется в малом объеме предшествующего канала.

Здесь речь идет только о головной части стреловидного лидера, в то время как остающийся после нее канал обладает дугowymi значениями температуры и проводимости и является «классическим» лидером. Кроме того, как и в случае с последним, развивающаяся с поверхности канала стреловидного лидера радиальная корона создает вокруг него чехол заряда (за исключением того, что источниками чехла пространственного заряда вокруг «классического» лидера выступают как радиальная стримерная корона, так и растущая из головки лидера стримерная зона).

Обычно стреловидные лидеры распространяются непрерывно. Однако более трети последующих возвратных ударов инициируются **стреловидно-ступенчатыми лидерами (dart-stepped leaders)**, которые, как это следует из названия, распространяются ступенчатым образом. Для стрело-

видно-ступенчатых лидеров характерные значения скорости распространения, длины ступени и паузы между ними составляют  $(1-2) \cdot 10^6$  м/с, 10 м и 5–10 мкс соответственно. Ток ступени и переносимый ступенью заряд составляют порядка нескольких килоампер и нескольких милликулон соответственно. Чем больше паузы между ступенями, тем меньше скорость распространения лидера.

В дополнение к стреловидно-ступенчатым выделяют также так называемые **хаотичные лидеры (chaotic leaders)**, которые характеризуются нерегулярными последовательностями ступеней, возникающими незадолго до возвратного удара. Хаотичным лидерам свойственны большие скорости распространения и амплитуды токов возвратных ударов. Обычно они возникают, если промежутки времени, прошедшего после предыдущего возвратного удара, был не слишком долгим.

Далее, более трети стреловидных лидеров по каким-то причинам сходят с траектории предшествующего канала и продолжают распространяться в непрогретом воздухе как ступенчатые отрицательные лидеры, заземляясь в новом месте. Типичные времена развития стреловидных лидеров, не сходящих с траектории заземленного канала и создающих новую точку заземления, составляют 2 и 15 мс соответственно. Типичный ток стреловидного лидера лежит в диапазоне от сотен до нескольких тысяч ампер. Амплитуда связанного с его заземлением импульса тока возвратного удара обычно лежит в диапазоне 10–15 кА, а величина переносимого к земле заряда составляет порядка 1 Кл. Развитие стреловидных лидеров, как и ступенчатых отрицательных, сопровождается интенсивным излучением в ОВЧ-диапазоне.

Источниками как М-компонентов, так и стреловидных лидеров, вероятно,

выступают замыкания междуоблачных лидеров на заземленный канал. В случае, когда несколько каналов сходятся в общую заземленную секцию (это типично для разветвленных восходящих лидеров), развитие последующих компонентов в рамках каждого из этих каналов происходит независимо. Еще раз отметим, что возможность реализации того или иного сценария развития последующего компонента зависит от свойств сохранившегося после предыдущего компонента заземленного канала. Если он сохраняет достаточно высокую для поддержания тока на уровне 100 А проводимость, развивается диффузионная волна М-компонента. Если к моменту появления последующего компонента канал оказывается обесточенным, вследствие падения его проводимости становится возможным развитие вол-

ны ионизации, характеризующейся наличием заряженной головки и узким фронтом сильного поля с амплитудой порядка 1–2 МВ/м, в котором происходит интенсивная ударная ионизация сохранившегося прогретого воздуха. В этом случае образуется стреловидный лидер.

## РАЗРЯДЫ В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Молнии – лишь самые привычные нам проявления ГЭЦ. Токи, идущие в ионосферу от заряженных облаков, сами по себе обычно не порождают заметного свечения, но иногда, под влиянием особенно интенсивных молний, эта часть ГЭЦ ненадолго визуализируется. В нижних слоях атмосферы индуцированные молниями квазистационарные и радиационные поля не производят

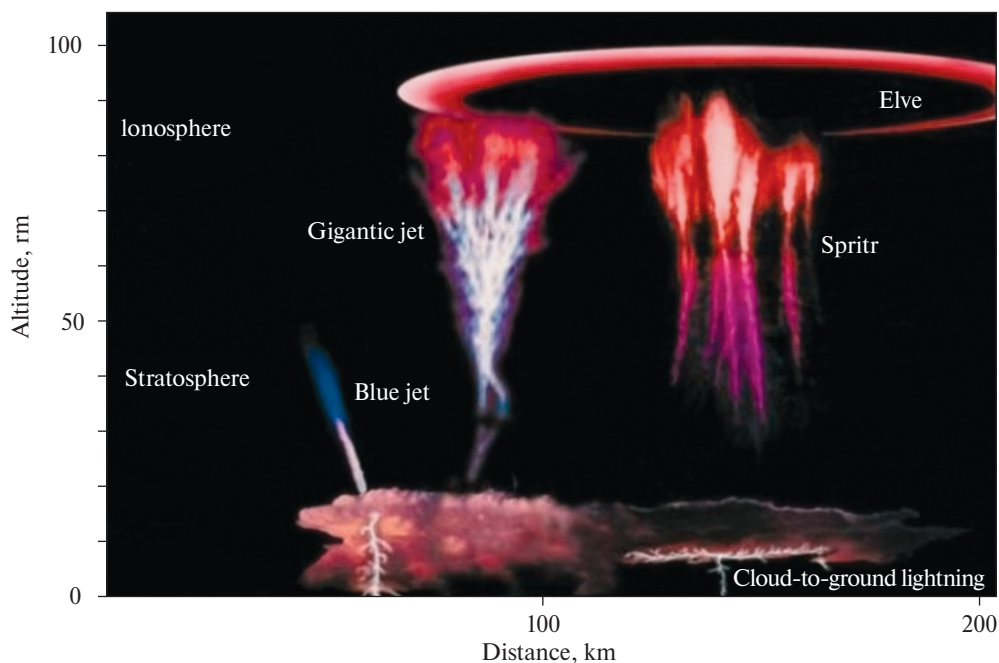


Рис. 16. Схематичное представление различных типов атмосферных разрядов. Рис. 1(a) из работы: Siingh D. Discharges in the stratosphere and mesosphere / Siingh D., Singh R.P., Singh A.K. et al. // Space Science Reviews. 2012. V. 169. P. 73–121

никаких эффектов. Но на высотах около 70 км длина свободного пробега, а с ней и энергия, которую электроны получают от поля, увеличивается настолько, что электроны при столкновениях начинают возбуждать и даже ионизировать атомы и молекулы, запуская лавинообразный процесс. Волны ионизации распространяются как вверх, так и вниз, нижней частью проникая во все более плотные слои атмосферы, а нарастание электронной лавины приводит к появлению высотного разряда. Среди данных разрядов, первые упоминания о которых датируются концом XIX в., принято выделять голубые джеты, голубые стартеры, красные спрайты и эльфы.

### Голубые стартеры

Самыми мелкомасштабными разрядами в средней атмосфере являются **голубые стартеры (blue starters)**. Стартуя с высоты примерно 18 км, они распространяются вверх на несколько (до 10) км со скоростью в диапазоне от  $10^4$  до  $10^5$  м/с. Геометрия голубых стартеров напоминает коническую, а занимаемый ими объем достигает единиц кубических километров. Прямой связи между разрядами типа «облако-земля» и появлением голубых стартеров не выявлено, но географически районы их появления совпадают. Замечено, что в течение нескольких секунд после возникновения голубого стартера частота появления разрядов типа «облако-земля» существенно снижается.

### Голубые джеты

Наиболее близкой к голубым стартерам формой разряда являются **голубые джеты (blue jets)**. Возникают они также на верхней границе грозового облака (примерно 20 км над уровнем моря) и, распространяясь вверх с типичной скоростью  $10^5$  м/с, достигают высот порядка 30–40 км. Форма



Рис. 17. Пример фотографии голубого джета. Фрагмент рис. 14.3 из монографии: Rakov V.A. *Lightning: Physics and effects* / Rakov V.A., Uman M.A. New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p.

голубых джетов близка к конической (с вершиной внизу) с типичным углом раствора в районе  $15^\circ$ . Его более яркая нижняя часть, напоминающая стебель (stem), оканчивается сверху более разреженными слабосветящимися ветвями (рис. 17). Возникновение голубых джетов связывают с отрицательными разрядами типа «облако-земля». Экспериментальные данные говорят о том, что приблизительно за секунду до появления голубого джета в том же районе частота контакта отрицательных лидеров с землей возрастает, а после его инициации, наоборот, убывает примерно на пару секунд. Экзотической формой голубых джетов являются гигантские джеты. Их название связано с тем, что, распространяясь вверх, они достигают 90-километровой высоты, совершая «беспосадочный перелет» из тропосферы в ионосферу<sup>5</sup>. Наблю-

<sup>5</sup> Фотографии гигантского джета могут быть найдены в статье Костинского А. Молниеносная жизнь эльфов и гномов, «Вокруг света», № 12, 2009 <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/6809/> и статье Su H.T. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere / Su H.T., Hsu R.R., Chen A.B. et al. // Nature. 2003. V. 423. P. 974–976.

даются они чрезвычайно редко, всего их регистрировали не более 12 раз. Существуют гигантские джеты доли секунды, что, в принципе, позволяет заметить их даже невооруженным глазом.

### Красные спрайты

Из всех разрядов средней и верхней атмосферы наиболее изучены **красные спрайты (red sprites)**. Они возникают над большими грозовыми системами и особенно хорошо видны на высотах от 40 до 90 км. Характерный красный цвет они имеют благодаря соответствующим оптическим переходам в спектре азота. Верхняя часть спрайта светится однородно, а вот ниже 70 км разряд как будто сплетается из каналов толщиной в сотни метров.

Структурно красные спрайты могут быть разделены на несколько различных типов. Некоторые имеют форму, визуально напоминающую морковь (в англоязычной литературе они называются *carrot sprites*), и состоят из ярко светящейся красной головной части, расположенной на высоте от 65 до 75 км, из которой вплоть до 95-километровой высоты простираются вверх тонкие нитеподобные образования, напоминающие волосы. Вниз от основного тела «морковного» спрайта до высот 20–40 км опускаются голубоватые каналы-отростки.

«Ангелоподобные» спрайты (*angel sprites*) отличаются от «морковных» тем, что вместо волос сверху от их основной части, на высоте примерно 80 км, расположено красновато-фиолетовое диффузное свечение, называемое «гало спрайта» (*sprite halo*). Вертикальная протяженность и диаметр гало спрайта могут составлять несколько и десятки километров соответственно. Поскольку гало всегда возникает непосредственно над вспышками молний, в то время как спрайты могут быть смещены вбок от них, до конца не

понятно, связаны ли между собой эти формы разрядов, и, если связаны, то как именно. К тому же они могут появляться независимо друг от друга.

Существуют также «колоноподобные» спрайты (*columniform sprites*) с типичными значениями длины и диаметра порядка 10 и 1 км соответственно, не имеющие явно выраженных нитевидных отростков, и прочие их формы, как более простые, так и более сложные, выходящие за рамки систематической классификации.

Спрайты практически всегда возникают не поодиночке, а в виде кластера, в рамках которого индивидуальные разряды могут принимать различные формы (рис. 18). Такие кластеры имеют масштабы порядка нескольких десятков километров и могут занимать объем, превышающий  $10^4$  км<sup>3</sup>. Светимость спрайтов довольно низка, однако в ночное время их, хотя и с трудом, но все же можно увидеть невооруженным глазом (в оптическом диапазоне спрайты остаются заметными от нескольких до нескольких десятков миллисекунд).

Появление спрайтов принято связывать с интенсивными положительными разрядами типа «облако-земля», хотя в небольшом проценте случаев они могут быть вызваны и разрядами отрицательной полярности, заземляющими особенно много заряда. Отмечено, что для инициирующих спрайты положительных разрядов на землю амплитуды токов возвратных ударов примерно вдвое больше, чем для разрядов, не «поджигающих» спрайты. Таким образом, появление спрайтов связано с быстрой (за время около 1 мс) утилизацией порядка сотни кулон положительного заряда (соответствующие изменения зарядового момента составляют тысячи Кл·км), причем иногда кроме положительного разряда на землю определенную роль в данном процессе может играть следующий за ним внутриоблачный разряд. Считается, что

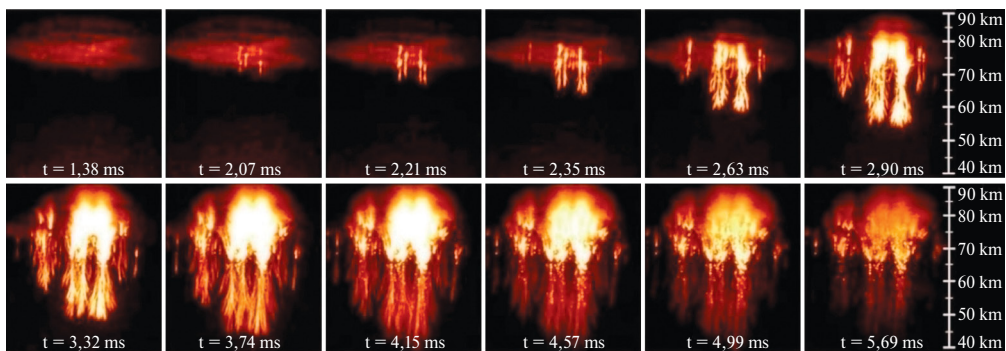


Рис. 18. Динамика развития кластера красных спрайтов. Рис. 7.2 из обзора: Dwyer J.R. *The physics of lightning* / Dwyer J.R., Uman M.A. // *Physics Reports*. 2014. V. 534, No. 4. P. 147–241

к зарождению спрайтов приводят квазистационарные вариации электрического поля, вызванные уходом столь большого заряда из верхней части грозового облака. В качестве альтернативного источника спрайтов также могут выступать радиационные поля, излучаемые горизонтально ориентированными каналами облачных разрядов. Независимо от источника возмущения электрического поля, в роли спускового механизма, запускающего разряд, могут выступать лавины либо низкоэнергичных атмосферных электронов, либо высокоэнергичных убегающих, порождаемых частицами космических лучей. Существуют и более экзотические гипотезы, связывающие возникновение спрайтов с ионизацией атмосферы во время падения метеоров.

История открытия красных спрайтов поучительна и полна драматизма<sup>6</sup>. Первые сообщения о наблюдении огромных разрядов над облаками появились еще задолго до того, как они были признаны официальной наукой. Писал о них и нобелевский лауреат

<sup>6</sup> Подробности могут быть найдены в статье Костинского А. «Молниеносная жизнь эльфов и гномов» // «Вокруг света», 2009 и интервью «Ежедневные салюты в честь Уинклера» // «Троицкий вариант – Наука», 2019, №271

Чарлз Томсон Вильсон, однако даже его мнение не было воспринято всерьез. Пробить стену отрицания удалось только отставному профессору и ветерану NASA Джону Рандольфу Уинклеру, который заснял спрайты на высокочувствительную камеру в ночь с 5 на 6 июля 1989 г. Ученый решил подойти к делу серьезно и повторил свои наблюдения во время урагана Хьюго, накрывшего Миннесоту в ночь с 22 на 23 сентября, получив большое количество новых снимков. Интересно, что, хотя оставшаяся у Уинклера высокоскоростная камера изначально была неисправна, ему удалось заразить своим энтузиазмом декана физического факультета Университета Миннесоты, который согласился выделить на ее ремонт 7000 долларов. Свои наблюдения Уинклер отнес в NASA, где от него, из уважения к бывшему коллеге, не отмахнулись. Каково же было удивление сотрудников данной организации, когда они обнаружили множество подобных снимков, сделанных во время полета космических челноков! Результаты своего открытия Уинклер зафиксировал в статьях, опубликованных в журналах *Science* и *Geophysical Research Letters*. Опасаясь за безопасность космических кораблей, NASA развернула масштабные исследования высотных

разрядов. Примечательно, что, как это часто бывает, несмотря на то, что с Уинклером не раз советовались, ни в один проект его так и не включили.

## Эльфы

На высотах порядка 90 км длина свободного пробега электронов становится столь большой, что проникающие сюда поля излучения, порождаемые мощными импульсными разрядами в тропосфере (преимущественно возвратными ударами), и квазистационарные вариации электрического поля, вызванные существенными изменениями структуры облачных зарядов в результате развития различных форм молниевой активности, способны приводить к их существенному ускорению. Сталкиваясь с молекулами воздуха, электроны переводят их в возбужденное состояние, которое высвечивается в оптическом диапазоне. Возникающее при этом красно-фиолетовое свечение связывают с развитием сильно отличной от описанных ранее формы разряда, называемой **эльфом (elf)**. Эльфы имеют вид радиальной волны с центром на высоте примерно 95 км, вертикальная протяженность и горизонтальный масштаб которой составляют порядка 10–20 и 200–700 км соответственно. Время жизни эльфов редко превышает миллисекунду, что делает их, пожалуй, самыми короткоживущими из разрядов верхней и средней атмосферы.

---

## ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ МНОГООБРАЗИЯ ФОРМ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

---

Как видим, несмотря на то, что единственной причиной существования любого электрического пробоя является необходимость понижения порождающей его разности потенциалов,

конкретные формы проявлений атмосферных разрядов чрезвычайно разнообразны. Примечательно, что в основе всего этого многообразия лежат всего лишь несколько довольно простых физических принципов.

Первый связан с падением концентрации воздуха при увеличении высоты над уровнем моря, что обеспечивает переход от искровой (дуговой) формы разряда к диффузной. К первой относятся разряды в нижней атмосфере, ко второй – в средней и верхней атмосфере.

Суть данного перехода заключается в двух законах подобия. Первый из них может быть выражен как  $p \cdot d = \text{const}$  и означает увеличение линейных масштабов разряда  $d$  пропорционально падению давления воздуха  $p$ . Поскольку с увеличением высоты над уровнем моря давление воздуха спадает довольно быстро (в тропосфере давление уменьшается в  $e$  раз при подъеме на каждые 8.4 км), разряды в средней и верхней атмосфере имеют колоссальные размеры.

Второй закон подобия,  $E/N = \text{const}$ , связан с тем, что константы реакций многих плазмохимических процессов, основными из которых являются ударная ионизация и прилипание электронов к нейтралам, являются функциями приведенного электрического поля, т. е. отношения напряженности поля  $E$  к концентрации нейтралов  $N$ . Это означает, что уменьшение плотности воздуха автоматически приводит к снижению пробойного поля. Именно данное обстоятельство вкупе с быстрым ростом проводимости атмосферы при увеличении высоты над уровнем моря приводит к тому, что «высотные» разряды, в отличие от обычных молний, могут быть инициированы относительно слабыми радиационными и квазистатическими полями, источниками которых служит «жизнедеятельность» молниевых разрядов. В слу-



чае обратных и стреловидных лидеров благоприятным фактором оказывается уменьшение плотности воздуха в результате сохранения остаточного прогрева канала (на временах развития пробоя можно пользоваться изобарным приближением).

Чтобы лучше понять, насколько важную роль в развитии разряда играет падение плотности воздуха, опишем кратко фундаментальный для искрового разряда процесс **ионизационно-перегревной неустойчивости (thermal-ionization instability)**. Предположим, в какой-то точке занятого разрядом объема произошло падение плотности воздуха  $N$ , то есть выросло приведенное поле  $E/N$ . Поскольку частота ионизации является резко растущей функцией приведенного поля, в данном месте локально повысится концентрация электронов и линейно зависящая от нее проводимость. В свою очередь, рост проводимости приведет к росту плотности тока и, следовательно, к увеличению объемной плотности мощности энерговыделения, что еще больше увеличит локальный прогрев газа. Таким образом, данная неустойчивость приводит к стягиванию тока в узкий хорошо прогретый канал. Именно данная неустойчивость отвечает за формирование стема в процессе роста положительного лидера. Из этих рассуждений становится ясно, почему обратные и стреловидные лидеры повторяют траектории обесточенных ветвей положительного лидера и заземленного канала соответственно.

Второй основополагающий принцип – это хорошо известная специалистам в области газового разряда асимметрия развития положительных и отрицательных стримеров. Говоря о ней, стоит отметить, что базовым элементом, лежащим в основе любого сколь-нибудь крупного атмосферного

разряда, являются стримеры, представляющие собой волны ионизации. Структурно каждый стример состоит из сильно локализованной заряженной головки, на фронте которой происходит ионизация воздуха, и слабо проводящего ионного следа. Данные лабораторных исследований искрового разряда указывают на то, что поля в стримерных зонах положительных и отрицательных лидеров различаются вдвое и составляют примерно 5 и 10 кВ · см<sup>-1</sup> · атм<sup>-1</sup> соответственно. Разумно предположить, что поля распространения положительных и отрицательных стримеров близки к полям в объеме стримерных зон положительных и отрицательных лидеров соответственно, то есть также отличаются примерно в два раза. Данный вывод в целом подтверждается теоретическими исследованиями выделения и рассеяния энергии на фронте растущего стримера, где, в частности, было показано, что их энергетически устойчивое распространение происходит при полях 5 и 7.5 кВ · см<sup>-1</sup> · атм<sup>-1</sup> соответственно<sup>7</sup>.

Асимметрия полярностей связана с различным направлением движения электронов по отношению к стримерным головкам разной полярности. Головка положительного стримера притягивает произведенные в ее окрестности электроны, поэтому ионизация происходит в области более сильного поля. Головка отрицательного стримера отталкивает электроны, заставляя их двигаться в область слабого поля, вследствие чего ионизация происходит в менее выгодных условиях. Эффект асимметрии может быть также связан с влиянием электрического

<sup>7</sup> Gallimberti I. Fundamental processes in long air gap discharges / Gallimberti I., Bacchiega G., Bondiou-Clergerie A., Lalande P. // Comptes Rendus Physique. 2002. V. 3, No. 10. P. 1335–1359.

поля малоподвижных положительных ионов, находящихся в хвосте электронной лавины, которое либо усиливает (в случае положительных стримеров), либо ослабляет (в случае отрицательных стримеров) поле на фронте роста стримера.

Наличие данной асимметрии отвечает за то, что отрицательные лидеры, в отличие от (преимущественно) непрерывно растущих положительных, всегда распространяются ступенчатым образом. Очень может быть, что эта же асимметрия является причиной возникновения обратных лидеров и иглоподобных разрядов, которые наблюдаются только у положительных лидеров, и отвечает за явные различия динамики главной стадии положительных и отрицательных разрядов типа «облака-земля».

Данная проблема, однако, все еще требует теоретического осмысления. Необходимо построить непротиворечивую теорию, объясняющую многочисленные наблюдаемые различия в развитии положительных и отрицательных лидеров, исходя из особенностей процессов, происходящих в их стримерных зонах.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В настоящее время молния уже не вызывает благоговейного ужаса. Столетия скрупулезных исследований лучших умов человечества, среди которых можно выделить Франклина, Ломоносова, Вильсона и многих других – вкуче с огромным числом натуральных измерений не прошли даром. Благодаря трудам поколений физиков люди значительно продвинулись в осознании природы данного явления и научились защищаться от него. В настоящее время развитие технической базы лабораторных и натуральных экспериментальных

наблюдений вкуче с колоссальным увеличением производительности вычислительной техники привело к всплеску публикационной активности и значительно ускорило развитие учения об атмосферном электричестве.

Несмотря на то, что многое уже было сделано, в области анализа явлений атмосферного электричества остается множество нерешенных проблем (наиболее важные из них обсуждаются в обзоре Двайера и Юмана 2014 г., см. литературу). Не понятно даже то, как происходит процесс зарождения молниевых разрядов в грозовом облаке и каким образом распространяются различные типы молниевых разрядов. Множество вопросов вызывают процессы стримерно-лидерного перехода, генерации молниевыми разрядами гамма-квантов, формирования ступеней положительных и отрицательных лидеров. Очень мало известно о разрядах в средней и верхней атмосфере. Недостаточно проработаны методы молниезащиты, о чем говорят периодически случающиеся вызванные молниевой активностью технические сбои. Огромное количество собранного экспериментального материала нуждается в глубоком теоретическом осмыслении.

Таким образом, физика молниевых разрядов по-прежнему представляет огромный интерес с точки зрения как прикладной, так и фундаментальной науки. Колоссальная сложность процессов, сопровождающих явления атмосферного электричества, бросает вызов научному сообществу и делает их многообещающим объектом будущих исследований.

*Авторы выражают благодарность многим поколениям ученых, благородный труд которых сделал написание данной статьи возможным. Работа поддержана грантом РФФИ (соглашение 19-17-00183).*

## Литература

1. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and effects. – New York: Cambridge University Press, 2003. – 687 p.
2. Dwyer J.R., Uman M.A. The physics of lightning // Physics Reports. 2014. V. 534, No. 4. P. 147–241.
3. Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A. Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125, No. 7. P. e2019JD031360.
4. Rakov V.A. A review of positive and bipolar lightning discharges / Rakov V.A. // Bulletin of the American Meteorological Society. 2003. V. 84, No. 6. P. 767–776.
5. Kostinskiy A. Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al. Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8165–8171.
6. Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M. Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds // NPJ Climate and Atmospheric Science. 2019. V. 2, No. 46.
7. Hare B.M., Scholten O., Dwyer J. et al. Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches // Nature. 2019. V. 568. P. 360–363.
8. Singh D., Singh R.P., Singh A.K. et al. Discharges in the stratosphere and mesosphere // Space Science Reviews. 2012. V. 169. P. 73–121.

## Глоссарий основных терминов по теме «Атмосферное электричество»

Глоссарий составлен авторами на базе сведений из ключевых монографий по физике газового разряда, перечисленных в статье.

**Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) (global electric circuit).** Токовый контур, ограниченный отрицательно заряженной поверхностью земли снизу и положительно заряженной ионосферой сверху (на высоте примерно 100 км). За разрядку ГЭЦ отвечают токи ясной погоды. В роли ЭДС, поддерживающей разность потенциалов (300–400 кВ) между обкладками глобального сферического «конденсатора», выступают грозовые облака и порождаемые ими атмосферные разряды.

**Молния (lightning).** Многокилометровый электрический разряд в атмосфере, снижающий разность потенциалов между (1) грозovým облаком и землей (разряд типа облако-земля), или (2) между различными областями, находящимися в рамках одного и того же облака (внутриоблачный разряд), или (3) между областями, расположенными внутри различных облаков (междуоблачный разряд), или (4) между облаком и окружающим его воздухом (разряд типа облако-воздух). Канал молнии имеет положительную и отрицательную части и развивается двунаправленным образом.

**Разряд типа «облако-земля» (cloud-to-ground discharge).** Последовательность процессов, включающая в себя (1) развитие нисходящего лидера молнии вплоть до момента заземления и (2) главную стадию, состоящую из одного или нескольких импульсов тока возвратного удара, разделенных паузами непрерывного тока. Данный тип разряда способствует заземлению облачного (преимущественно отрицательного) заряда.

**Триггерная молния (rocket-triggered lightning).** Молниевый разряд, искусственно инициируемый посредством запуска в грозовое облако ракеты, заземленной с помощью тянущегося за ней провода.

**Дуговой разряд (arc discharge).** Газовый разряд, подразумевающий наличие горячего (с температурой выше 6 кК) хорошо проводящего плазменного канала, высокая проводимость которого поддерживается в основном за счет термических эффектов, в то время как продольное электрическое поле канала является относительно слабым.

### **Искровой разряд (spark discharge).**

Газовый разряд, развивающийся либо в виде только стримеров (например, если область сильного поля мала и лидерный канал не успевает сформироваться), либо в виде лидерного канала, оканчивающегося стримерной зоной. Канал молнии с температурой, проводимостью и продольным полем порядка 10 кСм/м и 10 кВ/м соответственно относится к дуговому разряду.

### **Диффузный разряд (diffuse discharge).**

Газовый разряд в виде размытого светящегося столба, не имеющего четко выраженных границ. Формируется при низких давлениях. Термин «диффузный» часто употребляется как противопоставление термину «контрагированный» (имеющий четко выраженную структуру канала).

### **Стримерный разряд (streamer discharge).**

Тип искрового разряда, существующего в форме волны ионизации. Структурно стример состоит из сильно локализованной в пространстве заряженной головки и холодного слабоионизованного хвоста, проводимость которого быстро спадает во времени сперва из-за прилипания электронов к нейтралам, а затем из-за ион-ионной рекомбинации. Полярность стримера определяется знаком заряда его головки. Положительные стримеры распространяются по направлению электрического поля, отрицательные – против него. Характерные поля роста для отрицательных стримеров примерно вдвое больше, чем для положительных. Из-за меньших полей инициации во всех природных процессах положительные стримеры всегда возникают первыми. Стример может расти, пока внешнее поле превышает порог его роста и затухает после того, как его головка покидает зону сильного поля.

### **Лидерный разряд (leader discharge).**

Тип искрового разряда, состоящего из горячего (примерно 5 кК и 10 кК для лабораторного и молниевых лидеров) хорошо проводящего (с проводимостью порядка 10 кСм/м) лидерного канала, оканчивающегося лидерной головкой (leader tip), испускающей многочисленные стримеры, формирующие стримерную зону лидера. Полярность лидера определяется знаком заряда на его головке. Лидерный канал окружен чехлом пространственного

заряда (leader channel sheath), источниками которого являются отмирающие стримеры его стримерной зоны и возникающая с боковой поверхности канала радиальная корона. Знак заряда чехла совпадает с полярностью лидера (хотя локально он может меняться). Наличие чехла заряда увеличивает эффективную емкость лидера, способствуя росту энерговыделения внутри канала и его прогреву. Заряд чехла также оказывает стабилизирующий эффект, сдерживая ионизационное расширение лидерного канала, что, опять же, способствует его более эффективному прогреву. Высокая проводимость лидера поддерживается за счет высокой температуры его канала. Из-за высокой проводимости и поляризации канала лидер способен расти в гораздо более слабом внешнем поле, чем стримеры, являясь самоподдерживающейся формой разряда. В воздухе положительные лидеры обычно распространяются непрерывным (по крайней мере оптически) образом, в то время как отрицательные всегда распространяются ступенчато.

**Стримерная зона (стримерная корона) (streamer zone).** Совокупность огромного числа стримеров, возникающих с головки лидера, выступающей в роли высоковольтного электрода. Частота появления стримеров с головки даже лабораторного лидера составляет порядка  $10^9 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому в стримерной зоне лидера одновременно находятся миллионы одновременно развивающихся стримеров. Стримерная зона положительного лидера состоит только из положительных стримеров и является более или менее стабильной. Отрицательная корона возникает в виде мощной стримерной вспышки, наведенной формированием ступени отрицательного лидера, и содержит как отрицательные, так и положительные стримеры.

**Стем (stem).** Область пространства перед головкой положительного лидера, прогреваемая испускаемыми из нее многочисленными стримерами, проходящими через одну и ту же область пространства. Внутри стема развивается процесс ионизационно-перегревной неустойчивости, приводящий к появлению нового участка лидерного канала.

### **Пространственный стем (space stem).**

Вытянутое вдоль поля плазменное образование объемом порядка  $1 \text{ см}^3$  (в лабораторных условиях), возникающее на периферии вспышки короны отрицательных стримеров. Пространственные стемы испускают положительные и отрицательные стримеры. Часть из них за счет поляризации преобразуется в двунаправленные каналы пространственных лидеров, положительная часть которых растет по направлению к головке основного отрицательного лидера и, вступая с ним в контакт, порождает новую ступень отрицательного лидера (скачкообразное удлинение его канала на длину пространственного лидера).

**Ионизационно-перегревная неустойчивость (thermal-ionization instability).** Циклическая последовательность процессов, усиливаемых петлей положительной обратной связи, приводящая к стягиванию токового столба в узкий горячий канал. Является универсальным механизмом развития искрового разряда и, предположительно, важнейшим звеном стримерно-лидерного перехода.

**Необычные плазменные образования (unusual plasma formations).** Горячие плазменные образования, формирующиеся в рамках объемной иерархической сети взаимодействующих друг с другом положительных и отрицательных стримеров. Обладают параметрами плазмы, сходными с таковыми для лабораторных лидеров, но сильно отличаются от них морфологически. Впервые описаны в работе Костинского и коллег<sup>1</sup> и, по мнению авторов, являются переходным звеном от стримеров к лидеру в процессе инициации молнии в грозовом облаке.

**Возвратный удар (главная стадия молнии) (return stroke).** Волна ионизации, распространяющаяся вверх по каналу молнии со скоростью, сопоставимой со скоростью света, стартующая

сразу после контакта нисходящего лидера с землей, или заземленным объектом, или восходящим лидером противоположной полярности. Во время главной стадии происходит разрядка чехла лидерного канала, сопровождающаяся интенсивным импульсом тока. Происходящий при этом дополнительный прогрев канала приводит к появлению ударной звуковой волны, называемой громом. Импульсы тока главной стадии сопровождаются не только первым, но и все последующие компоненты молнии типа облако-земля.

**Биполярная молния (bipolar lightning).** Разряд типа «облако-земля», для которого наблюдается смена полярности стекающего в землю тока.

**Последующий компонент (subsequent component).** Лидерный процесс, развивающийся в рамках главной стадии молнии и связанный с повторным заземлением облачного заряда, возникающим после первого импульса тока возвратного удара. Может проявляться как М-компонент или стреловидный лидер.

**М-компонент (M-component).** Последующий компонент, представляющий собой почти симметричный плавный импульс тока (горб на осциллограмме) и светимости канала, распространяющийся вниз по заземленному каналу молнии. Для возникновения М-компонента необходимо наличие в канале непрерывного тока с амплитудой не менее 100 А. Фактически М-компонент представляет собой диффузную волну тока с амплитудой и длительностью порядка 100-200 А и 1 мс соответственно.

**Стреловидный лидер (dart leader).** Последующий компонент. Представляет собой отрицательный лидер, распространяющийся к земле по оставшемуся после предыдущих компонентов обессточенному каналу, сохранившему повышенную температуру. Может распространяться непрерывно со скоростью порядка  $10^7$  м/с или ступенчато с на порядок меньшей скоростью. В случае, когда стреловидный лидер сворачивает с траектории предшествующего канала, он начинает распространяться как ступенчатый отрицательный лидер (со скоростью порядка  $10^5$  м/с), создавая новую точку заземления.

<sup>1</sup> Kostinskiy A.Yu. Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds / Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A. et al. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8165–8171

**Обратный лидер (recoil leader).** Биполярный разряд, зарождающийся на периферии обесточенной ветви положительного лидера. Отрицательный конец обратного лидера распространяется по направлению к каналу основного положительного вдоль его ранее загустевшей, но сохранившей повышенную температуру ветви. Положительный конец обратного лидера растет в противоположную сторону и, как правило, менее развит. Встреча каналов обратного и основного положительного лидеров сопровождается яркой вспышкой света. Как и в случае стреловидного лидера, возможна ситуация, когда отрицательный конец обратного лидера сходит с траектории обесточенной ветви и продолжает распространяться как ступенчатый отрицательный лидер.

**Иглоподобные разряды (needle-like structures).** Тонкие (не шире 5 м) прямые разряды, распространяющиеся по направлению от канала положительного лидера на длину 30–100 м со средней скоростью  $3 \cdot 10^5$  м/с, обнаруженные в недавней работе<sup>2</sup>. По-видимому, иглоподобные разряды являются отрицательными лидерами, отводящими отрицательный заряд от задней части канала основного положительного лидера и являющиеся следствием нарушения гальванической связи между положительной и отрицательной частями единого разрядного дерева молнии.

**Высотные разряды (lightning effects in the middle and upper atmosphere).** Электрические разряды в верхней и средней атмосфере (от 20 до 100 км), инициация которых связана с молниевой активностью в нижней атмосфере. Среди высотных разрядов выделяют голубые стартеры, голубые джеты, красные спрайты и эльфы.

**Голубые стартеры (blue starters).** Самые мелкомасштабные из высотных разрядов, стартующие с верхней части грозового облака и распространяющиеся вверх

на длину не более 10 км. Морфологически выглядит как перевернутые конусы голубого цвета с углом раскрыва порядка  $15^\circ$ . Причины появления голубых стартеров не до конца понятны.

**Голубые джеты (blue jets).** Форма высотного разряда, имеющая схожие с голубыми стартерами характеристики, но распространяющаяся вверх на большие высоты, до 30–40 км над уровнем моря. Нижняя часть разряда имеет форму стебля, верхняя часть состоит из разреженных слабо светящихся ветвей. Особой формой голубых джетов являются гигантские джеты, достигающие ионосферных высот.

**Красные спрайты (red sprites).** Сами объемная и легко наблюдаемая форма высотных разрядов. Развивается в диапазоне высот от 20–40 км снизу до примерно 95 км сверху, распространяясь от точки инициации двунаправленным образом. Возникают над большими грозовыми системами и имеют красно-фиолетовый цвет. Нижняя часть разряда более структурирована, верхняя – более диффузна. Красные спрайты отличаются множеством возможных форм и обычно возникают не поодиночке, а в виде кластеров. Появление красных спрайтов обычно сравнивают с интенсивными разрядами типа «облако-земля» положительной полярности. В ночное время красные спрайты могут быть замечены невооруженным глазом.

**Эльфы (elves).** Самые короткоживущие из всех высотных разрядов. Представляют собой светящиеся красно-фиолетовые кольца с центром на высоте примерно 95 км, имеющие вертикальную протяженность и горизонтальный масштаб порядка 10–20 и 200–700 км соответственно. Меньше чем за миллисекунду свечение, возникнув в центре, расширяется до 200–700 км и угасает. Обычно появление эльфов связывают с интенсивными положительными разрядами типа «облако-земля». На стадии возвратного удара канал молнии становится «передающей антенной», от которой со скоростью света стартует мощная сферическая электромагнитная волна очень низкой частоты, возбуждающая красно-фиолетовое свечение молекул азота.

<sup>2</sup> Hare B.M. Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches / Hare B.M., Scholten O., Dwyer J. et al. // Nature. 2019. V. 568. P. 360–363.

С новыми книгами  
Издательства “Наука”  
вы можете ознакомиться на сайте  
**naukabooks.ru**



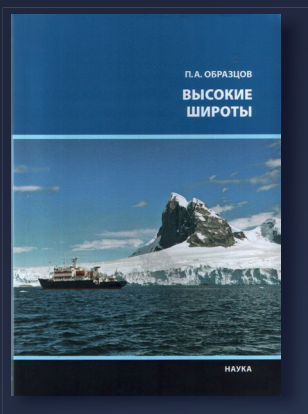
Капанадзе А.Л.

**Опытным путем:  
Эксперименты, изменившие мир.**

М.: Наука, 2019. - 319 с.

В книге рассказывается об основных вехах в развитии экспериментальных методов в самых разных областях наук о природе, человеке и обществе – физике, химии, астрономии, биологии, физиологии, медицине, археологии, социологии, психологии, экономике. Охвачен период с античных времен до наших дней. Читатель узнает о знаменитых и малоизвестных опытах, оказавших огромное влияние на формирование наших представлений о мире и о нас самих. Большое внимание автор уделяет не только истории приборов и технологий, но и истории идей. Затрагиваются проблемы отличия классического эксперимента от наблюдения (когда опыт «ставит» сама природа), преемственности технических инноваций, влияния общественного климата на работу экспериментатора, роли случайности в этой работе.

*Для широкого круга читателей.*



Образцов П.А.

## **Высокие широты.**

М.: Наука, 2018. – 192 с. – (Научно-популярная литература)

Книга повествует об открытии и освоении Арктики и Антарктики, этих двух полюсов холода и мужества, об отважных героях, благодаря которым человечество узнало о природе, животном мире самых северных и самых южных земель, а также о том, какая непростая и вместе с тем увлекательная жизнь идет сегодня в этих суровых, таинственных и манящих краях.

*Для широкого круга читателей.*



Верещагин Г.В., Аксенов А.Г.

## **Релятивистская кинетическая теория с приложениями в астрофизике и космологии.**

М.: Наука, 2018. – 471 с.

Релятивистская кинетика широко применяется в астрофизике и космологии. В последние годы интерес к этой теории вырос, поскольку появилась возможность ставить эксперименты при таких условиях, где релятивистские эффекты становятся существенными. Настоящая монография состоит из трех частей. В первой части представлены основные идеи и концепции, уравнения и методы теории, включая вывод кинетических уравнений из релятивистской цепочки Боголюбова, а также соотношение кинетического и гидродинамического описаний. Вторая часть – это введение в вычислительную физику, причем особое внимание уделяется численному интегрированию уравнений Больцмана и смежным вопросам, а также многокомпонентной гидродинамике. В третьей части дан обзор приложений, который охватывает вопросы ковариантной теории отклика, термализации плазмы, комптонизации в статических и динамических средах, кинетики самогравитирующих систем, образования структуры в космологии и излучения нейтрино при гравитационном коллапсе.

*Для студентов старших курсов университетов, аспирантов и исследователей, специализирующихся в области теоретической физики, астрофизики и космологии.*

# naukabooks.ru

Реклама



# ЯПОНСКИЕ СТРАХ И УЖАС: MARTIAN MOONS EXPLORATION

РЫЖКОВ Евгений Александрович

DOI: 10.7868/50044394821020043

**В сентябре 2020 года Японское агентство аэрокосмических исследований JAXA порадовало мировую общественность, сообщив, что в настоящее время оно разрабатывает и готовит к запуску в 2024 финансовом году исследовательский комплекс для изучения марсианских лун — Фобоса и Деймоса.**

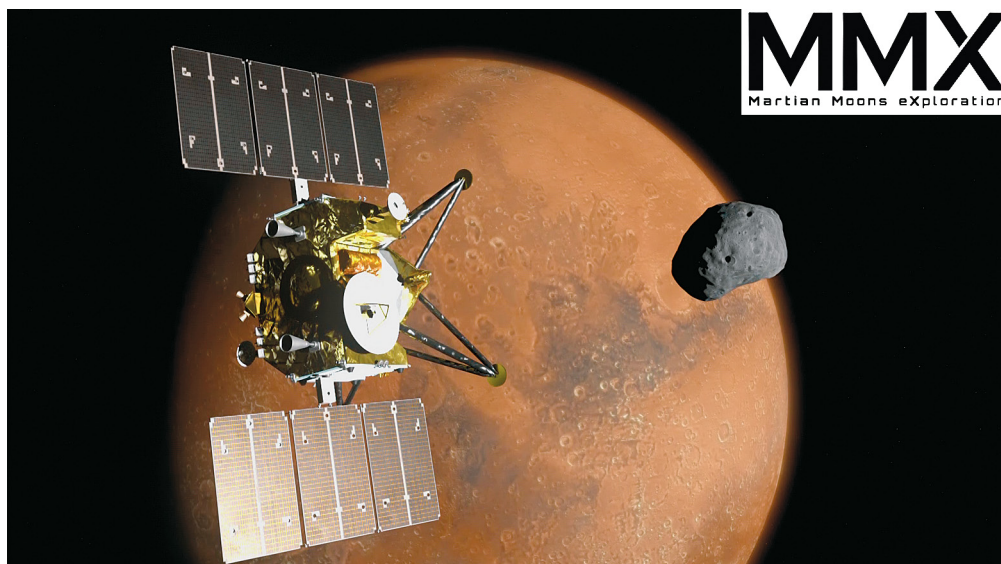
Первую попытку «подружиться» с Марсом японцы предприняли 22 года назад, когда в июле 1998 г. в космос отправился восемнадцатый научный спутник Японии – станция *Nozomi* (のぞみ, русская транскрипция – «Нодзоми», в переводе «Надежда», ранее этот проект назывался PLANET-B). Это поместило Японию на третью строчку в списке стран (после СССР и США), отправлявших космические аппараты к Марсу. К сожалению,

вследствие инженерной неопытности «Нодзоми» пролетела мимо Красной планеты. Невесть какой результат, скажут одни, однако это была их первая робкая попытка достижения Марса.

Следующий марсианский проект получил название MMX (Martian Moons eXploration). В 2024–2025 гг. перспективная ракета Н-III запустит аппарат в направлении марсианских лун Фобос (греч. «страх») и Деймос («ужас») для их исследования и доставки

---

Аппарат MMX на фоне Марса и Фобоса в художественном представлении и логотип проекта. Изображение JAXA/NHK





Руководитель проекта ММХ  
Кавакацу Ясухиру

образцов вещества с поверхности одной из них.

Сама мысль осуществить подобный проект возникла еще в начале 1980-х годов в Институте космических исследований Академии наук СССР. Тогда стало понятно, что изучение малых тел Солнечной системы, к которым относятся астероиды, кометы, спутники Марса, – ключ к разгадке эволюции Солнечной системы и, может быть, даже к проблеме происхождения и распространения жизни в ней. История исследований Фобоса в нашей стране очень драматична и много раз описывалась, в том числе в журнале «Земля и Вселенная»<sup>1</sup>. Коротко скажем, что первый космический аппарат к Фобосу был запущен в нашей стране в 1988 г. Было получено много важной научной информации о Фобосе и Марсе. Но главная цель той экспедиции – сблизиться с поверхностью Фобоса на несколько десятков метров и сбросить малый посадочный аппарат на его поверхность, так и не была достигнута. Вторая попытка исследовать Фобос закончи-

лась неудачей при запуске российского космического аппарата «Фобос-Грунт» в 2011 г.

Возможность экспедиции с целью изучения и доставки образцов вещества с Фобоса рассматривали несколько космических агентств. Было предложено несколько проектов в США и Европе, которые, однако, не были приняты. И Япония не осталась в стороне, тем более что на счету японцев появились экспедиции *Hayabusa* (MUSES-C) и *Hayabusa2* по изучению астероидов (6 декабря капсула с веществом астероида Рюгу, собранным в миссии *Hayabusa2*, приземлилась в Австралии).

9 июня 2015 года на втором заседании подкомиссии по космической науке и исследованиям (в составе секции космической промышленности и научно-технической базы Комитета по космической политике) Институт космических и астронавтических наук (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS, г. Сагамихара) представил план доставки грунта со спутника Марса. Тогда были предложены разные варианты: оснастить и перелетный, и возвращаемый модули химическим ракетным двигателем или электроракетной двигательной установкой либо перелетный модуль – химическим, а возвращаемый – электрическим двигателем.

Позже ISAS приравнял эту миссию по приоритету к другим значимым проектам, например, по исследованию околоземного астероида (3200) Фаэтон и других аполлонов *DESTINY+* (Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage Phaethon fLyby and dUst Science), готовящийся к запуску в 2024–2025 гг. Затем появилось и нынешнее название – Martian Moons eXploration (MMX).

19 февраля 2020 г. проект официально перешел на стадию эскизного проектирования, а 21 февраля стало известно, что головным разработчиком

<sup>1</sup> См. ЗиВ № 4, 2011; № 3, № 6, 1988

и производителем систем аппарата выбрана компания Mitsubishi Electric Corporation. Руководителем проекта стал Кавакацу Ясухио (川勝 康弘).

Кандидат технических наук Кавакацу работает в ISAS в отделении разработки систем для автоматических космических миссий. Руководит проектной лабораторией дальнего космоса (Deep Space Mission Design Laboratory, также известной как Kawakatsu Lab), специализирующейся на астродинамике и орбитальной механике. В основном команда лаборатории занимается разработкой траекторий полета межпланетных аппаратов.

Сам господин Кавакацу принимал участие в таких японских проектах, как окололунный орбитальный аппарат *Kaguya* (SELENE), инфракрасная космическая обсерватория *Akari* (ASTRO-F), действующая венерианская орбитальная миссия *Akatsuki* (PLANET-C) и *Hayabusa2* (завершена 6 декабря 2020 г.). В настоящее время его лаборатория сконцентрирована на будущих миссиях – кроме MMX можно назвать уже упоминавшуюся выше DESTINY+ и кубсаты *OMOTENASHI* и *EQUULEUS*, заявленные в качестве попутной нагрузки первого беспилотного полета перспективного американского корабля *Orion* (миссия *Artemis 1*), который запланирован на ноябрь 2021 г.

11 сентября 2020 года глава Японского агентства аэрокосмических исследований JAXA Ямакава Хироси (山川 宏) сообщил, что исследовательский комплекс для изучения Фобоса и Деймоса готовится к запуску в 2024 финансовом году (до 1 апреля 2025 г.).

---

## РАБОТА У ФОБОСА И ДЕЙМОСА

---

После старта неполный год уйдет на межпланетное путешествие до Красной планеты – если запуск пройдет

по плану, то есть в сентябре 2024 г., то MMX достигнет геосферы Марса в августе 2025 г., а потом выйдет на арестационарную орбиту.

Впоследствии орбита аппарата будет скорректирована, и он окажется на квазисинхронной орбите у Фобоса. На этой орбите будут выполнены дистанционные исследования марсианского спутника. Кроме того, эта орбита станет опорной при выполнении нескольких (одной или двух) посадок на спутник, в результате чего будут получены образцы с его поверхности. Исследования этих образцов в наземной лаборатории помогут лучше понять происхождение марсианских спутников и процессы образования воды в протосолнечной системе.

При первой посадке будет собрано свыше 10 г местных пород. Для этого прибегнут к помощи механизма, сочетающего функции руки-манипулятора и пневматического пробоотборника. Согласно современным данным, полученным в ходе наблюдения в видимом и инфракрасном диапазонах, вещество на поверхности обоих спутников неоднородно, поэтому точное место посадки будет определено скорее всего после первых наблюдений с орбиты около спутников.

После забора грунта с Фобоса MMX пролетит около Деймоса, изучив его вблизи с орбиты. Возвращение на Землю планируется в сентябре 2029 г., то есть продолжительность всей экспедиции составит около 5 лет.

Орбита Фобоса находится к Марсу ближе, чем орбита Деймоса, значит, сила притяжения планеты там больше, и если системам космического аппарата MMX по каким-либо причинам придется экономить энергию, тогда он просто «переключится» на менее энергозатратное изучение Деймоса. Однако Фобос с позиции ученых – объект несказанно более «драгоценный», так как из-за

близости к Марсу на нем периодически должен оседать материал с планеты, после того как в последнюю врезаются метеориты.

Цели проекта:

- прояснить загадку происхождения и эволюции марсианских спутников, что поможет понять, как образовались планеты Солнечной системы;
- пролить свет на механизм развития и эволюции ареосферы Марса;
- развивать технологии космических исследований.

В последнем пункте можно проследить аналогию с новыми научно-техническими задачами, которые решались в ходе миссий *Hayabusa* и *Hayabusa2* по доставке астероидного грунта. Япония, стараясь по всем направлениям догнать ведущие космические державы, параллельно реализует в прямом смысле уникальные задачи, которые до сих пор не решал никто, и тем самым овладевает новейшими технологиями и опытом реализации непростых миссий. А это, в свою очередь, повышает ее международный статус и в качестве партнера по международному сотрудничеству.

Это, кстати, хорошо видно на примере *Artemis* – новой лунной программы США, в которой японцы наверняка примут участие, и не самое последнее. Сейчас идут переговоры об использовании нового грузового корабля HTV-X и перспективной тяжелой ракеты-носителя Н-III для выполнения логистических задач (в дополнение к космическому грузовику Илона Маска Dragon XL) проекта окололунной станции Gateway. Также японцы предоставят источники питания для Жилого мини-модуля МНМ (также HALO), а Международный жилой модуль I-HAB обеспечат системами, регулирующими выработку кислорода и воды. Не фантастикой является даже совместная высадка на Луну американцев и японцев во второй половине 2020-х годов.

---

## СОСТАВ КОМПЛЕКСА И ПЕРВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

---

Конструктивно японский комплекс для изучения Фобоса и Деймоса будет состоять из перелетного модуля для достижения окрестностей Марса, а также посадочно-исследовательского и возвратного модулей. Проектируемая масса ММХ – около 4 т.

Планируемая к размещению бортовая аппаратура:

- телескоп для подробного обзора особенностей рельефа спутника со степенью пространственного разрешения изображений до 40 см TENGGO (TElescopic Nadir imager for GeOmOrphology);
- камера для фотографирования рельефа и вещества поверхности в видимом свете OROCHI (Optical Radiometer composed of CHromatic Imagers), предназначенная для поиска гидратных минералов и органических веществ на всем Фобосе и в особенности вокруг зоны предполагаемой «высадки»;
- лидар для получения данных о форме и альбедо Фобоса LIDAR;
- спектрометр ближнего ИК-диапазона MIRS (MMX InfraRed Spectrometer) для подробного изучения минералогического состава Фобоса. Будет «зондировать» спутник на длине волны 0.9–3.6 микрон. Разрабатывается совместно с французским Национальным центром космических исследований CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) и французскими же исследовательскими центрами LESIA-Paris (головная организация), LAB, LATMOS, LAM и IRAP-OMP;
- гамма-нейтронный спектрометр MEGANE (в переводе с японского «очки») для изучения составляющих Фобоса элементов (NASA). Разработчиком выступает Университет Джонса Хопкинса (Балтимор, штат Мэриленд);
- прибор для анализа пылевых частиц вокруг Фобоса CMDM (Circum-Martian

Dust Monitor), который будет регистрировать частицы размером более 10 микрон;

- масс-спектрометр для изучения ионов в экзосфере Фобоса MSA (Mass Spectrum Analyzer);

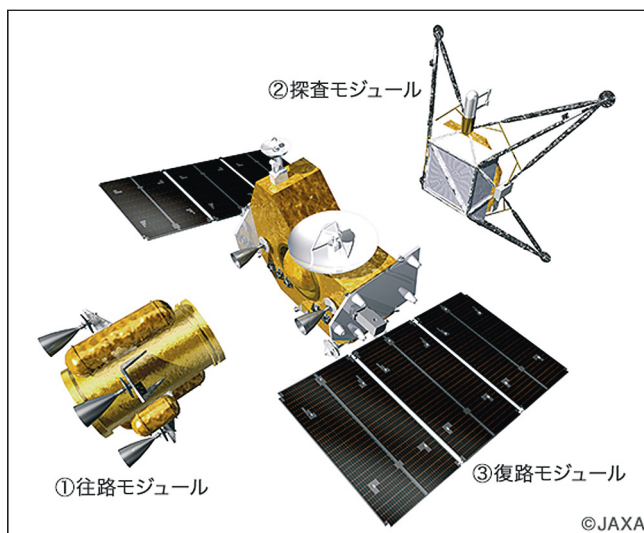
- спектрометр ближнего инфракрасного диапазона MacrOmega (Macroscopique Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, le Glaces et l'Activité или же Macroscopic Observatory for Mineralogy, Water, Ice and Activity);

- франко-германский сбрасываемый малый зонд совместной разработки CNES и Германского аэрокосмического центра DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt);

- грунтозаборные устройства для взятия образцов: оснащенный дистанционным манипулятором C-Sampler (Coring Sampler) – с глубины и P-Sampler (Pneumatic Sampler) разработки американской компании Honeybee Robotics – с поверхности марсианской луны;

- камера для фотосъемки с высоким разрешением 4K/8K совместной разработки JAXA и телерадиовещательной компании NHK.

Кстати, франко-германский зонд будет размером с микроволновку, его заявленная масса в настоящее время составляет около 25 кг. Его сбросят на Фобос до отделения японского посадочного аппарата с целью анализа поверхностного реголита и его состава. Это оптимизирует программу работ, повысит надежность миссии и позволит получить какие-либо научные результаты на основе данных с поверхности Фобоса до прибытия на Землю капсулы с образцами. В отличие от аналогичного аппарата MASCOT, созданного тоже в Германии



Состав комплекса. 1 – перелетный модуль, 2 – исследовательский модуль, 3 – возвратный модуль.  
Изображение Mitsubishi Electric

для миссии *Hayabusa2*, который провел на поверхности астероида Рюгу не более суток, его «потомок» сможет двигаться и исследовать поверхность Фобоса порядка 100 дней. Для этого потребуются установить солнечные батареи.

Примечательно, что технология «точной посадки» аппарата на поверхность Фобоса будет прежде отработана в 2022 г. на спутнике-демонстраторе SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) при исследовании Луны. И после этого опыт, полученный благодаря «лунному снайперу», специалисты JAXA «подгонят» под задачу посадки и взлета на Фобосе.

6 октября 2020 г. команда миссии оповестила интересующихся ходом развития проекта людей, что в самом разгаре серия испытаний по сбросу такого малого зонда на «поверхность Фобоса». Для этих целей задействован немецкий тестовый стенд LAMA (Landing and Mobility Test Facility) в Бремене. Компьютерное моделирование тоже используется.



Октябрьские тесты на стенде LAMA, Германия. Фотография DLR

После окончания тестов в 2021 г. специалисты обновят модель зонда и приступят к воплощению его в «железо».

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ФЛОТИЛИЯ

Несколько стран уже изъявили желание принять участие в миссии. 10 апреля 2017 г. JAXA подписало с французским Национальным центром космических исследований (CNES) исполнительную договоренность (implementing arrangement). CNES предложило изготовить спектрометр ближнего ИК-диапазона MacrOmega, помочь с вопросами динамики межпланетных полетов и участвовать в разработке малого сбрасываемого зонда (совместно с DLR).

22 сентября 2017 г. JAXA заключило с NASA исполнительную договоренность по MMX и другим проектам. Стороны заявили, что на Фобосе могли осесть частицы с Марса, и в случае успеха космиче-

ский аппарат впервые в истории доставит образцы не только с марсианских спутников, но и с самой Красной планеты! Также стало ясно, что рассматривается вопрос предоставления NASA гамма-нейтронного спектрометра MEGANE.

3 октября 2018 г. франко-германский зонд MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout) был сброшен с аппарата *Hayabusa2* для анализа поверхности Югу. Сразу же после этого главы JAXA, CNES и DLR сделали совместное заявление прямо «с полей» 69-го Международного астронавтического конгресса (International Astronautical Congress), проходившего в немецком Бремене. Из него следует, что MASCOT получит «наследника» в виде малогабаритного зонда для проекта MMX.

18 июня 2019 г. исполнительная договоренность была подписана с DLR. Уточнялось, что Германия предоставит свои испытательные стенды для проведения тестов по сбрасыванию аппарата

с высоты. А 26 июня 2019 г. подписана еще одна договоренность со CNES по ММХ и по предоставлению со стороны JAXA образцов, полученных в миссии *Hayabusa2* для анализа. В документе также подробно описаны предыдущие договоренности: изготовление Францией спектрометра MascOmega и пр.

И в «нестандартном» 2020 г. работа по налаживанию взаимодействия по проекту не останавливалась. 22 октября глава CNES Жан-Ив Ле Галь (Jean-Yves Le Gall) и глава JAXA Ямакава Хироси провели видеоконференцию, где обсудили сотрудничество в области космоса. Стороны подчеркнули хорошую динамику развития проекта ММХ.

Кстати говоря, JAXA и несколько японских университетов проделали работу по оценке возможного загрязнения спутников Марса земными микроорганизмами при выполнении проекта. Результаты исследования передали в международный Комитет по

космическим исследованиям COSPAR (Committee on Space Research). В марте 2019 г. во время заседания совета директоров названный Комитет одобрил предлагаемые JAXA меры в качестве рекомендуемых к исполнению в рамках политики планетарной защиты в соответствии с мировыми стандартами. Их опубликовали в двух частях в электронной версии европейского научного журнала *Life Sciences in Space Research* 10 и 17 июля 2019 г.

*Источники информации по миссии ММХ:*

<http://mmx.isas.jaxa.jp/en/>  
[https://twitter.com/mmx\\_jaxa\\_en](https://twitter.com/mmx_jaxa_en)

*По материалам JAXA, Mitsubishi Electric, CNES, DLR, Wikipedia*  
*Первоначально опубликовано на сайте*

*«Новости космонавтики»*

<https://novosti-kosmonavtiki.ru/>

*Автор благодарит за помощь в подготовке статьи А.В. Захарова (ИКИ РАН)*

Таков проект японцев. Но очень верим, что и российский проект «Фобос-Грунт 2» (известный также как «Бумеранг»), являющийся составной частью программы «Экспедиция-М» Федеральной космической программы, будет реализован уже существующим поколением российских ученых и инженеров.

Российский проект, кроме взятия образцов с Фобоса и доставки их на Землю для детальных лабораторных исследований, предусматривает обширную программу изучения системы Марса, включающую изучение второго спутника Марса – Деймоса и плазменно-пылевого окружения планеты. Плазменное окружение Марса формируется при взаимодействии потоков солнечного ветра с верхней атмосферой Марса. Кроме того, значительное влияние на свойства околомарсианской среды могут оказывать заряженные микрочастицы реголитов Фобоса и Деймоса, выбиваемые при постоянной бомбардировке их поверхностей микрометеоритами.

Кроме научного значения, подготовка и реализация проекта «Бумеранг», станет базовой технологической отработкой подготовки и выполнения значительно более амбициозного проекта по доставке образцов вещества с поверхности Марса, который является вторым этапом комплексной программы ФКП «Экспедиция-М».

К сожалению, сейчас (конец 2020 г.) проект «Бумеранг» находится в «замороженном» состоянии. Его реализация рассматривается в астрономические окна 2028–2035 гг.

Обсерватории, институты

## КРЫМСКАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ: НА ПЕРЕКРЕСТКЕ ЭПОХ И ВРЕМЕН

КОЗЛОВА Олеся Владимировна,

кандидат физико-математических наук

Крымская астрофизическая обсерватория РАН

DOI: 10.7868/50044394821020055

*Когда промышленник и большой любитель астрономии Н.С. Мальцев в 1908 г. решил построить обсерваторию на горе Кошка в Симеизе и подарить ее Пулковской астрономической обсерватории, он еще не знал, насколько она перерастет себя, став вначале базой Симеизского отделения Пулково, а потом — положит начало Крымской астрофизической обсерватории (КрАО).*

**Н**овую обсерваторию начнут возводить на ничем не примечательной безымянной горе, высотой чуть более 500 метров, сразу после окончания Великой Отечественной войны в 1946 г.

Прежде чем выбрать место для ее строительства, несколько лет работала экспедиция, изучавшая астроклимат в самых разных уголках Крыма. Нельзя сказать, что количество ясных ночей

---

Общий вид на поселок Научный с вершины горы Сель-Бухра. Фото Д. Баклановой





в году здесь было значительно больше, чем в других местах, но построили обсерваторию именно здесь. Может быть, потому, что это место было в относительной доступности в плане дорог, а может – потому, что его можно назвать, как сейчас любят говорить, «местом силы». Ведь это только кажется, что обсерватория построена в тупике – там, где заканчивается автомобильное шоссе «Симферополь–Научный». На самом деле, здесь все только начинается. Отсюда берут начало десятки других путей. По одним идут те, кто ищет следы ушедших геологических эпох или мечтает пройти по пещерным городам Крыма. Но есть и другие – незримые для многих, потому что ведут в небо, к звездам и далее в бесконечность Вселенной.

Мне повезло впервые увидеть Крымскую астрофизическую обсерваторию рано утром на восходе солнца. Был август 1989 года. Старенький автобус, долго взбиравшийся в горы, вдруг перестал натужно гудеть и после плавной дуги дороги легко понесся по пологому полотну асфальта. В лобовом стекле на фоне синих гряд Крымских гор неожиданно засверкали бледно-золотые в рассветных лучах солнца купола башен телескопов. Захватывающее зрелище, когда видишь это в первый раз! Все вдруг отходит на задний план, и ты видишь только эти стремительно приближающиеся полусферы, словно картинку из светлого завтра, где живут счастливые люди с улыбками Алисы Селезневой из фильма «Гостья из будущего».

Это чувство сопричастности чему-то удивительному и прекрасному еще долго не оставляет вас здесь, в поселке Научный, где и расположена обсерватория. Здесь удивительно тихо и спокойно. Можно неспешно идти по старым асфальтовым дорожкам мимо сосен, кедров, белых акаций и лип, вдыхая непередаваемый сосново-смолистый аромат почти в полном одиночестве.

Когда стоишь у края дороги, где открывается прекрасный вид на горы, ощущаешь как никогда, что вся суэта привычного мира осталась за шлагбаумом проходной. Время здесь будто остановилось. Вернее, прошлое и будущее непрерывно сливаются в одно бесконечно длящееся мгновение, как в эльфийском Лориэне Толкиена. Это своеобразный «перекресток» – место, где встречаются времена и эпохи.

Здесь прямо у ваших ног неслышно плещутся волны древнего океана Тетис, оставившие после себя белые меловые породы с окаменевшими раковинами аммонитов. На юге их сменяют выходы сланцев, формировавшихся почти 300 млн лет назад, в эпоху наибольшей активности подводных вулканов. На западе можно увидеть характерный профиль горы Тепе-Кермен, или в просторечии Ёжик, с остатками поселения IX–X веков, являющегося частью цивилизации пещерных городов Крыма. А на территории самого поселка Научный в античную эпоху располагался местный центр гончарного производства. Через эти места проходили самые разные караванные пути прошлого, но только один шел не через пространство, а сквозь века и тысячелетия. Начинается он примерно в 15 км от поселка в балке Богаз-Сала, где студенты-геологи обнаружили камень, оказавшийся на поверку менгиром. Трудно сказать, кто поставил его здесь, но, несомненно, дела небесные волновали его создателей больше, чем земные. Люди не от мира сего. С тех пор мало что изменилось. В наше прагматичное время, когда все спешат по своим земным делам, всегда находят-ся те, кому хочется чего-то невероятного, кого тянет ввысь, в небо, к звездам. Эту эстафету древних в середине XX века приняли здесь, в поселке Научный, в Крымской астрофизической обсерватории.



*Григорий Абрамович Шайн –  
первый директор КрАО (1892–1956).  
Фотография сайта РАН*

Первым директором КрАО сразу после ее официального открытия в 1945 г. был назначен академик Г.А. Шайн. Обсерватория в Симеизе, построенная еще Н.С. Мальцовым, вошла в состав новой обсерватории в качестве наблюдательной базы.

Областью научных интересов Шайна была звездная спектроскопия и физика туманностей. Его работы по осевому вращению звезд, содержанию изотопов углерода в звездах спектральных классов N и R, исследования магнитного поля Галактики – являются классическими. При этом выдающиеся научные данные Г.А. Шайна удивительным образом сочетались с невероятными душевными качествами. В 1930-е годы он активно выступал в защиту репрессированных сотрудников Пулковской обсерватории, как мог, помогал их семьям, а после войны пригласил на работу тех немногих, кто выжил в лагерях. Именно так в Крым-

ской астрофизической обсерватории появился Н.А. Козырев, прославившийся открытием вулканизма на Луне. В КрАО он проводил свои знаменитые наблюдения по изучению свойств времени, которые так и не были приняты научной общественностью. Вот уж, воистину, человек не от мира сего!

На работу в новую обсерваторию приезжали в основном астрономы из Ленинграда и Москвы. Так здесь появились В.Б. Никонов, создатель методологии фундаментальной фотометрии звезд; С.Б. Пикельнер, чьи работы по физике межзвездной среды и газопылевых туманностей, проблемам звездообразования и физике Солнца легли в основу современной астрофизики; выдающийся спектроскопист В.К. Прокофьев и многие другие.

К сожалению, в 1952 г. Шайн добровольно снял с себя обязанности директора КрАО, полностью уйдя в работу руководимого им Отдела физики туманностей и строения Галактики, а в 1956 г. его не стало. Но за эти десять лет он сделал невероятно много. Благодаря Шайну обсерватория была оснащена телескопами, среди которых знаменитая «пятидесятка» – привезенный из Германии 48-дюймовый рефлектор (название «пятидесятка» появилось из-за округления), на котором долгое время велись все спектральные наблюдения звезд и галактик, 16-дюймовый двойной астрограф-рефрактор (оба построены немецкой фирмой Карл Цейсс), а также МТМ-500–50-сантиметровый телескоп системы Максудова. Именно Шайн задумал создание 2.6-метрового зеркального телескопа, который теперь носит его имя – Зеркальный Телескоп им. акад. Г.А. Шайна, или ЗТШ, и без которого уже трудно представить Крымскую астрофизическую обсерваторию. ЗТШ вступил в строй в 1960 г. и на тот момент был крупнейшим телескопом в Европе.

После ухода Шайна директором обсерватории стал А.Б. Северный. Он про-

работал в этой должности до 1987 г., фактически до конца советской эпохи. И годы его директорства по праву можно назвать «золотым веком» КраО. В обсерватории проводились международные симпозиумы и конференции, научные школы, приезжали такие именитые ученые, как Чандрасекар и Оорт, здесь любили бывать В.А. Амбарцумян, И.С. Шкловский, В.Г. Горбацкий, А.Г. Масевич и многие другие. Благодаря усилиям А.Б. Северного в поселке открылись десятилетняя школа, детский сад для детей сотрудников и ясли, была построена амбулатория. Особенно активно возводилось жилье. Рассказывают, что в 70-е годы можно было приехать в КраО, устроиться на работу и сразу идти выбирать квартиру. Научная и творческая жизнь здесь просто кипела: поэзия, музыка, живопись были обычными увлечениями сотрудников обсерватории. И что удивительно, они совершенно не мешали научной работе. Скорее наоборот, помогали, раскрывая творческий потенциал<sup>1</sup>.

К сожалению, в 1991 г. всему этому пришел конец. Развал Советского Союза стал точкой отсчета совершенно другой эпохи. И хотя 1990-е годы были

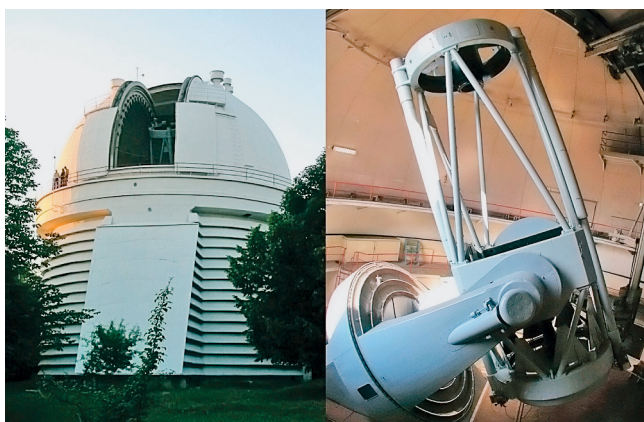
<sup>1</sup> Статью о «первом периоде» КраО см. в ЗиВ, 1975, №1. Можжерин В.М. Крымская астрофизическая обсерватория.



Башня 48-дюймового телескопа («пятидесятка»).  
Фото автора



Телескоп МТМ-500



2.6-метровый телескоп ЗТШ. Фото сайта КраО



*Дом, где расположена квартира-музей  
А.Б. Северного*

трудными для всех, для крымских астрономов они стали особенно тяжелыми. Из-за нехватки бензина в обсерваторию почти не ходили автобусы, месяцами не было зарплаты, были



*ЭТШ на фоне кометы Хейла-Боппа.  
Снимок Г.В. Борисова, 1997 г.*

постоянные проблемы с водой, электричеством, из-за чего даже в самые ясные ночи нельзя было наблюдать. Но главное, появилась какая-то безнадёжность, от которой перспективные сотрудники стали массово уезжать на работу за границу. Прервалась связь поколений. Тем не менее обсерватория выжила. Все помогли друг другу. Старенькая машина скорой помощи отвозила в Бахчисарай в поликлинику тех, кому нужны были врачи-специалисты. Администрация выискивала возможности организовать жилье для молодых сотрудников, используя вспомогательные помещения, всеми силами старались не допустить сокращения научных кадров. В нулевые годы ситуация улучшилась, но позже начались новые трудности – после 2010 г. финансирование обсерватории стало стремительно сокращаться, снова возникла угроза увольнений, нормой стал перевод сотрудников на полставки и даже треть ставки.

Прекратилось это только в 2014 г., когда Крым вошел в состав Российской Федерации.

Сегодня в КраО существуют пять научных подразделений. Это отдел физики Солнца и Солнечной системы, отдел физики звезд, отдел внегалактических исследований и гамма-астрономии, отдел радиоастрономии и геодинамики и, наконец, лаборатория перспективных разработок. Таким образом, исследования в Крыму ведутся на всех направлениях, начиная от ближайшего к нам околоземного пространства и заканчивая внегалактическими объектами. И если кому-то кажется, что наземные исследования ближнего космоса – это прошлый век, а вся новая информация поступает исключительно от

космических станций и межпланетных зондов, тот глубоко ошибается. Наблюдения за «космическим мусором», исследование сближающихся с Землей астероидов – источников потенциальной опасности, изучение вероятного химического и минерального состава малых тел по результатам поляриметрических наблюдений, исследование формы астероидов, их возможной кратности остаются по-прежнему важнейшими и интересными научными задачами.

**Исследования в области физики Солнца** в Крымской астрофизической обсерватории были начаты еще А.Б. Северным. Именно благодаря ему в 1955 г. был построен БСТ – башенный солнечный телескоп. В 1970-е годы он был модернизирован, а высота башни увеличилась на 5 м. На этом инструменте были сделаны важнейшие открытия, связанные с нестационарными процессами на Солнце, тонкой структурой эмиссионного спектра вспышек, факелов и протуберанцев. Сегодня на БСТ получают изображения Солнца в различных линиях, составляют с его помощью карты магнитных полей и лучевых скоростей для измерения общего магнитного поля Солнца.

В те же 1970-е годы в КрАО был построен и второй башенный телескоп БСТ-2, диаметр зеркала которого в два раза меньше. На нем проводят спектральные наблюдения и получают монохроматические изображения Солнца. Кроме БСТ-1 и БСТ-2 были построены и два коронографа: КГ-1 (начал работу еще в 1960-е годы) и КГ-2, на которых проводили исследование тонкой структуры вспышек, активных областей и волокон.

Сегодня исследованиями магнитной активности Солнца в КрАО занимается большая группа под руководством доктора физ.-мат. наук В.И. Абраменко. Они показали, что изучение изме-



*Башенный солнечный телескоп БСТ-1*

нений параметров магнитного поля Солнца позволяет прогнозировать его развитие на разных временных масштабах от часов до десятков лет. Эти исследования становятся особенно актуальными в свете постепенного ослабления солнечной активности, которую мы наблюдаем в последние несколько десятилетий. Результатом этого может стать полное прекращение появления пятен на поверхности Солнца – явление, уже наблюдавшееся ранее в XVII веке и получившее название Маундеровского минимума. В то время в Европе наблюдались особенно холодные зимы, а летом мог выпасть снег. Сегодня много говорят о глобальном потеплении, и тем важнее знать, что может ждать нас вместе с глобальными изменениями климата Земли.

В КрАО активно исследуются корональные дыры – области в солнечной короне, которые отличаются пони-



*Общий вид на башенные солнечные телескопы: БСТ-2 (на переднем плане) и БСТ-1*

женными значениями температуры и плотности. Крымские астрономы обнаружили связь корональных дыр средних и нижних широт с общим магнитным полем Солнца, которая, по всей видимости, отвечает за возникновение небольших (порядка 2 лет) задержек между максимумами 11-летнего цикла солнечной активности. К числу активных процессов, наблюдаемых на Солнце, относятся и корональные выбросы вещества. В отличие от солнечных вспышек, во время которых запасенная в активных областях энергия магнитного поля высвечивается, в корональных выбросах она тратится на ускорение огромных масс вещества. Эти выбросы нарушают движение потоков солнечного ветра и вызывают магнитные бури на Земле, вот почему прогнозирование таких событий чрезвычайно важно.

Проводимые в КраО исследования охватывают практически все области

гелиофизики. Они используют как наблюдения, выполненные в обсерватории, так и наблюдательные данные, полученные на других инструментах, включая космические.

Но наибольший интерес в Крымской астрофизической обсерватории традиционно уделяется все же не Солнцу, а изучению звезд и галактик. Возглавляемый канд. физ.-мат. наук К.Н. Гранкиным **отдел физики звезд** занимается исследованиями звезд на всех стадиях эволюции, начиная от совсем молодых, еще не вышедших на главную последовательность, до уже проэволюционировавших, расположенных на асимптотической ветви гигантов, а также белых карликов. К сожалению, спектральные наблюдения сегодня ведутся только на одном телескопе ЗТШ, что сильно осложняет получение наблюдательного времени. Знаменитая в прошлом «пятидесятка» сейчас находится в нерабочем состоянии, хотя есть



Корonoграф КГ-2

надежда, что после реконструкции этот телескоп все же будет запущен.

В отличие от спектральных, фотометрическим и поляризационным наблюдениям «повезло» больше: их проводят на двух крупных инструментах – ЗТШ и 1.25-метровом телескопе АЗТ-11, а также небольших телескопах (К-380, АТ-64, АЗТ-8 и др.). Телескоп РК-800, на котором были получены спектральные распределения энергии для А-звезд главной последовательности и 111 звезд поздних спектральных классов, сейчас находится на реконструкции.

К сожалению, состояние многих крымских телескопов требует большого внимания и средств для замены изношенного оборудования. Актуально это и для ЗТШ. Тем не менее спектральные наблюдения на нем ведутся очень интенсивно. Здесь работает группа П.П. Петрова, изучающая молодые звезды солнечных масс типа Т Тельца. Исследование звезд на ранней стадии



1.25 м телескоп АЗТ-11

эволюции дает крайне важную информацию о процессах на самих молодых звездах и в окружающих их газопылевых дисках. В КраО исследуют их вращение, наличие холодных и горячих пятен на поверхности, процессы аккреции и истечения вещества, магнитное поле, распределение околозвездной пыли в диске и многое другое. Данные многолетнего мониторинга звезд типа Т Тельца показали наличие на их поверхности не только холодных пятен солнечного типа, вызванных локальными магнитными полями, но и горячих пятен, обусловленных магнитосферной аккрецией вещества на звезду. Для звезд этого типа впервые удалось показать, что процессом истечения газа управляет магнитное поле звезды.

Важные результаты крымские астрономы получают и в исследованиях газопылевых дисков, где пыль является строительным материалом для формирования планет. Фотометрические и поляризационные наблюдения

в КраО показали, что наиболее мелкая пыль поднимается с поверхности диска дисковым ветром, и таким образом возникает пылевой экран, затмевающий звезду. Этим объясняется нерегулярная переменность блеска молодых звезд. Изредка происходят глубокие и продолжительные ослабления блеска звезд. Появление большого количества пыли может возникать в результате столкновением маломассивных планет в процессе их формирования.

Отдельно следует сказать о многолетних циклических изменениях блеска молодых звезд, обнаруженных еще в 90-е годы прошлого века группой В.П. Гринина. Они показали присутствие крупномасштабных неоднородностей в околозвездных газопылевых дисках, что, по-видимому, является результатом активного процесса планетообразования. Сегодня в Крыму фотополариметрический мониторинг молодых звезд успешно продолжает Д.Н. Шаховской.

16-дюймовый двойной астрограф





Исследование химического состава звезд на разных стадиях эволюции ведется еще с первых лет основания обсерватории. Важность этих исследований легко понять, если вспомнить, что именно на них опираются теоретики, занимающиеся звездной эволюцией и внутренним строением звезд. В КрАО в свое время была создана целая научная школа, которую активно развивали Г.А. Шайн и А.А. Боярчук. Сегодня акцент делается на химически пекулярных В-, А- и F-звездах, а также цефеидах II-го типа, относящихся к сферической подсистеме звездного населения нашей галактики. В последнем случае отмечается их более низкая металличность по сравнению с классическими цефеидами.

Исследования катаклизмических переменных активно развивает группа под руководством Е.П. Павленко. Катаклизмические переменные – это двойные системы с орбитальным периодом всего несколько часов. Основной компонент – белый карлик, а вторичный – красная карликовая звезда спектрального класса К-М, которая заполняет полость Роша. Вещество вторичного компонента перетекает к белому карлику, формируя вокруг него аккреционный диск, температура которого может достигать 100 000 К. Результатом может стать неожиданный эффект, когда излучение диска оказывается больше излучения обоих компонентов системы. При этом блеск в процессе орбитального движения будет изменяться в результате затмения диска компонентами системы (амплитуда переменности может достигать до  $2^m$ ). Могут наблюдаться у катаклизмических переменных и вспышки с амплитудой до  $9^m$  и более, связанные с переносом массы от вторичного компонента к главному или термоядерными реакциями на белом карлике. Таким образом, катаклизмические переменные представляют собой уникальную лабораторию для изучения поздних стадий звездной эволюции,

а также процессов, идущих в аккреционных дисках.

Безусловно, нельзя не сказать об изучении в КрАО магнитной и пятенной активности звезд солнечного типа. Эти исследования были начаты Р.Е. Гершбергом в 60-е годы прошлого века. Тогда сама идея существования холодных пятен на поверхности звезд была нова. Сегодня же мы знаем, что активность на звездах может на несколько порядков превосходить активность нашего Солнца, так что в максимуме активности более половины поверхности звезды может быть покрыто пятнами. У звезд существуют многолетние циклы активности, аналогичные 11-летнему солнечному циклу. Большая заслуга в развитии этого направления принадлежит сотрудникам КрАО. Здесь, начиная с пионерских работ П.Ф. Чугайнова, ведут многолетний спектральный и фотометрический мониторинг запятненных звезд с самым разным эволюционным статусом: от молодых звезд типа Т Тельца до активных оранжевых и красных карликов типа BY Dra, а также проэволюционировавших систем типа RS CVn и быстровращающихся гигантов типа FK Com.

Другое важнейшее направление исследований в физике звезд – изучение магнетизма и роли магнитных полей в эволюции звезд и их переменности. ЗТШ входит в список немногих телескопов мира, на которых возможны высокоточные измерения магнитных полей ярких звезд с точностью до нескольких гаусс, а также развито все необходимое программное обеспечение для обработки таких спектрополяриметрических наблюдений. Основная цель исследователей магнитных полей в КрАО состоит в изучении магнитной активности звезд в зависимости от периода вращения и цикла активности (для звезд солнечного типа), изучение магнитных полей у пульсирующих переменных (звезды



Радиотелескоп PT-22 в пос. Кацивели

типа  $\beta$  Цефея), а также изучение локальных магнитных полей (всплывание магнитных полей в формирующихся масштабных активных областях).

В области **внегалактической астрономии** Крымская астрофизическая обсерватория традиционно занимает одно из лидирующих в мире позиций в изучении активных ядер галактик. В 1964 г. Э.А. Дибай и В.И. Проник начали исследования физических условий в галактических ядрах. Анализируя полученные спектры, они выдвинули двухкомпонентную модель области свечения эмиссионных линий. В 1972 г. К.К. Чуваев в КрАО начал систематический мониторинг избранных активных ядер галактик на ЗТШ на специально разработанном для этого спектрографе СПЭМ. А с 1989 г. на АЗТ-11 стал проводиться и фотометрический мониторинг этих объектов с помощью пятиканального UVVRI фотометра-

поляриметра. Сегодня для этих исследований используются также фотополариметрические наблюдения на АЗТ-8.

Как известно, именно присутствие черных дыр в ядрах галактик обеспечивает их невероятно большое энерговыделение. Благодаря накопленным данным крымским астрономам удалось оценить массы черных дыр в активных ядрах галактик (до  $10^6$ – $10^9$  масс Солнца), определить размеры, геометрию и кинематику областей, в которых формируются широкие эмиссионные линии. Были определены параметры аккреционных дисков и ультрарелятивистских струй (джетов), а также исследованы протекающие в джетах физические процессы, которые вызывают вспышки излучения во всех диапазонах длин волн.

Решается на ЗТШ и еще одна важная задача – оптическое послесвечение космических гамма-всплесков, связанных со сверхновыми, килоновыми (результат слияния двух нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры) и родительскими галактиками. Результаты таких наблюдений используются для построения детальных многоцветных кривых блеска и их дальнейшего моделирования. Отдельный класс представляют собой короткие гамма-всплески, связанные со слиянием двойной системы, состоящей из релятивистских компактных объектов. Наблюдения проводятся в оперативном режиме, поскольку объекты определяются в момент вспышки и, следовательно, совершенно непредсказуемы. Блеск исследуемых объектов составляет от  $18^m$  до  $25^m$ .

«Окна» КрАО «распахнуты» и в другую область электромагнитного спектра – радиодиапазон. **Отдел радиoaстрономии и геодинамики**, который возглавляет д.ф.-м.н. А.Е. Вольвач, располагается на Южном берегу Крыма в пос. Кацивели, рядом с Симеизом у подножия горы Кошка. Здесь,

на берегу Голубого залива, в 1966 г. был введен в строй радиотелескоп РТ-22. Телескоп расположен у самого моря рядом с галечным пляжем. Его прекрасно видно, если спускаться к морю по дороге из Кацивели. Рядом можно увидеть и два сооружения, похожие на белые сферы – в них располагаются радиотелескоп сантиметрового диапазона волн РТ-2, используемый для регистрации радиоизлучения Солнца, и радиотелескоп дециметровых волн РТ-3, который служит для мониторинга состояния солнечной хромосферы и оценки вспышечной активности Солнца в радиодиапазоне. Возле них расположен радиотелескоп метрового диапазона волн РТ-М, используемый для наблюдений солнечной короны. Эти три инструмента входят в состав международной сети Службы Солнца.

Однако сам РТ-22 используется сейчас для решения совсем других вопросов. Речь идет о радиоинтерферометрических наблюдениях со сверхдлинными базами (РСДБ). Первые в мире межконтинентальные РСДБ-наблюдения были осуществлены еще в 1969 г. В 1980 г. РТ-22 был включен в Международную РСДБ-сеть и с тех пор активно работает в этой области. Вместе со спутниковыми дальнометрическими измерениями и навигационными системами GPS/GLONASS РСДБ-наблюдения на РТ-22 позволяют решать многие задачи астрометрии, геодезии и геодинамики: благодаря им с высокой точностью отслеживается вращение Земли, проводится изучение нерегулярных изменений фигуры Земли, ее гравитационных и магнитных полей, а также местных и общих деформаций земной коры, что крайне важно для прогноза землетрясений. Благо-



*Главное здание обсерватории*

даря участию РТ-22 в Международной РСДБ-сети проводится исследование тектоники литосферных плит, с точностью в несколько миллиметров определена скорость движения станции в Симеизе относительно Евразийской тектонической плиты.

Кроме задач геодинамики, РСДБ-наблюдения активно используются для изучения ближнего космоса – комет и астероидов, а также при исследовании областей звездообразования, где главная роль отводится наблюдениям источников мазерного излучения: ОН и  $\text{H}_2\text{O}$ -мазеры. Угловое разрешение, в тысячу раз превышающее разрешающую силу оптических инструментов, позволяет исследовать формирование звезд и сверхтонкую структуру активных ядер галактик. Не случайно по своим характеристикам РТ-22 является лучшим в России и входит в пятерку лучших инструментов мира.

Может сложиться обманчивое впечатление, что в Крымской астрофизической обсерватории все прекрасно и нет повода для беспокойств. Это не так, здесь много проблем, начиная с изношенной оптики и оборудования и заканчивая отсутствием жилья для новых сотрудников. Но не это определяет настроение в КРАО.

Как и десятки лет назад, здесь все также тихо и спокойно. Кажется, что совершенно ничего не изменилось, но на самом деле изменилось очень многое. Изменился мир вокруг, изменились люди, работающие в КРАО, но одно осталось неизменным – их искренняя доброта и вера в лучшее.

Мы по-прежнему стоим на невидимом перекрестке, месте пересечения эпох и времен. Все так же неслышно шумят волны океана Тетис, плескавшиеся здесь много миллионов лет назад, а на отроге под БСТ выступают выходы глинистых сланцев – свидетелей бурных подводных извержений вулканов в триасовом периоде. Все так же нагруженные тяжелыми рюкзаками путешественники, выйдя из автобуса, отправляются по туристическим тропам к Большому каньону или остаткам пещерных городов. Классическая архитектура Главного здания КРАО и гостиницы, колоннада у телескопов БСТ и МТМ-500 – немые свидетели былого

расцвета обсерватории в советскую эпоху с ее энтузиазмом, искренностью и чувством уверенности в завтрашнем дне. И можно не обращать внимания на потрескавшиеся ступени лестниц и полуразрушенный асфальт старых дорожек, а повернуться лицом к восходу и встретить новую эпоху.

Да, мы все сейчас на пороге новой эпохи. Что она принесет? Астрономы по своей сути оптимисты – другие в этой профессии просто не остаются. Хочется верить, что на смену временам, когда астрономия мало кого интересовала, а финансирование фундаментальной науки казалось пустой тратой денег, придет новое время. Ведь нельзя постоянно жить только земными делами и заботами, нужно иногда все же поднимать голову в небо и задумываться: «Что там?»

*Фотографии автора  
(кроме указанных особо)*

Сайт Крымской астрофизической обсерватории РАН <http://crao.ru/>

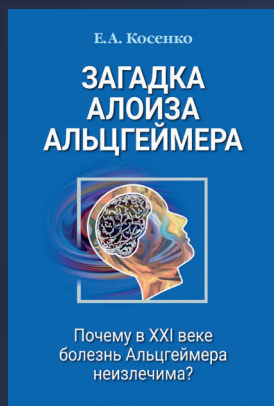


## А вы отправили обязательный экземпляр?

Издательство «Наука» предлагает организациям и независимым издателям услугу по отправке Обязательного Электронного Экземпляра в Российскую государственную библиотеку и Российскую книжную палату

При размещении научных, научно-популярных книг и журналов в Электронной библиотечной системе Издательства «Наука» ([libnauka.ru](http://libnauka.ru)) данную услугу мы предоставляем бесплатно. Задать вопрос и узнать о стоимости услуги вы можете по адресу [oee@naukaran.com](mailto:oee@naukaran.com)

С новыми книгами  
Издательства “Наука”  
вы можете ознакомиться на сайте  
**naukabooks.ru**



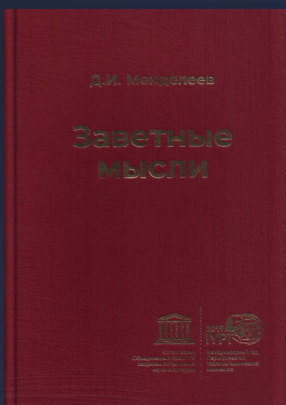
Косенко Е.А.

**Загадка Алоиза Альцгеймера. Почему в XXI в. болезнь Альцгеймера неизлечима?**

М.: Наука, 2019. — 319 с.

В монографии изложена актуальнейшая на сегодняшний день медико-биологическая проблема, связанная с болезнью Альцгеймера (БА), и предпринята попытка ответить на вопрос: почему заболевание, известное с начала XX в. и на изучение которого тратятся триллионы долларов, в настоящее время все еще остается неизлечимым, а имеющиеся антиамилоидные препараты приносят больше вреда, чем пользы? Для объяснения механизмов, лежащих в основе нейродегенерации при БА, формулируется «эритроцитарная гипотеза», согласно которой эритроциты рассматриваются не просто как клетки, переносящие кислород, а как клетки, от эндогенного метаболизма которых зависит адекватная доставка кислорода в ткани, и в частности в мозг. Именно функциональное несоответствие между эритроцитами и биоэнергетикой мозга, считает автор, лежит в основе гибели нейронов.

*Книга может быть интересна широкому кругу читателей – студентам, обучающимся по специальностям «биология», «биомедицина», а также физиологам, биохимикам научно-исследовательских лабораторий, преподавателям высших образовательных медицинских и биологических учреждений.*



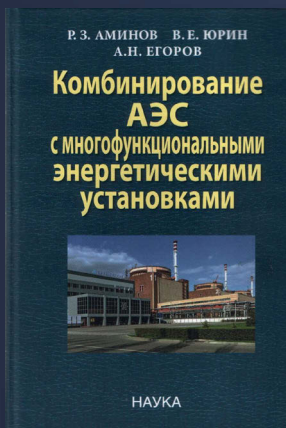
Менделеев Д.И.

### **Заветные мысли.**

М.: Наука, 2019. — 310 с.

Д.И. Менделеев в работе «Заветные мысли» рассуждает о желательных, на его взгляд, путях развития России в геополитической, экономической и научной областях. Круг анализируемых ученым вопросов чрезвычайно широк: государственное устройство, образование, народонаселение, внешняя торговля, взаимосвязь между просвещением и национальным богатством, баланс между промышленностью и сельским хозяйством и т.д. По существу, «Заветные мысли» – духовное завещание Д.И. Менделеева потомкам.

*Для широкого круга читателей.*



Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.

### **Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками.**

М.: Наука, 2018. — 238 с.

В работе предложен новый взгляд на повышение безопасности АЭС. Разработаны и исследованы многофункциональные системы, включающие такие установки, как дополнительная паровая турбина, тепловые аккумуляторы, водородный комплекс и газотурбинные установки, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Исследован способ использования остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР для генерации электроэнергии, необходимой для отвода остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Разработана система уравнений и построены скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара, которые позволяют проводить промышленные термодинамические расчеты параметров рабочего тела водородных циклов. Исследованы процессы сжигания водорода в кислородной среде, а также определены ресурсные показатели основного оборудования водородного энергокомплекса, работающего в циклических режимах.

*Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.*

# naukabooks.ru

## ТРИ ЗВЕЗДЫ ГЕРОЯ: ЗНАНИЯ И СТРАСТИ Несколько страниц из жизни великого ученого нашей Родины М.В. Келдыша\*

ГУБАРЕВ Владимир Степанович,

писатель, драматург, журналист

DOI: 10.7868/50044394821020067

*Этот очерк я писал более полувека назад – с того самого дня, когда познакомился с академиком Мстиславом Всеволодовичем Келдышем, ученым в области прикладной математики и механики, организатором отечественной науки, идеологом космической программы, Президентом Академии наук СССР (1961–1975; ЗиВ, 2011, № 1). Он был трижды Героем Социалистического труда. Мне кажется, что это были своеобразные вехи его жизни. В первой части статьи рассказано о его первых двух звездах: первая – за участие в атомном проекте и испытании водородной бомбы (разработанная им научная методология сыграла решающую роль в совершенствовании ядерного оружия и средств его доставки), вторая – за особые заслуги в развитии ракетной техники и за работы по созданию и успешному запуску первого в мире полета человека в космос.*

---

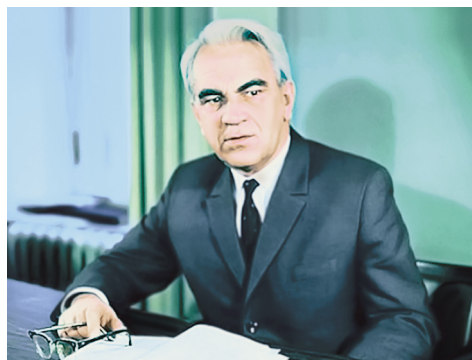
### ЗВЕЗДА ТРЕТЬЯ: БОЛЬШАЯ НАУКА

---

Н.С. Хрущёв, председатель Совета Министров СССР (1958–1964), как известно, человеком был решительным. Идей у него было много, и он старался реализовывать их быстро, не очень-то считаясь с ситуацией. Одна из идей – переселить ученых из Москвы поближе к «объектам их исследований». Есть Институт мерзлотоведения? Отправить его в Якутск! Именно такое распоряжение главы государства получил только что избранный Президент Академии наук. Келдыш начал его выполнять...

В «Комсомольскую правду» написали коллективное письмо специалисты по мерзлотоведению. Их было более 80 человек, и они убедительно показали, что такое решение ошибочно – погибнет одна из лучших научных школ. Письмо мы напечатали,

\* Окончание. Начало см. в ЗиВ, 2021, № 1.



Академик М.В. Келдыш в своем кабинете  
Президиума АН СССР. 1970-е гг.

а я написал короткий комментарий, смысл которого был в том, что молодой Президент АН СССР не является специалистом в этой области, а потому допустил ошибку... Каково же было мое удивление, когда в тот же день Келдыш позвонил в редакцию и попросил меня приехать к нему побеседовать. И вот совсем молодой журналист сидит за столом с Президентом Академии наук,

попивает с ним чай, который был тут же любезно предложен, и выслушивает объяснения Мстислава Всеволодовича, почему он считает верным перевод института в Якутск... Я с чем-то не соглашался, спорил, говорил какие-то глупости, но прославленный ученый терпеливо и обстоятельно объяснял свою позицию.

Потом мы при встречах вспоминали ту первую беседу, потому что Наталья Леонидовна Тимофеева – бессменный помощник Келдыша в Академии наук – сказала, что Мстислав Всеволодович очень болезненно воспринял первую публичную критику в свой адрес и помнил много лет. Насколько я знаю, это был единственный случай, когда Келдыш уступил нажиму ЦК КПСС... Позже он сражался с «ведомством Суслова» бескомпромиссно, и это, безусловно, стоило ему многих лет жизни. А меня в президиуме Академии называли «мерзлотоведом», и честно признаюсь, мне слышать это приятно.

Эти две истории не связаны между собой, да и случились они в разные годы. Однако для меня у них есть общий стержень – это позиция Президента Академии наук. В обоих случаях М.В. Келдыш доказал не только свою принципиальность, но и мужество.

Власть в биологии Трофима Денисовича Лысенко<sup>1</sup> в те годы была беспредельная. Сначала его поддерживал сам Сталин, а следовательно, и весь партийно-государственный аппарат.

В 1930-е годы мир науки, как и все общество, раскололся надвое. С одной стороны – Николай Иванович

Вавилов<sup>2</sup> и его ученики. Среди них молодой генетик Николай Дубинин, чье имя уже хорошо известно во всем научном мире. По другую сторону – группа агронома Т.Д. Лысенко. В ней выделялся И.И. Презент<sup>3</sup> – юрист по образованию, но провозгласивший себя философом и биологом. Он – идеолог, Лысенко – практик. Этот тандем начал рваться к вершинам научного сообщества. Кстати, на первом этапе Презент всячески восхвалял Н.П. Дубинина и его работы. Он надеялся привлечь молодого профессора на свою сторону. А когда этого не случилось, стал его злейшим врагом.

На стороне Вавилова и его учеников – великая правда науки. Группа Лысенко наверняка очень быстро исчезла бы в водовороте событий тех лет. Но случилось невероятное. Лысенко выступал на съезде колхозников-ударников. Как всегда, его речь пестрела лозунгами. Один из них – «Даешь

<sup>1</sup> Т.Д. Лысенко (1898–1976) – советский агроном и биолог, основатель и крупнейший представитель псевдонаучного направления в биологии – мичуринской агробиологии, президент Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (ВАСХНИЛ; 1938–1956).

<sup>2</sup> Н.И. Вавилов (1887–1943) – ученый-генетик, ботаник, селекционер, химик, географ, создатель учений о мировых центрах происхождения культурных растений и об иммунитете растений, закона гомологических рядов в наследственной изменчивости организмов, организатор сети научных учреждений по биологии и смежным наукам, доктор биологических наук, академик АН СССР, АН УССР и ВАСХНИЛ, президент (1929–1935) и вице-президент (1935–1940) ВАСХНИЛ, президент Всесоюзного географического общества (1931–1940), основатель и директор Всесоюзного института растениеводства (1930–1940), директор Института генетики (1930–1940).

<sup>3</sup> Исаак Израилевич Презент (1898–1976) – советский ученый и педагог, автор работ по марксистской методологии науки, с 1934 г. сотрудничал с Т.Д. Лысенко, стал его ближайшим сотрудником и идеологом «мичуринского направления», доктор биологических наук, академик ВАСХНИЛ (1948), профессор Ленинградского госуниверситета (1930–1951).



перестройку сельского хозяйства на научных основах!» И вдруг в наступившей тишине прозвучал голос Сталина, присутствующего на съезде. «Браво, Лысенко!» – крикнул он. И это определило судьбу нашей биологической науки на многие годы.

Перелом наступил, на мой взгляд, лишь в конце 1950-х годов, когда один из ближайших соратников Лысенко Н.И. Нуждин баллотировался в действительные члены Академии наук. Тогда против него единым фронтом выступили физики-ядерщики, а также молодой математик – академик М.В. Келдыш. И первым прозвучал голос трижды Героя Социалистического Труда академика Андрея Дмитриевича Сахарова<sup>4</sup>. Нуждина «провалили» – это был первый удар по Лысенко. Тем не менее отечественные генетики по-прежнему работали под дамокловым мечом лысенковщины – одной из изощренных форм сталинизма.

Испытания ядерного оружия в 1949–1955 гг. поставили вопрос об исследованиях в области радиационной медицины и биологии. Появление биологического оружия в 1940-х годах показывало, что теории Лысенко годятся лишь для политической трескотни. Выход в космос в 1957 г. рождал новые направления в науке – космическую биологию и медицину. Лысенко и его

<sup>4</sup> А.Д. Сахаров (1921–1989) – физик-теоретик, один из создателей первой советской водородной бомбы, автор идеи управляемой термоядерной реакции, академик АН СССР, трижды Герой Социалистического Труда. Общественный деятель, автор проекта новой конституции СССР, правозащитник, лауреат Нобелевской премии мира за 1975 г.



*Трофим Денисович Лысенко. 1940-е гг.*



*Президент ВАСХНИЛ Николай Иванович Вавилов. 1933 г.*

последователи были беспомощными перед новыми реалиями XX века.

Кульминацией борьбы стало «Письмо трехсот», организованное директором Института ботаники Павлом Александровичем Барановым и Николаем Петровичем Дубининым<sup>5</sup>. Их подписи стояли под сопроводительной запиской в ЦК партии. Это был своеобразный протест и одновременно вызов всей партийной номенклатуре, которая по-прежнему поддерживала Лысенко.

В 1980-х годах я работал редактором «Правды» по науке. Мне удалось опубликовать это «Письмо трехсот», написанное в 1955 г., только в январе

<sup>5</sup> Николай Петрович Дубинин (1906–1998) – ученый в области генетики, основатель научной школы, автор классических работ по эволюционной, радиационной, молекулярной и космической генетике, проблемам наследственности человека, директор Лаборатории радиационной генетики Института биофизики АН СССР (1956–1966), организатор и директор Института цитологии и генетики Сибирского отделения АН СССР (1957–1959), организатор и директор Института общей генетики АН СССР (1966–1981), академик АН СССР, профессор, Герой Социалистического Труда.

1989 г. До этой поры оно несло гриф «Совершенно секретно». Игнорировать мнение биологов уже было нельзя, но тем не менее пришедший к власти Н.С. Хрущёв поддерживал Лысенко, и переубедить его никому не удалось. Даже дочери Раде, которая по образованию была биологом. Руководителям страны, будь то Сталин или Хрущёв, хотелось быстрее добиться продовольственного изобилия, быстрее построить коммунизм. Именно это им и обещал академик

Лысенко. Его же оппоненты утверждали, что быстрого успеха не может быть. Естественно, что не очень образованные руководители страны целиком полагались на Лысенко, тем самым обрекая наше сельское хозяйство и биологическую науку на прозябание. Но, к счастью, в науке были и настоящие ученые. Они не прекращали борьбы за истинную генетику.

В 1956 г. в Академии наук была создана Лаборатория радиационной генетики. Это был своеобразный подарок к 50-летию Николая Петровича Дубинина. Мне посчастливилось быть на ужине, который устроил Дубинин дома сразу после присуждения ему Ленинской премии. Одним из инициаторов этого был М.В. Келдыш – он считал, что эту высшую награду Родины Дубинин заслужил.

25 декабря 1964 г., всего через два месяца после снятия Хрущёва, Президент АН СССР М.В. Келдыш посчитал, что Академии надлежит исправить собственную ошибку. В своем Постановлении «О развитии в Академии наук СССР научно-производственных работ в области генетики» говорится: «Считать



Ученый-генетик  
Н.П. Дубинин. 1939 г.

целесообразным организовать на базе лаборатории радиационной генетики Института биологической физики АН СССР Институт общей генетики АН СССР...»

Весной 1966 г. Институт генетики АН СССР, возглавляемый Лысенко, был упразднен. Институт общей генетики под руководством академика Дубинина начал свою работу.

1964-й год. Хрущёв еще у власти, но мы в «Комсомолке», а следом и «Литературка»<sup>6</sup>, опубликовали несколько

статей, рассказывающих об успехах экспериментальной генетики. Борьба с Т.Д. Лысенко предстоит жесткая, и единственная опора в ней – М.В. Келдыш в Академии наук... Вообще-то, противников у Лысенко много, но они в основном среди физиков, до которых Трофим Денисович не смог добраться даже во времена Сталина – их «спасла» атомная бомба, которую они сделали... Надо было нанести неожиданный удар, и ваш покорный слуга (опять-таки по молодости!) подготовил реплику о том, что в журнале «Агробиология» постоянно хвалится лишь один Лысенко, и это тем более странно, так как он является главным редактором. Заметка, казалось бы, простенькая, небольшая, но она вызвала настоящий «бум» и в ЦК партии, и в Академии наук, и среди генетиков.

Это была настоящая сенсация! И вдохновленный разрастающимся скандалом, я тут же встретился с опальным Николаем Петровичем Дубининым и написал большой очерк о нем, о его борьбе с Лысенко и Презен-

<sup>6</sup> «Литературная газета» – литературное и общественно-политическое издание.

том, о сессии ВАСХНИЛ<sup>7</sup> 1948 г. Главный редактор «Комсомолки» попросил меня показать очерк Президенту Академии, мол, давайте немного подстрахуемся. Мстислав Всеволодович очерк прочитал, но советовал не печатать. «Мы сами разберемся в Академии – сказал он, – тут помощь журналистов не нужна...» Через два дня очерк о Дубинине был напечатан в газете... Келдыш при очередной нашей встрече заметил:

«Хорошо, что у вас есть собственное мнение. Так и поступайте в будущем!» Много ли найдется людей, способных так оценить происшедшее!?

Именно при М.В. Келдыше значение науки, ее авторитет и стремительное развитие практически по всем направлениям в стране выросли поистине «до космических высот». Однажды Президент РАН академик Ю.С. Осипов сказал: «Это был золотой век отечественной науки», и, безусловно, он был прав.

Особое внимание академик Келдыш уделял развитию науки за Уралом. Через три месяца после своего избрания в 1961 г. Президентом АН СССР он приехал в Новосибирск. Там отмечался юбилей его учителя и друга академика Лаврентьева<sup>8</sup>. На торжественном заседании Келдыш, в частности, сказал:



*И.И. Презент выступает на сессии ВАСХНИЛ. 1948 г.*

«Когда работа по созданию Сибирского научного городка будет доведена до конца, мы получим образцовое научное учреждение, громадный комбинат науки, который призван не только поднимать науку в Сибири, не только содействовать росту производительных сил Сибири, но и сыграть выдающуюся роль в развитии всей советской науки». Так сказал Президент Академии наук, но не просто сказал, но и приложил немало сил, чтобы наука во всех уголках страны развивалась стремительно. Он определял ее «точки роста», поддерживал талантливых людей, где бы они ни работали! Весьма показательна история создания научного центра на Дальнем Востоке. Николай Алексеевич Шило – легендарный открыватель золотых приисков на Колыме – рассказал мне о том, какую роль сыграли два человека – Келдыш и Лаврентьев – в его судьбе и судьбе всей науки на Дальнем Востоке. Я спросил у него:

– Колыма – это золото, лагеря, рабочий труд... Именно такое впечатление остается, когда слышишь это слово. Вы

<sup>7</sup> Всесоюзная академия сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (1929–1992).

<sup>8</sup> Михаил Алексеевич Лаврентьев (1900–1980) – ученый-математик и механик, основатель Сибирского отделения АН СССР и Новосибирского Академгородка, академик АН УССР и АН СССР, вице-президент АН СССР (1957–1976), Герой Социалистического Труда.



*Академик Михаил Алексеевич Лаврентьев.  
Новосибирск, 1973 г.*

работали там много лет, открыли ряд месторождений, но неужели жизнь там изменилась, когда на Колыму пришла большая наука?

– Безусловно! Родилась идея создать в Магадане академический институт в составе Сибирского отделения Академии наук СССР. К нам в Магадан зачастили «высокие гости», да и в Москве принимали меня с большим интересом. Кстати, состоялась встреча и с Н.С. Хрущёвым. Но он разочаровал меня: очень спокойно отнесся к развитию науки на Колыме. К счастью, Президентом АН СССР стал академик М.В. Келдыш. Он начал активно поддерживать нас. Делать это было нелегко, так как по-прежнему наши исследования носили гриф «Секретно». Но Келдыш старался, чтобы наука в дальних краях расширялась. Я был избран членом-корреспондентом АН СССР, меня направляли на разные международные конгрессы и конференции. Все это давало возможность не только устанавливать контакты с зарубежными коллегами, но и знакомить их с достижениями нашей геологической науки. А нам было что показать и рас-

сказать!.. Пришло время встретить нам делегацию Академии наук СССР во главе с М.В. Келдышем. Он побывал не только в Магадане и на Чукотке, но и на Камчатке, Сахалине, Приморском крае. Речь шла о создании Дальневосточного научного центра, и президент Академии изучал его возможности. Тогда речь с вами не шла о его руководстве? В составе делегации был Андрей Капица – сын известного ученого. Он и стал первым

председателем центра. Мстислав Всеволодович на заседании президиума Академии делился своими впечатлениями о поездке. Мне рассказывали, что он особо выделил работу нашего института в Магадане. Узнать об этом было, конечно же, приятно. А затем я убедился, что Келдыш меня поддерживает: я был избран академиком. Бесспорно, высокая оценка моей работы президентом Академии сыграла свою роль.

Однако в судьбе Президента АН СССР М.В. Келдыша не все складывалось гладко. И конечно же, «главной головной болью» для него стала ситуация, которая сложилась вокруг академика А.Д. Сахарова. Власть и Сахаров схлестнулись в бескомпромиссной схватке.

Зима 1970 г. запомнилась оттепелями. Снег лежал почерневший, тяжелый, а оттого казалось, что он никогда не растает. Из окна приемной Президента АН СССР видна круглая чаша для цветов огромного газона (почему-то мне всегда казалось, что это неработающий фонтан, оставшийся еще с екатерининских времен!), пустынная площадь, и одинокая фигурка человека, который прохаживается вокруг замерзшего «фонтана». Это Андрей Дмитриевич Сахаров...

Идут в газеты письма с требованием «наказать» Сахарова, кое-где проходят даже митинги против него... Да и в Академии немало тех, кто выступает против ученого... В общем, в ЦК КПСС требуют (Суслов?<sup>9</sup>), чтобы Андрея Дмитриевича вывели из состава членов Академии... Такого в истории Академии наук не было, и пока единственная опора для Сахарова – это Келдыш. Он не только всегда уважал Сахарова, но и поддерживал его – они хорошо узнали друг друга еще по работе над «атомной проблемой» (эх, как тогда они были молоды!).

Как же защитить Сахарова? И тут представляется случай... Келдыш рекомендует познакомиться с последней работой академика П.Л. Капицы, который получил в своей лаборатории «плазменный шнур». Он утверждает, что это и есть основа будущего термоядерного реактора. Председателем комиссии по проверке работы Капицы Мстислав Всеволодович назначает Сахарова. Тот с энтузиазмом выполняет поручение Президента АН СССР. Всего несколько страниц заключения: нет, это не термоядерная реакция, но Капица сделал большое открытие... Петр Леонидович с гордостью показывает нам с Ярославом Головановым этот документ. Потом с хитринкой говорит: «А почему бы вам не написать в “Комсомолке” об этом?» Он прекрасно знает, что в любой газете крепко-накрепко запрещено даже упоминать фамилию



*Андрей Дмитриевич Сахаров. 1960-е гг.  
АРАН. Р.Х. Оп. 1С. Д. 49. Л. 1*

Сахаров. Заметив наше смущение, Петр Леонидович добавляет: «Но надо обязательно посоветоваться с Келдышем...» Президент сразу же оценил и поддержал идею о подготовке такого материала. Я.К. Голованов сделал репортаж из лаборатории Капицы, а я встретился с Андреем Дмитриевичем и взял у него интервью, которое назвал «Холодная плазма». Юрий Рост сделал хорошие снимки. Я привез Сахарову готовый материал, он внимательно

просмотрел его, сделал необходимые поправки и завизировал. «Убежден, что это интервью не напечатают», – заметил он. Я попытался его убедить в обратном, но, видимо, интуиция и знание действительности у него были гораздо глубже, потому что события начали развиваться стремительно...

От «стукача» (тайные сотрудники КГБ работали и у нас) ушла информация, что в «Комсомолке» готовится к публикации интервью с Сахаровым. «Стукач» был законспирирован хорошо: мы так и не смогли его вычислить... Слух об интервью тут же дошел до Суслова, и он распорядился «примерно наказать виновных, снять с работы и исключить из партии за политическую близорукость». Я мгновенно ощутил образовавшуюся пустоту... Единственная надежда – Келдыш... Он внимательно выслушал мой рассказ о том, что происходило в обоих ЦК – партии и комсомола, какие решения готовятся, что их осталось лишь «проштамповать» на ближайшем секретарите ЦК... «Придется идти ко мне помощником, – вдруг сказал Мстислав Всеволодович, – возьму, даже если будете беспартийным. А сейчас подождите в приемной...» Я понял, что при мне

<sup>9</sup> Михаил Андреевич Суслов (1902–1982) – советский партийный и государственный деятель, член Политбюро ЦК КПСС (Президиума ЦК КПСС; 1952–1953, 1955–1982), идеолог партии.

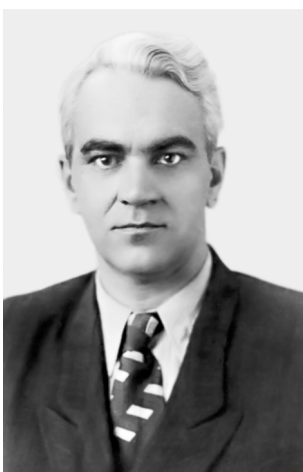
он не хочет разговаривать по телефону... С кем? Я мог только догадываться... Он вышел из кабинета минут через пятнадцать. Очень взволнованный – лицо красное, губы дрожали...

– Печатать интервью нельзя, – сказал он, – но вы можете не беспокоиться, ведь вы работали по моей просьбе... Я попытался возразить, но Келдыш уже не слушал – он ехал в ЦК партии...

Гораздо позже я узнал, что Мстислав Всеволодович пытался доказать Сулову, что печатать интервью с Сахаровым надо, это поможет и Андрею Дмитриевичу, и Академии наук, более того – стране... Но слишком велика была ненависть у Сулова и его окружения к Андрею Дмитриевичу, для них он был опаснее, чем все «акулы империализма», вместе взятые...

Референт Келдыша Наталья Леонидовна регулярно звонила и спрашивала: «Мстислав Всеволодович интересуется: у тебя все нормально? С тобой ничего не сделали?» Было в этих вопросах нечто щемящее и трогательное: Президент Академии не верил в порядочность тех, кто наверху, – а вдруг не сдержат своего слова и расправятся с журналистом!? Он прекрасно понимал, что только его защита способна отвести беду от человека. Я знаю, что было множество людей, которых защищал и спасал Мстислав Всеволодович Келдыш, а потому память о великом ученом и человеке для всех нас священна...

«Холодная война» касалась каждого. И пожалуй, не было в стране ученого, который так или иначе не принимал в ней участие. Келдыш, конечно же, оказался



*М.В. Келдыш. Начало 1950-х гг.  
АРАН. Ф. 1729. Оп. 1. Д. 44. Л. 5*

в самом центре событий – от его таланта и труда во многом зависела безопасность страны. Это понимали все, кто с ним работал.

Сначала авиация, а потом ядерное оружие и ракетная техника, – именно в этих областях проходил фронт «Холодной войны», следовательно, через конструкторские бюро и научно-исследовательские институты, что составляли в те годы основу Академии наук.

Два события в жизни Мстислава Всеволодовича Келдыша заслуживают

особого внимания. Первое – это создание «Бури», второе – совещание по ракетно-ядерному оружию в Крыму. В обоих случаях решающее слово оставалось за Келдышем.

Рождение межконтинентальной крылатой ракеты «Буря»<sup>10</sup> вполне может послужить сюжетом как для детективного романа, так и объемного трагического повествования, в котором любовь и кровь соединены воедино. Если выбирать первый вариант, то до нынешнего дня остается неясным, почему одно из величайших достижений отечественной науки и техники было уничтожено. От него остались лишь фотографии и воспоминания немногочисленных участников проекта. Второй же вариант предус-

<sup>10</sup> Первая в мире сверхзвуковая двухступенчатая межконтинентальная крылатая ракета наземного базирования массой 95 т (масса ядерной боеголовки 2,35 т), скоростью полета около 3500 км/ч и дальностью действия до 8 тыс. км (изделие «350», В-350, Ла-350, Ла-Х), разработанная в 1954–1960 гг. в ОКБ-301 под руководством С.А. Лавочкина. Запуски производились с полигона «Владимировка» в Астраханской области.

матривает такой накал страстей, что потребуется мастерство классика, чтобы передать их. А потому остановимся лишь на некоторых деталях.

2 декабря 1946 г. М.В. Келдыш становится во главе НИИ-1 – легендарного исследовательского центра, где зарождалась отечественная ракетная техника<sup>11</sup>. И сразу же определяет новые задачи для его сотрудников: не «обслуживать» конструкторские бюро, а определять стратегические задачи развития новой техники. Уже в 1947 г. он обосновывает идею создания межконтинентальной крылатой ракеты.

После войны в НИИ-1 создается современная экспериментальная база. Исследования ученых помогают конструкторам ракет и новых самолетов создавать принципиально новые образцы военной техники. Что греха таить, в те годы начала «Холодной войны» именно от вооружения зависела судьба страны. Еще не было ядерных боеголовок и ракет, способных доставлять их через океан до другого материка, но Келдыш и его соратники прекрасно понимали, что именно ядерно-ракетному щиту предстоит обеспечивать в будущем мир на планете. Но надо было найти пути создания такого щита!

Главный конструктор С.П. Королёв занимался баллистическими ракетами, и исследовательский центр Келдыша<sup>12</sup>

<sup>11</sup> С 1933 г. – Реактивный научно-исследовательский институт, с 1944 г. – НИИ-1 (НИИ реактивной авиации), в 1965 г. переименован в НИИ тепловых процессов, с 1995 г. – ФГУП «Центр Келдыша», с 2008 г. – Исследовательский центр им. М.В. Келдыша в составе госкорпорации «Роскосмос».

<sup>12</sup> В 1946 г. начальником Реактивного научно-исследовательского института (НИИ-1), занимавшегося прикладными задачами ракетостроения, стал М.В. Келдыш, с 1950 по 1961 гг. он был научным руководителем Центра.

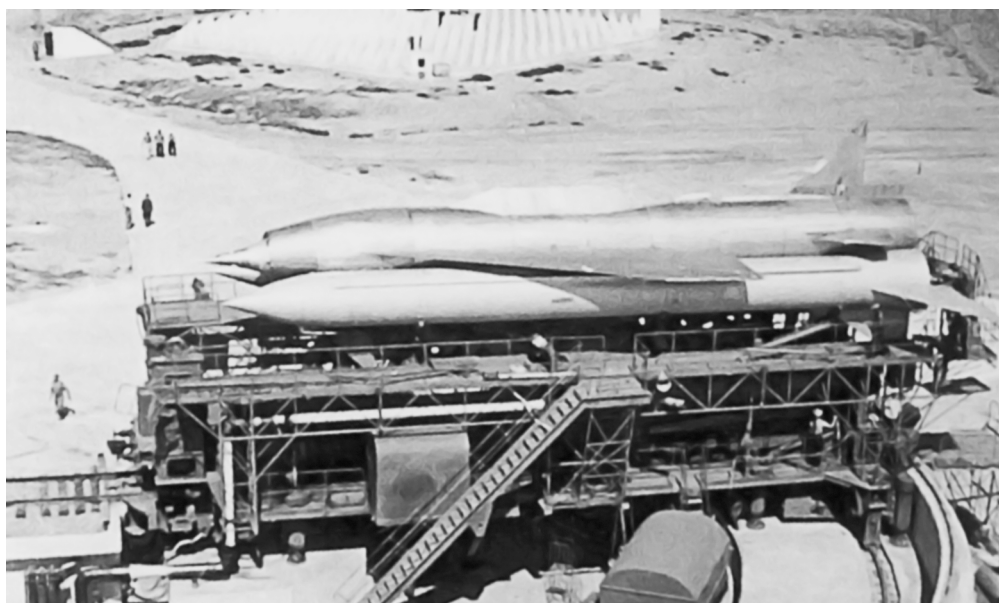
обеспечивал его «наукой». Но было еще одно направление, которое, по расчетам Келдыша и его сотрудников, тоже было весьма перспективным – это крылатые ракеты. По Постановлению правительства координацию научно-исследовательских работ было поручено осуществлять НИИ-1. Предполагалось, что две ракеты «Буря» и «Буран» будут создаваться в авиационных КБ.

Крылатая «Буря» досталась авиаконструктору С.А. Лавочкину<sup>13</sup>, а «Буран» – В.М. Мясищеву<sup>14</sup>. К сожалению, работы по «Бурану» были прекращены уже через пару лет – не хватало средств, а перспективы развития этого направления были неясны. К «Бурану» ученые и конструкторы вернутся через четверть века, и его триумфальный космический полет 15 ноября 1988 г. докажет всему миру, что хорошие научные и инженерные решения не умирают...

У ракеты «Буря» судьба окажется совсем другой. Не менее драматичной, но

<sup>13</sup> Семён Алексеевич Лавочкин (1900–1960) – авиаконструктор, генеральный конструктор ОКБ-301 (ныне – НПО им. С.А. Лавочкина), генерал-майор инженерно-технической службы, член-корреспондент АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда, лауреат четырех Сталинских премий. Под его руководством созданы 32 типа самолетов-истребителей, зенитных управляемых ракет системы ПВО.

<sup>14</sup> Владимир Михайлович Мясищев (1902–1978) – авиаконструктор, генеральный конструктор ОКБ-23 (ныне – Экспериментальный машиностроительный завод им. В.М. Мясищева), генерал-майор инженерно-авиационной службы, доктор технических наук, профессор, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии. Под его руководством созданы межконтинентальный реактивный бомбардировщик М-4 и сверхзвуковой ракетно-носитель М-50, сверхзвуковая стратегическая крылатая ракета М-40 «Буран», проект первого в мире космоплана ВКА-23 (М-48).



*Межконтинентальная крылатая ракета «Буря» на стартовой площадке полигона Владимировка (Астраханская область). 12-й испытательный пуск, продолжительность полета составила 10 мин 17 с. 2 октября 1959 г. Фото НПО им. С.А. Лавочкина*

все же иной, потому что «Буря» начнет летать. Выглядела она весьма необычно: в центре ракета, а по бокам – ускорители. Стартовала «Буря» вертикально со специального лафета. Затем она начинала горизонтальный полет на высоте около 25 км, достигала заданной точки, снижалась до высоты 8 км, сбрасывался головной конус и ядерный заряд уходил к цели. Скорость полета «Бури» в три с лишним раза превышала скорость звука. Ничего подобного в мире не было. Американцы попытались создать крылатую ракету «Навахо», но в июле 1957 г. программу закрыли (последние неудачные запуски состоялись 11 сентября и 18 ноября 1958 г.), посчитав, что невозможно преодолеть технические трудности.

Первый пуск «Бури» (она значилась под кодом «350») состоялся 1 сентября 1957 г. Ракета взорвалась через несколько секунд неподалеку от стартового стола. Второй пуск – авария на

31-й секунде полета, третий – на 63-й, четвертый – на 81-й. Затем еще три неудачных пуска... И лишь девятая машина 28 декабря 1958 года совершила расчетный полет. Потом столь же удачным был 11-й старт. Дальность полета составила 1760 км, а скорость 3500 км/час. Затем на «Буре» появилась астронавигационная система наведения. 2 декабря 1959 г. ракета пролетела 4000 км и полностью выполнила программу полета. 5 февраля 1960 г. вышло Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о прекращении работ по проекту «Буря». Н.С. Хрущёв посчитал, что вполне достаточно тех баллистических межконтинентальных ракет Р-7 (8К71), Р-16 (8К64), УР-100 (8К84), которые создаются в конструкторских бюро С.П. Королёва, М.К. Янгеля и В.Н. Челомея. Оставалось еще пять экземпляров «Бури», а потому испытания крылатой ракеты были продолжены. 16 декабря 1960 г. состоялся



последний пуск. Максимальная дальность полета «Бури» составила 6500 км. Американцы, которые внимательно следили за испытаниями машины, называют ее до нынешнего дня «самолет-пуля», они до сих пор не могут понять, почему эти работы были прекращены.

М.В. Келдыш и С.А. Лавочкин попытались доказать руководству страны, что следует продолжить работы по проекту, так как очень много новых технологий и изобретений уже получено – ведь ученые вторглись в принципиально новую область техники, но денег в стране катастрофически не хватало. С.П. Королёв со своими ракетами вышел в лидеры. И это был единственный, пожалуй, верный выход.

Конечно же, Мстислав Всеволодович переживал, что проект «Буря», которому он отдал десять лет жизни, был закрыт. Однако он прекрасно знал финансовые возможности страны, технический уровень промышленности и ее возможности. Будучи Президентом АН СССР, ему не раз приходилось принимать жесткие, подчас непопулярные решения. Однажды он даже повздорил со своим близким другом Сергеем Павловичем Королёвым. Тот создавал сверхмощную ракету «Н-1» стартовой массой 2750 т, считал, что другие носители не нужны. Другой главный конструктор академик В.Н. Челомей<sup>15</sup> предложил свой вариант тяже-

<sup>15</sup> Владимир Николаевич Челомей (1914–1984) – конструктор ракетно-космической техники, ученый в области механики и процессов управления, генеральный конструктор ОКБ-52 (ныне – АО «ВПК «НПО машиностроения»), академик АН СССР, профессор, дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии и трех Государственных премий СССР. Под его руководством созданы самолеты-снаряды, крылатые ракеты, межконтинентальные баллистические ракеты УР-100



*Американская экспериментальная крылатая ракета большой дальности «Навахо» (MX-770/XSM-64 Navaho) на стартовом комплексе базы ВВС США на мысе Канаверал. 26 июня 1957 г. Фото Wikimedia Commons*

лого носителя УР-700. Келдыш поддержал его, на что Королёв, конечно же, обиделся, мол, зачем помогать конкуренту?! Но Мстислав Всеволодович интересы страны всегда ставил выше амбиций любых главных конструкторов и академиков. Он умел прогнозировать будущее. Его решение о помощи Челомею до нынешнего дня весьма актуально: ракеты-носители «Протон», которые стартуют с 1965 г. и сегодня выводят на орбиты тяжелые грузы, как раз те самые ракеты, которые создавались в 1960-е годы в КБ В.Н. Челомея. А заветная мечта Королёва об «Н-1» так и погибла в четырех аварийных пусках этой ракетной машины...

и УР-200, ракеты-носители «Протон», ИСЗ «Протон» и «Полет», орбитальные станции «Салют-3», «Салют-5» и комплекс «Алмаз».



*Ракета «Буря» в полете. Рисунок из книги В.П. Лукашевича и И.Б. Афанасьева «Космические крылья». М.: Лента Странствий, 2009 г.*

Новое испытание для М.В. Келдыша наступило в начале 1970-х годов, когда Л.И. Брежнев назначил его Председателем Правительственной комиссии, которой предстояло определить «ракетное будущее» страны.

28 августа 1969 г. неподалеку от Ялты, на бывшей даче Сталина, состоялось заседание Совета обороны СССР. Два главных конструктора В.Н. Челомей и М.К. Янгель предлагали концепции развития боевых ракетных комплексов. Этот день историки постараются описать как можно подробнее, но участники совещания в Крыму не станут подробно рассказывать о случившемся – и спустя годы государственные секреты того времени останутся секретами. Мне удалось восстановить события тех дней.

Ситуация становилась критической, так как американцы начали наращивать свой ядерный потенциал и создавать системы противоракетной обороны. Баланс сил нарушался стремительно. Что можно противопоставить этому?

– Казалось бы, Мстислав Всеволодович Келдыш держал нейтралитет, –

рассказывал мне дважды Герой Социалистического Труда академик Владимир Фёдорович Уткин<sup>16</sup>. – Вел он себя так, потому что был Председателем комиссии. Шла борьба между Челомеем и Янгелем. С одной стороны были Челомей, Сергеев, Кузнецов, Бармин, два министра – Афанасьев и Гречко. С нашей – Бочков, наземщик, Мозжорин – директор ЦНИИМаш<sup>17</sup>, заместитель министра Тюлин, министр Устинов, секретарь ЦК Смирнов, Пилюгин, Глушко и я.

– Из-за чего шла война?

– Мы считали, что в шахту Челомея можно поставить более легкую машину, но с большими энергетическими ресурсами, причем требовалась лишь минимальная доработка благодаря «минометному старту» и другим техническим решениям. В.Н. Челомей же считал, что шахту нужно разбирать и повышать ее защищенность за счет увеличения наружного диаметра. Объем работ в этом случае значительно увеличивался... Но главное в этом споре было то, что мы считали: надо обеспечить надежный ответный удар, неприемлемый для вероятного противника. И прежде всего, за счет упрочнения шахт. Но это лишь один при-

<sup>16</sup> В.Ф. Уткин (1923–2000) – ученый, конструктор ракетно-космической техники, главный конструктор и начальник КБ «Южное» (Днепропетровск, Украина), академик АН УССР и АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии. Под его руководством созданы ракеты: стратегическая Р-36М и твердотопливная РТ-23, ракеты-носители «Зенит» и «Циклон».

<sup>17</sup> Центральный научно-исследовательский институт машиностроения – головной институт госкорпорации «Роскосмос».

мер. Шел разговор о пороге защиты шахт, о замене одних комплексов на другие, по сути – о принципиальном развитии боевой ракетной техники. Нужно было спрогнозировать ситуацию в мире и отношения между двумя странами в будущем, а соответственно, и роль боевой техники, ее возможности. То был необычайно важный разговор о судьбах обороны страны, ее гибкости и адекватности. Надо было определить, как защищать свои ракеты, как преодолевать противоракетную оборону американцев. Все это – принципиальные проблемы, так что от победы в «гражданской войне» зависело очень многое. Только гарантированный ответный удар отвечал доктрине сдерживания.

Я спросил академика В.Ф. Уткина:

– Это правда, что Келдыш сразу же поддержал Янгеля?

– Да. И не только на том Совете в Крыму. Когда не стало Михаила Кузьмича и я возглавил КБ «Южное», Мстислав Всеволодович активно помогал нам. Во многом благодаря его поддержке мы и создали СС-18 (РС-20 «Воевода», Р-36М), ту самую, тяжелую ракету, которую американцы называли «Сатаной».

– Почему они так ее не любят?

– Это очень мощное и грозное оружие...

Келдыш очень редко давал интервью. Мол, не любил журналистов – утверждают некоторые. Но это не так: просто



Академик В.Н. Челомей. 1970-е гг.



▲ Владимир Фёдорович Уткин – создатель ракетно-ядерного щита России. 1980-е гг.



Мстислав Всеволодович Келдыш ▲

у него не было времени даже на свою любимую науку – математику. Но однажды он все-таки обратился к молодым, и это стало его своеобразным завещанием потомкам. Он сказал так: «Продвижение в науке невозможно без преодоления трудностей. Наука требует героизма. Но это как раз то, чего ищет молодость, то, в чем она видит счастье. Она несет с собой уверенность, что сумеет вписать новые страницы в книгу истории. И это прекрасно. Наука открывает необозримое поле деятельно-



Памятник академику М.В. Келдышу на Аллее Героев космоса в Москве. Скульптор Ю.Л. Чернов. Открыт 25 декабря 1981 г.

сти, и никогда нельзя будет сказать, что все уже открыто, что окончательно решены все проблемы. Такого огромного значения для всей жизни людей, как сейчас, наука никогда еще не имела. Идет непрекращающийся интенсивный процесс изменения жизни человечества под влиянием тех грандиозных достижений, каких добивается наука. Процесс этот нарастает, как вал. На наших глазах неузнаваемо изменилась жизнь на Земле. Планета как бы стала теснее, меньше. И человечество смогло осознать себя именно как человечество

в целом. Это изменение внесено новыми достижениями науки, теми принципиальными вехами в ее развитии, свидетелями которых мы были. Например, изобретение самолета имело последствия более важные, чем только создание нового вида транспорта. Точно так же общечеловеческое значение радио превосходит его чисто техническое применение. Мощные средства связи и средства сообщения открывают широчайшие возможности коммуникаций в масштабе всей планеты. Еще важное направление деятельности людей науки – живая природа. Жизнь чрезвычайно сложна и разнообразна. Вместе с тем надо помнить, что все в природе соединено тончайшими связями. И поэтому исследование природы должно идти комплексно, так, чтобы не нарушать этих связей; надо постигать природу, не разрушая ее, а сохраняя и улучшая. Наука вселяет в нас оптимизм. Надо видеть в науке силу, которая преобразует мир».

К сожалению, в нынешних школьных учебниках я не нашел даже упоминания о М.В. Келдыше.

В Москве есть носящая его имя площадь и памятники великому ученому на Аллее Героев космоса и на Миусской площади перед Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. В Риге, где родился М.В. Келдыш, установлен бюст, открыты мемориальные доски и музеи, названы улицы, научно-исследовательское судно, авиалайнер, кратер на Луне и астероид, награды и стипендия.

Впрочем, гении не нуждаются в почитании, память о них нужна нам, живущим, и тем, кто придет нам на смену. Когда рвется ниточка памяти, протянутая из прошлого в будущее, нация деградирует и погибает. Помним ли мы об этом?

## СУДЬБА ГАГАРИНСКОГО ОТРЯДА

ПОНОМАРЁВА Валентина Леонидовна\*,

кандидат технических наук

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

DOI: 10.7868/50044394821020079

*Времена не выбирают,  
В них живут и умирают.*

*А.С. Кушнер*

**Д**нем рождения первого отряда космонавтов считается 7 марта 1960 г., когда приказом Главкома ВВС маршала К.А. Вершинина на должности слушателей-космонавтов Центра подготовки космонавтов (ныне – им. Ю.А. Гагарина в Звездном городке) были назначены первые 12 человек. Полностью отряд был сформирован 7 июня 1960 г. В него вошли 20 человек:

1. Аникеев Иван Алексеевич – опыта космических полетов не имеет;
2. Беляев Павел Иванович – летчик-космонавт СССР № 10;
3. Бондаренко Валентин Васильевич – опыта космических полетов не имеет;
4. Быковский Валерий Фёдорович – летчик-космонавт СССР № 5;
5. Варламов Валентин Степанович – опыта космических полетов не имеет;
6. Вольнов Борис Валентинович – летчик-космонавт СССР № 14;
7. Гагарин Юрий Алексеевич – летчик-космонавт СССР № 1;



*Кандидаты в отряд космонавтов в госпитале на этапе медицинского отбора: Г. Нелюбов, Г. Титов, А. Николаев, В. Горбатко, Ю. Гагарин, И. Аникеев, А. Леонов, В. Быковский и П. Попович. Москва, октябрь 1959 г. РГАНТД. Ф. 211, оп. 7, д. 325*

\* Летчик, ученый, космонавт-испытатель, в 1962–1969 гг. член отряда космонавтов ЦПК ВВС, дублер В.В. Терешковой. Имеет звание инженера-полковника, действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского.

8. Горбатко Виктор Васильевич – летчик-космонавт СССР № 21;
9. Заикин Дмитрий Алексеевич – опыта космических полетов не имеет;
10. Карташов Анатолий Яковлевич – опыта космических полетов не имеет;
11. Комаров Владимир Михайлович – летчик-космонавт СССР № 7;
12. Леонов Алексей Архипович – летчик-космонавт СССР № 11;
13. Нелюбов Григорий Григорьевич – опыта космических полетов не имеет;
14. Николаев Андриян Григорьевич – летчик-космонавт СССР № 3;
15. Попович Павел Романович – летчик-космонавт СССР № 4;
16. Рафиков Марс Закирович – опыта космических полетов не имеет;
17. Титов Герман Степанович – летчик-космонавт СССР № 2;
18. Филатьев Валентин Игнатьевич – опыта космических полетов не имеет;
19. Хрунов Евгений Васильевич – летчик-космонавт СССР № 16;
20. Шонин Георгий Степанович – летчик-космонавт СССР № 17.

Судьба космонавтов первого отряда, и человеческая, и космическая, сложилась по-разному. Восемь человек из двадцати по разным причинам сошли с дистанции, остальные двенадцать дошли до финиша и совершили космические полеты (пятеро по одному, пятеро по два и двое по три; ЗиВ, 2001, №№ 1–6; 2011, № 2)<sup>1</sup>. У одних профессиональная судьба складывалась благополучно, без особых потрясений, другие побывали на грани гибели, двое погибли.

Начать хочу с первого трагического события, которое произошло в отряде космонавтов перед самым началом пилотируемых полетов. 16 марта 1961 г. первая шестерка космонавтов (или, как она называлась в официальных документах «специальная группа») вылетела на космодром, остальные продолжали работать в Центре подготовки космонавтов (в/ч 26266; ЦПК) по расписанию. Буквально через неделю после их отлета, 23 марта, при испытаниях в сурдобарокамере погиб Валентин Бондаренко, самый молодой член отряда.

<sup>1</sup> Советские и российские космонавты. 1960–2000 гг. Справочник. Под общей редакцией Ю.М. Батурина. Авторы-соавители И.А. Маринин, С.Х. Шамсутдинов, А.В. Глушко. М.: Информационно-издательский дом «Новости космонавтики», 2001.



*В.В. Бондаренко. Конец 1950-х гг.*

**Бондаренко** Валентин Васильевич родился 16 февраля 1937 г. в Харькове на Украине в семье начальника цеха меховой фабрики, ушедшего с первых дней войны на фронт. Вместе с матерью жил во время немецкой оккупации в Харькове. В 1957 г. окончил Армавирское военно-авиационное училище летчиков, проходил службу в авиационных частях Прибалтийского военного округа в г. Каунас (общий налет составил 288 часов). В 1959 г. ему присвоено звание старший лейтенант. С марта 1960 г. проходил подготовку к космическому полету на КК «Восток». Увлекался футболом и настольным теннисом, любил петь (у него был хороший музыкальный слух и прекрасный голос).

Я узнала об этом так: в первое мое утро в ЦПК вызвал меня для беседы начальник Центра полковник медицинской службы Евгений Анатольевич Карпов. Над его столом рядом с портретом Юрия Гагарина висел протрет молодого человека в военной форме. Смотрела на портрет и ломала голову – кто же это такой? Понятно, что летчик, но, чтобы иметь серьезные заслуги, слишком молод. Какое отношение он имеет к Гагарину? Карпов проследил за моим взглядом, но ничего не сказал.



*Валентин Бондаренко с женой Анной и сыном Сашей. 1957 г.*

Позже, немного освоившись, я спросила Леонова, и он мне рассказал, кто это и что с ним случилось: «После записи физиологических функций Валентин, сняв датчики, протирал кожу смоченным в спирте кусочком ваты. Потом бросил его в мусорную корзину, но промахнулся и попал на включенную электроплитку. Атмосфера в камере была кислородная, и огонь вспыхнул мгновенно. Быстро открыть массивную герметичную дверь было невозможно... Он прожил восемь часов, лежал, весь завернутый бинтами, в виде белого кокона. Сначала находился в сознании, и последней его заботой было: «Никого не вините». Когда привезли жену прощаться, она бросилась к его ногам, он сказал: «Анечка, это ноги...»

Слушать все это было жутко...

Память о Валентине отряд хранил свято. На служебных совещаниях, когда отмечались успехи или подводились очередные итоги, на всех застольях по поводу космических и некосмических праздников его вспоминали с любовью и болью. Когда Гагарин поминал Бондаренко, мы слушали благоговейно:

он был первый, кто погиб на этой дороге... 17 июня 1961 г. Указом Президиума Верховного Совета СССР Валентин посмертно был награжден орденом Красной Звезды. Именем Бондаренко в 1991 г. назван один из кратеров на обратной стороне Луны, находящийся между кратерами Циолковский и Гагарин. В.В. Бондаренко похоронили в Харькове, где жили его родители, туда же перебралась его вдова с маленьким сыном Сашей. Отряд не выпускал их из поля зрения. Бывало, кто-нибудь, Гагарин или Попович, который был тогда секретарем партийной организации, говорили: «Скоро Новый год, надо послать подарок Саше Бондаренко», или: «Пришло письмо от Ани Бондаренко, она пишет...», когда требовалась помощь – помогали. Мир узнал о нем четверть века спустя. Но какие-то сведения об этой катастрофе в 1960-е годы все же просочились, и, может, они-то и послужили поводом для нелепых слухов о том, что наш первый космонавт погиб, а Гагарин был подставной фигурой. Когда молчат очевидцы, рождаются легенды. А очевидцы молчали слишком долго...



*Космонавты-слушатели  
первого отряда  
на физической подготовке  
(пятый справа – генерал-  
лейтенант Н.П. Каманин).  
Москва, 1960 г. РГАНТД.  
Арх. № 0-689 цв.*

## ВРЕМЕНА НЕ ВЫБИРАЮТ

Не знаю, до какого времени первый отряд существовал в структуре ЦПК как отдельная административная единица, да это и не важно. В моем представлении (думаю, что и не только в моем) он был и остался настоящей и как бы особой командой, несмотря на новые наборы и все объединения и реорганизации, которые претерпел отряд космонавтов за прошедшие десятилетия. В общественном сознании самопроизвольно возникло и утвердилось за этой командой название «Гагаринский отряд». На долю этого отряда выпала тяжелая и почетная задача быть первопроходцами космоса.



*Космонавты гагаринского  
отряда с членами женской  
группы: первый ряд –  
И. Аникеев, В. Пономарёва,  
П. Попович, В. Терешкова  
и И. Соловьёва; второй ряд –  
Г. Шонин, П. Беляев, Г. Титов,  
А. Николаев, Г. Нелюбов,  
Е. Хрунов, В. Комаров,  
Ю. Гагарин, Б. Вольнов,  
В. Горбатко и А. Леонов.  
1963 г.*

Начало профессиональной истории отряда было поистине триумфальным – в восьми полетах, выполненных в 1961–1965 годах на кораблях «Восток» и «Восход», впервые в мире были решены главные для

начала развития пилотируемой космонавтики ключевые задачи:

– подтверждено на практике, что человек в космическом аппарате может жить и работать, по крайней мере, в течение ограниченного времени;

– что он может выйти из корабля, сохранив при этом нормальное состояние психики и способность производить определенные действия в открытом космическом пространстве. В моем понимании это и была та самая точка опоры, встав на которую, можно «перевернуть Землю» (или как там говорил Архимед). А дальше – дело техники: определить пути развития и решать разнообразные проблемы, которых было целое море, если не океан. На этом этапе и мы, и американцы –



*Космонавты на  
теоретических занятиях,  
слева направо: Г. Нелюбов,  
А. Николаев, П. Попович,  
В. Быковский, Ю. Гагарин;  
1960 г. РГАНТД. Ф. 211, оп. 7,  
д. 334*



двигались по одной и той же дороге, потому что тогда другой дороги и не было.

Это было время жесткого противостояния нашей страны и США в космосе. И для нас, и для американцев этот период был очень напряженным, но в целом благополучным: отказы и аварии имели место, но потерь не было.

В 1965–1967 гг. у нас возникла длинная пауза в полетах, во время которой американцы в качестве первого этапа отработки лунной программы реализовывали свою программу «Джемини» (ЗиВ, 1965, № 6; 1966, №№ 3, 5).

Потом случился трагический шестидесят седьмой год – и у них, и у нас.

У них 27 января 1967 г. на стартовой позиции во время плановой тренировки на новом корабле «Аполлон-1» из-за пожара погибли астронавты В. Гриссом, Р. Чаффи и Э. Уайт (ЗиВ, 1968, № 2; 2017, № 3, с. 58–59; 2018, № 4, с. 103–106). У нас при испытаниях нового корабля «Союз-1» 24 апреля 1967 г. при спуске с орбиты погиб летчик-космонавт СССР В.М. Комаров (ЗиВ, 1967, № 3; 2001, № 3, с. 53; 2017, № 3; 2020, № 4).

Это был очень тяжелый удар, но надо было жить дальше.

Запуски возобновились с конца 1968 г.: в начале октября состоялся первый испытательный пилотируемый полет корабля «Аполлон-7» (ЗиВ, 1969, №№ 2, 4), а в конце – первый пилотируемый полет «Союза-3», в котором планировалась и не получилась стыковка (ЗиВ, 1968, № 6). Но уже в январе 1969 г. мы

взяли реванш: впервые в мире была выполнена стыковка на орбите пилотируемых кораблей «Союз-4» и «Союз-5» (ЗиВ, 1969, № 2)<sup>2</sup>.

Однако после этого успеха настали тяжелые времена: аварии и неудачи преследовали нас, можно сказать, по пятам. К этому времени в строй вошли космонавты второго набора, которые вместе с первым отрядом принимали участие в подготовке и полетах, преодолевая все тяготы этого периода. К середине 1970-х годов ситуация нормализовалась, начались полеты на орбитальных станциях «Салют».

Такие вот разные были времена в истории Гагаринского отряда – триумфальные и трагические, чрезвычайно сложные и просто рабочие. Впрочем, в истории пилотируемой космонавтики они всегда такие – были, есть и, наверное, будут. Я не претендую ни на какие открытия, просто хочу связать человека со временем, т. е. поименно рассказать о каждом космонавте первого отряда – какое кому досталось время, и что судьба в этом времени ему уготовила.

<sup>2</sup> Мировая пилотируемая космонавтика. История, техника, люди. Энциклопедия. Под ред. Ю.М. Батурина. М.: РТ-Софт, 2005.

Надеюсь, что из этого рассказа сложится цельное представление о судьбе отряда. Краткие биографические данные космонавтов первого отряда за одним исключением приводятся в том порядке, в каком они в первый раз поднимались в космос<sup>3</sup>.

В начальный период пилотируемых полетов по программе «Восток» (1961–1963) был решен еще ряд принципиально важных для дальнейшего развития космонавтики задач, таких как увеличение сложности и длительности полета, возможность пространственной ориентации человека в условиях невесомости, полет в составе экипажа и других.

---

## ОНИ БЫЛИ ПЕРВЫМИ

---



Юрий Гагарин, Герман Титов и Григорий Нелюбов на Красной площади. Москва, 4 апреля 1961 г. Снимок фотохроники ТАСС

---

**Гагарин** Юрий Алексеевич (9.03.1934–27.03.1968), количество полетов – 1, длительность – 108 мин. Родился в с. Клушино Гжатского р-на Смолен-

<sup>3</sup> Интернет-сайт: <http://astronaut.ru/index.htm>. Герасютин С.А., Левитан Е.П. России звездные сыны. 100 первых отечественных космонавтов. Малая энциклопедия космонавтики. 2-е изд., доп. М.: Гелиос, 2007.

ской обл. в семье колхозников, отец – участник Великой отечественной войны. В 1949 г. поступил и в 1951 г. с отличием окончил Люберецкое ремесленное училище № 10 по специальности «литейщик», в 1955-м, тоже с отличием – Саратовский индустриально-педагогический техникум Министерства трудовых резервов СССР. Занимался в аэроклубе г. Саратова. После окончания в 1957 г. Оренбургского военного авиационного училища летчиков им. В.П. Чкалова служил военным летчиком в частях истребительной авиации Северного ВМФ. Свой первый в мире исторический полет длительностью 108 минут совершил 1 апреля 1961 г. на корабле «Восток». В 1963 г. – командир отряда космонавтов, затем заместитель начальника ЦПК по летно-космической подготовке, с сентября 1963 г. по апрель 1967 г. проходил подготовку в качестве командира корабля «Союз-1», был дублером В.В. Комарова. Погиб 27 марта 1968 г. в авиакатастрофе во время тренировочного полета на самолете УТИ МиГ-15 (ЗиВ, 2004, № 2)<sup>4</sup>.

**Титов** Герман Степанович (11.09.1935–20.09.2000), количество полетов – 1 (КК «Восток-2»), длительность – 1 сут 01 ч 18 мин. Родился в с. Верхнее Жилино Косихинского р-на Алтайского края, отец – учитель, участник Великой отечественной войны, мать – домохозяйка. В 1957 г. окончил с отличием Сталинградское военное авиационное училище летчиков, служил в авиачастях Ленинградского военного округа. Был дублером Ю.А. Гагарина. 6–7 августа совершил первый в мире длительный полет на корабле «Восток-2». В 1966–1970 гг. готовился

<sup>4</sup> Первый пилотируемый полет. Российская космонавтика в архивных документах. Под редакцией В.А. Давыдова. В 2-х тт. М.: Родина МЕДИА, 2011.

по программе «Спираль», в 1967 г. в ходе подготовки принимал участие в испытаниях самолетов МиГ-21, Су-7, Су-9, Су-11, Як-28. В 1970 г. по собственному желанию ушел из отряда и поступил в Военную академию Генерального штаба Вооруженных Сил СССР, которую в 1972 г. окончил с отличием. Впоследствии

занимал ряд руководящих должностей в Министерстве обороны СССР. В 1962–1963 гг. состоялись два групповых полета кораблей «Восток-3» – «Восток-4» (Николаев – Попович) и «Восток-5» – «Восток-6» (Быковский – Терешкова).

**Николаев** Андриян Григорьевич (5.09.1929–03.07.2004), количество полетов – 2, общая длительность – 21 сут 15 ч. Родился в дер. Шоршелы Чувашской АССР в семье колхозников. В 1947 г. окончил Мариинско-Посадский лесотехнический техникум, работал мастером в Карелии. В 1954 г. окончил Фрунзенское военное авиационное училище летчиков, служил в частях ВВС. Первый полет совершил 1–15 августа 1962 г. на КК «Восток-3» в качестве пилота. В 1963–1968 гг. – командир отряда космонавтов. В 1965–1967 гг. готовился к полету в составе дублирующего экипажа на КК «Союз» по программе «Стыковка». Второй полет в качестве командира корабля «Союз-9» выполнил 1–18 июня 1970 г., установив мировой рекорд длительности полета (17 сут 17 ч) (бортинженер В.И. Севастьянов). В 1974–1992 гг. – первый заместитель начальника ЦПК. В 1982 г. ушел из отряда космонавтов.



Пилоты КК «Восток» и «Восток-2» Юрий Гагарин и Герман Титов в скафандре СК-1 перед полетом. 1961 г. Снимки фотохроники ТАСС

**Попович** Павел Романович (5.10.1930–30.09.2009), количество полетов – 2, общая длительность – 18 сут 16 ч. Родился в с. Узин Киевской обл.; отец – кочегар на сахарном заводе, мать – домохозяйка. В 1951 г. окончил Магнитогорский индустриальный техникум, в 1954 г. – Качинское военное авиационное училище летчиков, служил в авиационных частях. Первый полет совершил 12–15 августа 1962 г. на КК «Восток-4» в качестве пилота. Вторым полетом выполнил 3–19 июля 1974 г. в качестве командира экспедиции на станцию «Салют-3» («Алмаз»). Бортинженер Ю.П. Артюхин. В 1982 г. ушел из отряда космонавтов, работал в ЦПК заместителем начальника по научно-испытательной работе.



Павел Попович и Андриян Николаев. ЦПК, июль 1962 г.



Полковник авиации  
В.Ф. Быковский.  
Конец 1960-х гг.



Инженер-полковник  
В.М. Комаров.  
1966 г.

**Быковский** Валерий Фёдорович (2.08.1934–27.03.2019), количество полетов – 3, общая длительность – 20 сут 17 ч. Родился в г. Павловский посад Московской обл. в семье сотрудника КГБ. В 1955 г. окончил Качинское военное авиационное училище летчиков, затем служил в частях ВВС. Первый полет совершил 14–19 июня 1963 г. на КК «Восток-5». Установил мировой рекорд длительности полета для одноместных кораблей (4 сут 23 ч). Назначен командиром экипажа КК «Союз-2», который



А.А. Леонов и П.И. Беляев. 1964 г. Снимок фотохроники ТАСС

должен был стартовать 24 апреля 1967 г для стыковки с запущенным ранее КК «Союз-1», но запуск отменили. Второй полет в качестве командира корабля «Союз-22» совершил 15–23 сентября 1976 г. (бортинженер В. Аксенов). В ходе полета проводились испытания многозональной фотокамеры МКФ-6 производства ГДР. Третий полет совершил по программе «Интеркосмос» 26 августа – 3 сентября 1978 г. в качестве командира экспедиции посещения станции «Салют-6» с Зигмундом Йеном (Германская демократическая республика). В 1982 г. уволился из отряда, служил на различных руководящих должностях в ЦПК.

Следующим шагом в исследовании и освоении космического пространства была программа «Восход» – первый в мире полет космического экипажа и выход человека в открытый космос (1964–1966). Полет КК «Восход» состоялся 12–13 октября 1964 г., экипаж состоял из трех человек: командир – инженер-полковник В.М. Комаров, бортинженер – К.П. Феоктистов, инженер-конструктор ОКБ-1 (ныне – РКК «Энергия» им. С.П. Королёва), и врач Б.Б. Егоров. Этот полет закончился благополучно, хотя и был недопустимо рискованным.

Полет корабля «Восход-2» с выходом человека в открытый космос 18–19 марта 1965 г. был важнейшим этапным шагом в развитии мировой кос-

монавтики. Командир экипажа – П.И. Беляев, второй пилот – А.А. Леонов.

**Беляев** Павел Иванович (26.06.1925–10.01.1970), количество полетов – 1, длительность – 1 сут 02 ч. Родился в с. Челищево Новгородской обл. в семье военнослужащего, воевавшего в Первую мировую войну и на Халкин-Голе. В 1943 г. добровольно вступил в ряды Красной Армии и был направлен на летную подготовку. В 1945 г. окончил Ейское военное авиационное училище летчиков (ныне им. В.М. Комарова), участвовал в боевых действиях на Дальнем Востоке, затем продолжил службу в ВВС. В 1959 г. окончил Военно-воздушную академию (ныне им. Ю.А. Гагарина). Полет на КК «Восход-2» совершил 18–19 марта 1965 г. В 1966–1967 гг. проходил подготовку к полетам по программам «Алмаз» и Л-1 (облет Луны). В 1968–1970 гг. служил на руководящих должностях в ЦПК.

П.И. Беляев совершил всего один космический полет, но думаю, что такой психологической напряженности, которую ему довелось испытать во время выхода А.А. Леонова, ни в одном из предыдущих полетов не было. Это как на войне, когда бортмеханик провожает своего командира на боевой вылет, а сам остается на земле ждать его возвращения...

Существует легенда, что перед полетом С.П. Королёв спросил Беляева, готов ли он, если Леонов не сможет вернуться в корабль, отстрелить шлюз с ним вместе, чтобы обеспечить себе возможность посадки. Павел Иванович сразу и категорически ответил – нет. И тогда Королёв сказал: «Значит, вы к полету не готовы». Случайным сви-



*Главный конструктор С.П. Королёв и командир КК «Восход-2» П.И. Беляев. Космодром Байконур, 18 марта 1965 г. Снимок фотохроники ТАСС*

детелем этого разговора оказался сотрудник Центра подготовки Р.В. Богдановский. Потом я видела его публикацию в какой-то газете, тогда этому не поверила, и сейчас не верю. Мне кажется, единственный вариант (если этот разговор все-таки был) – Королёв ожидал именно такого ответа: он хотел убедиться, что Беляев, не думая о себе, сделает все возможное и невозможное, чтобы спасти товарища.

В этом полете возникло несколько нештатных ситуаций, самой серьезной из которых был отказ системы ориентации, вследствие чего Беляеву пришлось спускаться вручную – впервые в истории космонавтики. Как рассказал потом Беляев, перед полетом он просил у Королёва разрешения на ручную посадку, но получил ответ – ни в коем случае! Но судьба распорядилась иначе.

**Леонов** Алексей Архипович (30.05.1934–11.10.2019), количество полетов – 2, общая длительность – 7 сут. Родился в с. Листвянка Кемеровской обл. в семье электрослесаря-железнодорожника. В 1957 г. окончил Чугуевское военное авиационное училище летчиков, затем служил в частях ВВС. Первый полет выполнил 18–19 марта 1965 г. на корабле

«Восход-2». Впервые в мире он вышел из корабля и провел в открытом космическом пространстве 12 мин 9 с. Второй полет совершил 15–21 июля 1975 г. в качестве командира корабля «Союз-19» по советско-американской программе ЭПАС («Союз–Аполлон»; бортинженер В.Н. Кубасов). В 1982–1991 гг. служил первым заместителем начальника ЦПК по летной и космической подготовке. Профессиональная судьба А.А. Леонова была не просто очень успешной, а можно сказать, уникальной. Первый полет на КК «Восход-2» был тяжелейшим, по счастью окончившимся благополучно несмотря на ряд нештатных и аварийных ситуаций, в том числе грозящих катастрофой. В 1970–1971 гг. Леонов проходил подготовку по программе первой экспедиции на орбитальную станцию «Салют-1» в качестве командира экипажа. Однако на стартовой позиции неожиданно обнаружилось заболевание бортинженера В.Н. Кубасова. В советской космонавтике это был первый случай замены экипажа на стартовой позиции. Леонов упорно боролся за то, чтобы заменить только заболевшего бортинженера, но Государственная комиссия после долгих споров решила заменить весь экипаж. При спуске с орбиты после успешного выполнения программы полета они погибли из-за нештатного открытия воздушного клапана. Второй полет по программе ЭПАС – это была первая международная пилотируемая программа, в которую входила стыковка «Союза-19» и «Аполлона» и проведение научных и технологических экспериментов в совместном полете.

---

## 1967 – ТРАГИЧЕСКИЙ ГОД КОСМОНАВТИКИ

---

Неудачи начались с начала года: неудачами закончились испытательные полеты новых кораблей по лунной про-

грамме: 7–9 февраля «Союз» (7К-ОК № 3; «Космос-140»), 10 марта ЛОК № 2П (11Ф91, 7К-Л-1; «Космос-146»), 8 апреля ЛОК № 3П (11Ф91, 7К-Л-1; «Космос-154»), 24 апреля при спуске с орбиты на «Союзе-1» (7К-ОК № 4) погиб летчик-космонавт В.М. Комаров.

**Комаров** Владимир Михайлович (16.03.1927–24.04.1967), количество полетов – 2, общая длительность – 2 сут 03 ч. Родился в Москве в семье рабочего, участника Великой отечественной войны. В 1949 г. окончил Батайское военное авиационное училище летчиков, служил в различных частях ВВС. В 1959 г. окончил Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского. Первый полет совершил 12–13 октября 1964 г. в качестве командира первого в мире космического экипажа на корабле «Восход». В 1965–1967 гг. готовился к полету в качестве командира КК «Союз-1» по программе «Стыковка». 23 апреля 1967 г. стартовал на орбиту, но дальнейший полет и выполнение программы оказалось невозможным из-за отказа ряда технических систем, погиб из-за отказа парашютной системы. Посмертно награжден второй Золотой медалью Героя Советского Союза, его именем названы кратер на Луне и малая планета № 1836, улицы, проспекты и площади, открыты памятники и музеи.

Вот как описывает эти события сподвижник Королёва академик Борис Евсеевич Черток (ЗиВ, 2007, № 2). Программа испытаний включала запуск двух кораблей «Союз» с интервалом в сутки, проверку работы бортовых систем и проведение операции сближения и стыковки в автоматическом режиме. Первый запуск 28 ноября 1966 г. прошел успешно, однако из-за отказов в системе управления сближение и стыковка со вторым кораблем оказались невозможными. Снижение происходило по нештатной траектории, и корабль был подорван, так как

сел бы вне территории Советского Союза – это категорически не допускалось. Второй запуск 14 декабря не состоялся – система обнаружения неисправностей ракеты-носителя из-за принципиальных недоработок сформировала ошибочный сигнал аварии. Система аварийного спасения блестяще справилась со своей задачей, отделив спускаемый аппарат от ракеты и благополучно опустив на парашюте, но ракета загорелась от выхлопа двигателей, а потом взорвалась.<sup>5</sup>

Было принято решение запустить еще один корабль – одиночный (запуск 7 февраля 1967 г.). Полет был выполнен полностью, от запуска до посадки. Но и его вряд ли можно было считать успешным: как пишет Черток, «...он набрал такое число отказов по различным системам, что впору было после тщательного их разбора и доработок готовить повторный пуск, чтобы наконец-то иметь чистый беспилотный полет».

Корабль приземлился на территории Советского Союза, на лед Аральского моря. Лед под ним растаял, и корабль утонул. Его извлекли из воды, осмотрели и обнаружили, что днище корабля прогорело (отверстие 25 × 35 см), как выяснилось, из-за конструкторской ошибки. Причину прогара устранили, считая, что все в порядке. На четвертом корабле полетел Комаров...

На орбитальном участке полета корабля «Союз-1» возникла целая цепь аварийных ситуаций: не раскрылась одна панель солнечной батареи. Солнечно-звездный датчик оказался ею закрыт, из-за чего основная система ориентации была выключена из работы; резервная система давала сбой. Комаров делал неоднократные попытки выполнить «закрутку на Солнце» для

подзарядки солнечных батарей, но безуспешно; включал систему ориентации на ионных датчиках и снова наблюдал сбой. Запасы топлива и электроэнергии на борту стремительно убывали. Конечно, он понимал, что его возвращение на Землю под вопросом, но его доклады были спокойными и четкими. В прессе сообщалось, что все идет нормально. Но спуск в автоматическом режиме не прошел: Комаров доложил, что ориентация опять сорвалась, и автоматика выдала запрет на включение тормозного двигателя. Времени оставалось совсем мало – один, максимум два витка...

В Центре управления полетами в условиях ужасного стресса и жестокого дефицита времени разработали нестандартный и весьма непростой алгоритм ручного управления, к которому космонавты, конечно же, не готовились. Гагарин, безотлучно находившийся в Центре управления полетами, по радио передал на борт инструкцию. Теперь все зависело от самообладания и безошибочных действий Комарова<sup>6</sup>. Неоднократные попытки спустить корабль в автоматическом режиме ни к чему не привели. Комаров справился с задачей – вручную по очень сложному алгоритму перевел корабль на траекторию спуска. Но с тем, что произошло дальше, он ничего сделать не мог – отказала парашютная система (ЗиВ, 2020, № 4).

На 1968–1969 гг. пришлась самая острая фаза нашего противостояния с США – лунная гонка. У нас он начался с испытаний аналога облетного лунного корабля «Зонд» и отработки операции сближения и стыковки на кораблях «Союз» в интересах лунной программы. У американцев – с первого

<sup>5</sup> Черток Б.Е. Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны. М.: Машиностроение. 1997. С. 421–430.

<sup>6</sup> Черток Б.Е. Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны. М.: Машиностроение. 1997. С. 436–439.



Экипажи кораблей «Союз-4» и «Союз-5»  
В.А. Шаталов, Е.В. Хрунов, А.С. Елисеев  
и Б.В. Волинов во время тренировок в ЦПК.  
1968 г.

пилотируемого испытательного полета КК «Аполлон-7».

16 января 1969 г. впервые в мире на околоземной орбите состоялась стыковка пилотируемых кораблей «Союз-4» (командир – космонавт второго отряда В.А. Шаталов) и «Союз-5» (командир Б.В. Волинов, экипаж Е.В. Хрунов и А.С. Елисеев) и переход двух космонавтов из одного корабля в другой через открытое космическое пространство. Время перехода составило 37 мин.

**Волинов** Борис Валентинович (2.08.1934, г. Иркутск), количество полетов – 2, общая длительность – 52 сут 07 ч. В 1956 г. окончил Сталинградское военное авиационное училище, затем служил в авиационных частях ПВО. Первый полет совершил 15–18 января 1969 г. в качестве командира корабля «Союз-5». Спуск КК «Союз-5» с орбиты был аварийным: от спускаемого аппарата не отделился приборно-агрегатный отсек, связь начала беспорядочно кувиркаться, и вместо того, чтобы дви-



Командир КК «Союз-5»  
Борис Волинов в скафандре  
«Ястреб». ЦПК, 1968 г.

гаться теплозащитным экраном вниз, аппарат подставлял потоку плазмы свои незащищенные «бока». На такие тепловые нагрузки корабль не был рассчитан. Начала гореть теплоизоляция, в кабине появился дым. Надежды не было: стенки корабля неизбежно прогорят, это только вопрос времени. Преодолев страх и растерянность первых секунд, он начал упаковывать бортжурнал и наговаривать на магнитофон отчет о том, что происходит – возможно, бесценная информация уцелеет. Он видел за стеклом иллюминатора бушующее пламя, жара в кабине становилась невыносимой, но он продолжал вести репортаж. И вдруг взрыв – в результате нагрева приборно-агрегатный отсек наконец оторвался. Спускаемый аппарат закрутило, но потом он сориентировался теплозащитным экраном вниз, и опасность миновала. Парашют ввелся нормально, однако вращение корабля вокруг продольной оси не прекратилось, стропы закручивались и раскручивались до самой земли. Удар о землю получился зубодробительный – в прямом смысле этого слова<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Мировая пилотируемая космонавтика. История, техника, люди. Энциклопедия. М.: РТ-Софт, 2005. С. 90.



В этом полете Волюнов был на грани гибели. В Центре подготовки очень многие думали, что он не захочет больше летать, но он продолжил подготовку и летал. Второй полет совершил 6 июля – 24 августа 1976 г. в качестве командира первой экспедиции на станцию «Салют-5» по военной программе (бортинженер В.М. Жолобов). В 1969–1982 гг. – командир отряда космонавтов. Сейчас он единственный представитель Гагаринского отряда на планете Земля.

**Хрунов** Евгений Васильевич (10.09.1933–19.05.2000), количество полетов – 1, длительность – 2 сут. Родился в дер. Пруды Воловского р-на Тульской обл. в семье бригадира-тракториста. В 1953 г. окончил военно-авиационную школу, в 1956 г. – Батайское военное авиационное училище, затем служил в авиационных частях Одесского военного округа. Готовился к полетам на КК «Восток» и «Восход», дублировал Леонова по программе выхода в открытый космос. Принимал участие в программе стыковки кораблей «Союз-4» и «Союз-5». 14 января 1969 г. совместно с Волюновым и Елисеевым стартовал на корабле «Союз-4». После стыковки аппаратов вместе с Елисеевым вышел из корабля в открытый космос и по поверхности связки перешел в «Союз-4». Посадка 17 января. В 1980 г. ушел из отряда космонавтов по собственному желанию. 11–13 октября 1969 г. стартовали корабли «Союз-6» (командир – Г.С. Шонин, бортинженер – В.Н. Кубасов), «Союз-7» (командир – А.В. Филипчен-



*Евгений Хрунов и Дмитрий Заикин во время подготовки по программе «Выход». ЦПК, 1965 г. Снимок фотохроники ТАСС*

ко, экипаж В.Н. Волков и В.В. Горбатко) и «Союз-8» (командир – В.А. Шаталов, бортинженер – А.С. Елисеев) по программе отработки операции сближения и стыковки. Планировалось выполнить групповой полет, автоматическую стыковку кораблей «Союз-7» и «Союз-8», переходы космонавтов из одного корабля в другой. «Союз-6» должен был находиться поблизости и фиксировать все происходящее на киноплёнку. Но стыковка не состоялась из-за отказа системы управления. На следующий день была предпринята попытка состыковаться в режиме ручного управления, но она не удалась.

**Шонин** Георгий Степанович (3.08.1935–6.04.1997), количество полетов – 1, длительность – 4 сут 23 ч. Родился в г. Ровеньки Ворошиловградской обл., УССР, его отец погиб на фронте в первые дни войны. После окончания в 1957 г. Ейского военного летно-технического училища (ныне высшее военное авиационное училище летчиков им. В.М. Комарова) слу-



*Экипажи кораблей «Союз-6», «Союз-7» и «Союз-8» Г.С. Шонин, В.Н. Волков, А.В. Филипченко, В.Н. Кубасов, В.В. Горбатко, В.А. Шаталов и А.С. Елисеев. ЦПК, 1968 г.  
Снимок информагентства РИА-Новости*

жил в морской авиации на Балтике. 11–16 января участвовал в групповом полете трех кораблей «Союз» в качестве командира корабля «Союз-6». В 1988 г. окончил Высшие академические курсы при Военной академии Генштаба ВС СССР им. К.Е. Ворошилова. В 1979 г. уволен из отряда в связи с переводом на летную должность в ВВС.

**Горбатко** Виктор Васильевич (03.12.1934–17.05.2017), количество полетов – 3, общая длительность – 30 сут 12 ч. Родился в пос. совхоза «Венцы-Заря» Краснодарского края в семье фельдшера-ветеринара и колхозницы. В 1956 г. окончил Батайское военное авиационное училище летчиков, служил в авиационных частях Одесского военного округа. Первый полет совершил 12–17 октября 1969 г. в качестве инженера-исследователя на корабле «Союз-7» по программе группового полета трех кораблей. Второй полет – 25 февраля 1977 г. в качестве командира экспедиции на орбитальную станцию «Салют-5». Третий полет – 23–31 июля 1980 г. в качестве командира экспедиции посещения станции «Салют-6» вместе с вьетнамским космонавтом Фам

Туаном по программе «Интеркосмос».

Это была последняя точка в профессиональной истории Гагаринского отряда, которая насчитывает без малого два десятилетия. И поставил ее Виктор Васильевич Горбатко.

В 1970 г. программа облета Луны была закрыта (ЗиВ, 1993, №№ 4, 5). Дальше пути освоения космоса у нас с американцами разошлись: в середине 1970-х годов мы вышли, наконец, на свою столбовую доро-

гу – эксплуатацию орбитальных станций, а они с 1971 г. начали разрабатывать многоразовую транспортно-космическую систему «Спейс Шаттл» (ЗиВ, 2012, № 2). Острота космической гонки на этом этапе снизилась: противостояние «лицом к лицу», как было до этого, прекратилось и перешло в конструкторские бюро. Наступило время планомерной работы – без тяжелых срывов и триумфальных достижений.

Для полноты картины следует добавить, что все космонавты, кроме Беляева и Комарова, которые до зачисления в отряд имели уже высшее военное образование, осенью 1961 г. сдали вступительные экзамены и в сентябре были приняты в Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского. Они проходили обучение, не прерывая тренировок, и в начале 1968 г. получили дипломы.

---

## НЕ ЛЕТАВШИЕ

---

Юрий Гагарин неоднократно говорил, что самое тяжелое в жизни космонавта – это ожидание, потому что это годы

тяжелой напряженной работы, когда каждый день и каждый час нужно находиться в состоянии полной моральной и физической готовности к полету в космос. И при этом не всегда годы тренировок и подготовки реализуются: остальные члены гагаринского отряда полетов по разным причинам не совершили.

Первое время «сверхотбор» космонавтов продолжал действовать и в процессе подготовки тоже. В 1960-х годах по медицинским показаниям из отряда были отчислены трое:

**Карташов** Анатолий Яковлевич (25.08.1932–11.12.2005). Родился в с. Садовое Воронежской области в семье крестьянина. В 1952 г. окончил Воронежский авиационный техникум, в 1952 г. окончил Чугуевское военно-авиационное училище летчиков, затем служил в Северном военном округе. Входил в группу из шести космонавтов, отобранных для непосредственной подготовки к первому полету. В июне 1960 г. приступил к тренировкам, в том числе на центрифуге, 17 июля при 12-кратной перегрузке на его спине были обнаружены мелкие кровоизлияния, его направили в госпиталь. После лечения вновь подключился к подготовке, но 7 апреля 1961 г. был отчислен из отряда по медицинским показаниям. В 1961–1975 г. служил летчиком-испытателем в Московской области, Приморском крае, затем в Киеве. В 1985 г. уволен в запас в звании полковник.

**Варламов** Валентин Степанович (15.08.1934–02.11.1980). Родился в с. Сухая Терешка Пензенской области в семье рабочих. В 1955 г. окончил Сталин-



*Капитан Анатолий  
Карташов. 1960 г.*



*Старший лейтенант  
Валентин Варламов. 1959 г.*

градское военно-авиационное училище летчиков, вместе с М.З. Рафиковым и В.И. Филатьевым служил в авиационном полку ПВО в г. Орел. Увлекался рисованием, игрой на гитаре и пением. С мая 1960 г. приступил к общей космической подготовке, которую был вынужден прервать: 24 июля во время купания на Медвежьих озерах нырнул в воду и ударился головой о дно, получив серьезную травму шейного позвонка. Длительное время находился на лечении в госпитале. 6 марта 1961 г. был отчислен из отряда космонавтов по болезни (смещение шейного позвонка). С 1961 г. служил на различных должностях в ЦПК, подполковник.

**Заикин** Дмитрий Алексеевич (29.04.1932–20.10.2013). Родился в с. Екатериновка Ростовской обл. в семье военного, погибшего в Сталинградской битве, мать – колхозница. В 1955 г. окончил Фрунзенское училище 73-й Воздушной армии Туркестанского Военного округа, служил в Дальней авиации. В 1960–1961 гг. прошел общую космическую подготовку. С 15 января по март 1965 г. вместе с Е.В. Хруновым проходил подготовку в качестве командира дублирующего экипажа КК «Восход-2», в 1965–1966 гг. – в качестве командира экипажа



Майор Дмитрий Заикин.  
1963 г.



Старший лейтенант  
Григорий Нелюбов. 1960 г.

КК «Восход» (ЗКД) по программе «Выход» в составе группы, в 1966–1968 гг. – по программе 7К-ВИ. В 1968 г. без отрыва от тренировок окончил Военно-воздушную инженерную академию им. Н.Е. Жуковского. В мае 1968 г. отчислен из отряда по состоянию здоровья. В 1969–1987 гг. служил на различных должностях в ЦПК, полковник.

Позднее медицинские требования к космонавтам смягчились, и обоснованность принятых тогда решений об отчислениях стала не так очевидна, особенно в отношении А. Карташова. И уж совсем необоснованным и слишком жестким представляется отчисление в 1963 г. космонавтов И. Аникеева, Г. Нелюбова и В. Филатьева с формулировкой «за нарушение воинской дисциплины и режима космонавтов».

**Нелюбов** Григорий Григорьевич (7.03.1934–18.02.1966). Родился в г. Порфирьевка Крымской области в семье военного, служившего пограничных войсках на Дальнем Востоке. В 1957 г. окончил с отличием 12-е Военно-морское авиационное училище в г. Ейск, служил старшим летчиком. В 1960–1961 гг. прошел непосредственную подготовку к полету на КК «Восток» в составе группы, второй дублер Гагарина, затем на КК «Восток-2», в конце

1961 г. – на КК «Восток-3», но полет отменили, а группу перевели на подготовку к первому групповому полету двух космических кораблей. Окончательно из группы были отобраны Николаев, Попович, Нелюбов и Быковский, то есть перспективы у Нелюбова были очень неплохие. В 1961–1963 гг. учился в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского, но учебу не завершил. 4 мая

1963 г. он был отчислен из отряда. Из всех отчисленных его дальнейшая судьба сложилась наиболее драматично: В 1963–1966 гг. служил летчиком в полку в Уссурийском крае. Пытался перейти на испытательную работу, но в переводе ему было отказано. 18 февраля 1966 г. был сбит проходящим поездом вблизи станции Ипполитовка Дальневосточной железной дороги.

**Аникеев** Иван Николаевич (12.02.1933–20.08.1992). Родился в г. Лиски Воронежской области в семье железнодорожника. В 1955 г. окончил Военно-морское авиационное училище им. И.В. Сталина в г. Ейск. Затем он служил в морской авиации летчиком в Мурманской обл. В 1961–1963 гг. учился в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского (два курса). После отчисления из отряда с 1963 г. служил в истребительном полку ПВО в г. Бежецк Тверской области. В 1975 г. был уволен в запас в звании капитана.

**Филатьев** Валентин Игнатьевич (21.01.1930–15.09.1990). Родился в дер. Малиновка Тюменской обл. в семье крестьянина. Отец погиб на фронте. В 1951 г. окончил Ишимское педагогическое училище, в 1955 г. – Сталинградское военное авиационное училище летчиков, служил в авиационных



Капитан Иван Аникеев.  
1963 г.



Старший лейтенант  
Валентин Филатьев. 1959 г.



Капитан Марс Рафиков.  
1962 г.

частях. В 1961–1963 гг. учился в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского, но обучение не завершил. 17 апреля 1963 г. отчислен из отряда космонавтов. В 1963–1969 гг. служил в различных частях ВВС. В 1969 г. был уволен в отставку в звании майора по состоянию здоровья. Причиной увольнения из отряда этих троих космонавтов была ссора с военным патрулем на платформе станции Чкаловская. Если разобраться, нарушение не было из ряда вон выходящим и даже не таким грубым, чтобы из-за него ломать человеческие судьбы. Но генерал Н.П. Каманин считал, что космонавт должен быть кристально чист: «Про вас же песни поют!» – говорил он<sup>8</sup>. Вот судьбы и ломались...

Марс Рафиков был отчислен из отряда за нарушение не воинской, а «домашней» дисциплины – захотел развестись с женой. По тем временам это было несовместимо со званием космонавта, и 24 марта 1962 г. был подписан приказ о его отчислении: «за нарушение режима космонавта».

<sup>8</sup> Каманин Н.П. Скрытый космос. 1960–1978 гг. 2-е изд. перераб. и доп. в 2 т. М.: Космопоиск, 2013.

**Рафиков** Марс Закирович (29.09.1933–23.06.2000). Родился в с. Бегабад Джелал-Абадской области Киргизской ССР, отец погиб на фронте, мать – медсестра. В 1951 г. окончил Ленинабадскую спецшколу ВВС, в 1954 г. – Борисоглебское военное авиационное училище летчиков. С 1956 г. до зачисления в отряд космонавтов служил старшим летчиком 3-го истребительного авиационного полка ПВО в г. Орел. В 1960–1961 гг. прошел общую космическую подготовку, после чего продолжил тренировки. В 1961–1962 гг. учился в Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского, но учебу не завершил. После увольнения из отряда служил летчиком в различных авиационных частях, в 1975–1978 гг. – начальником разведки в Одесском военном округе. В октябре 1978 г. был уволен в запас в звании майора по состоянию здоровья.

Особое внимание хочу обратить на тот факт, что практически все космонавты Гагаринского отряда были из простого народа – их родители были рабочими и колхозниками. Все они были награждены орденом Красной Звезды «за участие в подготовке первого пилотируемого полета человека в космос».

# EARTH & UNIVERSE

2 (338), 2021

March–April

## TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Maria D. SIZOVA, Sergey V. VERESCHAGIN, Alexandr V. TUTUKOV Stellar Clusters: to the Future with GAIA	5
Dmitry Z. WIEBE, Andrey V. STOLYAROV Advances and Perspectives of Astrochemistry in Laboratory	19
Artem A. SYSOEV, Dmitry I. IUDIN Phenomena of Atmospheric Electricity. Final part and Glossary	30
<b>XXI CENTURY COSMONAUTICS</b>	
Evgeny A. RYZHKOV Martian Moons eXploration: Japanese Fear and Terror	59
<b>OBSERVATORIES, INSTITUTES</b>	
Olesya V. KOZLOVA Crimean Astrophysical Observatory: Crossroads of Time	66
<b>PEOPLE OF SCIENCE</b>	
Vladimir S. GUBAREV Three Stars of a Hero: Knowledge and Passions. Final part	79
<b>HISTORY OF COSMONAUTICS</b>	
Valentina L. PONOMAREVA The Ways of Gagarin's Team. To the 60 <sup>th</sup> Anniversary of the First Team of Cosmonauts	93
Table of Content and Selected Abstracts	110

**Front page:** On April, 12, 1961 Yuri Gagarin became the first human to fly to space onboard Vostok-1 spaceship. In 2011, at the 65th session of the United Nations General Assembly, 12 April was declared as the International Day of Human Space Flight. Our congratulations to all our readers for the 60th anniversary of Yuri' Gagarin's flight!

# EARTH & UNIVERSE

2 (338), 2021

March–April

## **Stellar Clusters: to the Future With GAIA**

Maria D. SIZOVA, Sergey V. VERESCHAGIN, Alexandr V. TUTUKOV

*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

DOI: 10.7868/S0044394821020018

The title of the paper has been inspired by the latest technical advances in the studies of stellar clusters. The results obtained within the last years drastically improved our understanding of clusters' evolution. A number of scientists, more than ever before, started studying the clusters and their possible evolutionary descendants, stellar streams. This interest has been stimulated by the results of the GAIA project that measured stellar parameters with the unprecedented precision.

## **Advances and Perspectives of Astrochemistry in Laboratory**

Dmitry Z. WIEBE<sup>1</sup>, Andrey V. STOLYAROV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University*

DOI: 10.7868/S004439482102002X

In recent decades, observations of molecular emission and absorption lines have become a powerful tool to investigate various processes in interstellar and circumstellar medium. However, interpretation of these observations is often hampered by the lack of necessary atomic and molecular data. The need in experimental measurements of various parameters for radiative and chemical processes has triggered the appearance of a new field of astronomy — laboratory astrochemistry. This article describes specific problems of laboratory astrochemistry and basic methods of their solution.

## **Phenomena of Atmospheric Electricity. Final part and Glossary**

Artem A. SYSOEV<sup>1, 2</sup>, Dmitry I. IUDIN<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences*

<sup>2</sup> *Privolzhsky Research Medical University*

<sup>3</sup> *National Research University Higher School of Economics*

DOI: 10.7868/S0044394821020031

The final part of the paper presents the diversity of the forms, which lightnings can take, and briefly discusses possible reasons underlying the existence of many types of atmospheric discharges. The paper is accompanied by a short glossary containing the main terms common for this field of study.

Индекс 70336

## Земля и Вселенная, 2/2021

**Заведующая редакцией** А.Ю. Обод  
**Редакторы** С.А. Герасютин, О.В. Закутняя, Д.А. Кононов  
**Корректоры** А.Ю. Обод, С.О. Розанова  
**Верстка макета** Н.В. Мелкова

**Просим обращаться**  
**по вопросам публикации материалов:**  
(495)276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukaran.com

**по вопросам сотрудничества:**  
(495)276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),  
e-mail: journals@naukaran.com

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом  
Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.  
Свидетельство о регистрации № 2119

[www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/](http://www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/)

*Все права защищены.*  
*Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.*  
*Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.*  
*Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.*  
*Ответственность за точность и содержание рекламных*  
*материалов несут рекламодатели*

12+

---

Сдано в набор 03.02.2021 г. Подписано к печати 02.03.2021 г.  
Дата выхода в свет 17.03.2021 г. Формат 70 × 100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Цифровая печать Усл.печ.л. 9.75 Уч.-изд.л. 10.0 Бум.л. 3.75  
Тираж 1000 экз. Зак. 47 Цена свободная

---

Учредители: РАН, ФГУП «Издательство «Наука»  
Редакция и издатель: ФГУП «Издательство «Наука»  
Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 90

---

Отпечатано в типографии ФГУП «Издательство «Наука»  
Адрес: 121099 Москва, Шубинский пер., 6



# АкадемКнига

Букинистический отдел осуществляет покупку и продажу научной литературы, книг по искусству, антикварных изданий, старинных открыток, гравюр и фотографий

Для оценки крупных библиотек выезжаем на дом

Принимаем заказы

Формируем библиотеки

Адрес: 101000, Москва, Б. Спасоглинишевский пер., 8, стр. 4

E-mail: [bukinist@naukaran.com](mailto:bukinist@naukaran.com)

Справки по телефону:

8 (495) 624-7219





## НОВИНКИ И АКЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



[instagram.com/naukapublishers](https://www.instagram.com/naukapublishers)



[facebook.com/naukapublishers](https://www.facebook.com/naukapublishers)



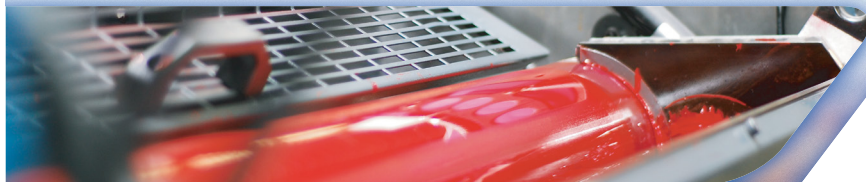
[vk.com/naukapublishers](https://vk.com/naukapublishers)



- переплетные работы
- тиснение фольгой
- цифровая печать
- офсетная печать
- ламинирование
- цветоделение
- сканирование
- брошюровка
- лакирование
- цветопроба
- нумерация
- высечка
- верстка
- СТР

Типографии ФГУП "Издательство "Наука"  
[www.tnauka.ru](http://www.tnauka.ru)

- ▶ Разумная ценовая политика
- ▶ Высокое качество продукции
- ▶ Реальные сроки выполнения заказов
- ▶ Работа высококлассных профессионалов



- афиши
- календари
- удостоверения
- адресные папки
- визитные карточки
- фирменные бланки
- брошюры, журналы
- эксклюзивные издания
- полноцветные плакаты
- художественные альбомы
- книги в твердом переплете
- листовки, рекламные буклеты
- наклейки на бумажных материалах

- ◆ Удобное месторасположение
- ◆ Тиражи от 20 экземпляров

Москва

Санкт-Петербург

Новосибирск

# КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "НАУКА"

"Наука"  
Индекс 70336

# ПО 50 РУБ.

акция распространяется в сети магазинов "Академкнига"  
и в интернет-магазине [naukabooks.ru](http://naukabooks.ru)



## ЕЩЕ БОЛЬШЕ КНИГ И БОЛЬШЕ СКИДОК

Реклама

# до 80%

акция распространяется в сети магазинов "Академкнига"  
и в интернет-магазине [naukabooks.ru](http://naukabooks.ru)

*условия акций на сайте [naukabooks.ru](http://naukabooks.ru)*