

ЗЕМЛЯ И

№ 1 (337)

ЯНВАРЬ-ФЕВРАЛЬ, 2021

космонавтика
астрономия
геофизика

ISSN 0044-3948

ВСЕЛЕННАЯ

ПОДАРОК ОТ «ЛУННОЙ ПРИНЦЕССЫ»

САО РАН ГЛАЗАМИ АСТРОНОМОВ

ТРИ ЗВЕЗДЫ ГЕРОЯ МСТИСЛАВА КЕЛДЫША

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, СИНГУЛЯРНОСТИ
И ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ
ТРАНЗИЕНТНЫЕ ЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В АТМОСФЕРЕ И В БЛИЖНЕМ КОСМОСЕ
ФЕНОМЕНОЛОГИЯ АТМОСФЕРНОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

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

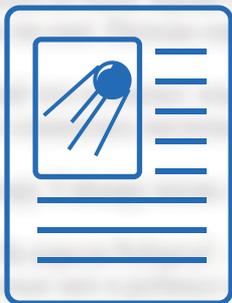


Издательство “Наука” оказывает услуги:

- 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



НАУКА

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»!

ЗЕМЛЯ И

№1 (337)

ЯНВАРЬ-ФЕВРАЛЬ, 2021

ISSN 0044-3948

космонавтика
астрономия
геофизика

ВСЕЛЕННАЯ

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

В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора 3

ПОСТНОВ К.А., ЧЕРЕПАЩУК А.М. Черные дыры,
сингулярности и центр Галактики 5

ПАНАСЮК М.И. Быстрые и очень энергичные. 23
Транзиентные энергичные явления в атмосфере
и в ближнем космосе

СЫСОЕВ А.А., ИУДИН Д.И. Феноменология 46
атмосферного электричества

Космонавтика XXI века

ЛИСОВ И.А. Подарок от «Лунной принцессы» 59

Обсерватории, институты

КУДРЯВЦЕВ Д.О., РОМАНИЮК И.И., СЕМЕНКО Е.А. 74
САО РАН глазами астрономов.
Special Astrophysical Observatory of the Russian
Academy of Sciences as seen by astronomers

In memoriam

Рафаил Львович Аптекарь (27.09.1936–29.12.2020) 85

Люди науки

ГУБАРЕВ В.С. Три Звезды Героя: знания и страсти. 86
Несколько страниц из жизни великого ученого
нашей Родины М.В. Келдыша

История науки

СЕЛИВАНОВА О.В. Пионеры ракетной техники. 101
Документы личных фондов К.Э. Циолковского
в Архиве РАН

Table of Content and Selected Abstracts 110

На стр. 1 обложки:

Красный спайт в небе над
Кунунаррой, Западная Австралия.
Автор фотографии (с) Ben Broady

© Российская академия наук, 2021

© Редколлегия журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2021

© ФГУП «Издательство «Наука», 2021

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!

Завершился, наконец, мучительно долго тянувшийся високосный 2020 год. Многие из нас потеряли коллег и друзей. Есть потери среди авторов журнала. Но надо смотреть вперед – и ничего лучшего, чем осторожный оптимизм, история нам предложить не может.

У нашей космической отрасли с 2021 годом связаны большие ожидания. После нескольких отсрочек готовится к старту в октябре долгожданная миссия «Луна-25». Последний раз советские аппараты садились на Луну 45 лет назад в 1976 г. Миссия «Луны-25» открывает российскую программу исследований, а затем и освоения Луны. На состоявшемся в декабре заседании Совета по космосу РАН удалось наметить «дорожную карту» этой программы, в которой исследования на автоматах будут продолжены пилотируемыми полетами на Луну. «ЗиВ» писал об основных блоках отечественной лунной программы (см. № 4, 2019).

Но жизнь не стоит на месте, и в XXI веке в лидеры лунных исследований стремительно ворвался Китай. Три (!) мягких посадки на Луну выполнены за последние годы, а последний проект «Чанъэ-5», о котором подробно рассказано в статье И.А. Лисова, откровенно говоря, меня потряс. Аппарат смог сесть и взять пробы грунта в районе с «молодой» поверхностью, сформировавшейся под действием лунного вулканизма. И сценарий миссии, хотя и кажется на первый взгляд сложным, – стыковка на окололунной орбите и перегрузка образцов в возвращаемый на Землю аппарат – представляет собой еще и отработку основных элементов пилотируемой экспедиции на Луну, где без такой стыковки обойтись невозможно. Короче говоря, при имеющихся темпах финансирования космических программ, а в особенности научного космоса, Россия неизбежно откатится



на третье, а то и четвертое место в рейтинге успешных космических держав.

И с Марсом, к сожалению, ситуация не лучше. Когда Вы читаете эти строки, к Марсу уже добралась международная флотилия космических аппаратов, о которой мы писали в № 5, 2020 г., но российско-европейский аппарат «ЭкзоМарс-2022» пока ждет своего старта, соответственно, осенью 2022 г. Будем надеяться, что мы не слишком опоздаем на этот «праздник» поисков жизни на Марсе.

Но, конечно, есть и хорошие новости. Продолжает радовать своими достижениями астрофизическая обсерватория «Спектр-РГ», созданная в России с участием Германии. Закончен уже второй полный рентгеновский обзор всего неба, в самом разгаре третий. Прекрасные результаты дает российский телескоп ART-XC, который теперь носит имя своего создателя Михаила Николаевича Павлинского, безвременно ушедшего из жизни в июле 2020 г., совсем скоро после запуска аппарата, работе над которым он отдал несчетное количество жизненных сил.

Наступивший год славен на космические юбилеи. Главный из них, конечно, шестидесятилетие полета первого человека в космос. Юбилей будет отмечаться на государственном уровне, предусмотрено множество мероприя-

тий в местах, связанных с жизнью Юрия Алексеевича, – Гжатске, Калуге, Звездном городке. Академия наук совместно с ГК «Роскосмос» на Общем собрании РАН в апреле посвятит целый день теме: «Наука для космоса и космос для науки». В октябре 2021 г. состоится уже второй форум «Дорога в космос», посвященный проблемам космического образования, пропаганде достижений космических исследований, в том числе и в космических музеях (о первом Форуме см. ЗиВ № 6, 2019).

В дни, когда я пишу текст этой странички, проходит очередная «гибридная» Научная ассамблея Международного комитета по космическим исследованиям (КОСПАР) – пожалуй, самой главной для нас космической организации. После чрезвычайно успешной (несмотря на непростой политический климат) 40-й Ассамблеи КОСПАР в Москве в 2014 г. этой организации не очень везет. Ассамблея 2016 г. в Турции была отменена из-за попытки государственного переворота незадолго до ее открытия. Ассамблея 2020 г. в Сиднее была отложена из-за опасностей пандемии, которые в Австралии оказались весьма серьезны.

В итоге Ассамблею было решено все-таки провести в январе этого года в т. н. «гибридном» формате: онлайн для всех участников, кроме жителей этой страны. К сожалению, попытки создать веб-платформу, удобную для жителей всех часовых поясов Земли, окончилась провалом. Заранее записанные ролики с выступлениями участников не помогли. Короткие очные сессии «вопросов и ответов» практически пустовали. Не хочется обвинять австралийских организаторов – они хотели как лучше, но, задавая себе тот же вопрос: а как можно лучше организовать такие глобальные конференции? – ответа дать не могу. Мы все привыкли к дистанционным форматам, и как я знаю, многие студенты уже не хотят возвращаться в off-line. Но решить задачу коммуникаций в глобальном контексте в этом новом мире, в котором мы все неожиданно и надолго (если не навсегда) оказались, – нам ещё предстоит.

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



Реклама

Издательство предлагает услуги по редакционно-издательской подготовке материалов, сборников, а также весь комплекс полиграфических услуг

Издательство «Наука» готово оказать услуги под ключ по организации и проведению семинаров, конференций, презентаций, выставок в конференц-залах и на экспозиционных площадках издательства по адресам:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403

По всем интересующим вопросам обращайтесь по тел.: +7(495)276-7735
Подробная информация на сайте www.naukapublishers.ru/history/partnership

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, СИНГУЛЯРНОСТИ И ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ

ПОСТНОВ Константин Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор

ЧЕРЕПАЩУК Анатолий Михайлович,
доктор физико-математических наук, академик РАН,
Государственный астрономический институт
имени П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова



DOI: 10.7868/S0044394821010011

Второй год подряд самая престижная научная Нобелевская премия по физике присуждается за теоретические исследования в области гравитации и космологии и высококлассные астрономические наблюдения. В 2019 г. – Дж. Пиблзу за теоретические исследования в области физической космологии и астрономам М. Майору и Д. Кело за открытие экзопланеты вокруг звезды солнечного типа. В 2020 г. половина Нобелевской премии по физике присуждена математику Роджеру Пенроузу «за открытие, что образование черных дыр является надежным предсказанием общей теории относительности». Вторая половина – астрономам Андреа Гез и Райнхарду Генцелю – «за открытие компактного сверхмассивного объекта в центре нашей Галактики».

ТЕОРЕМЫ О СИНГУЛЯРНОСТЯХ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Пенроуз заинтересовался общей теорией относительности (ОТО) А. Эйнштейна в начале 1960-х годов. Как математику, ему интересно было разобраться в глобальной структуре пространства-времени.

Фото на заставке: <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>

«Картирование» пространства-времени

Структура пространства-времени наиболее наглядно может быть изучена путем покрытия каждой точки пространства-времени световыми конусами – областями, внутри которых выполняется принцип причинности (никакая информация между двумя событиями

Биографическая справка



Пенроуз родился 8 августа 1931 г. в Колчестере (Англия) и начал свою научную карьеру как специалист в области алгебраической геометрии (степень доктора философии в Кембриджском университете в 1957 г.). С 1973 г. по настоящее время занимает должность Роузболловского профессора математики в Оксфордском университете.

Роджер Пенроуз на фоне пола из «мозаики Пенроуза» – узора, аperiodически заполняющего плоскость двумя типами ромбов (рис. из Википедии)

Немецкий астрофизик **Райнхард Генцель** родился 24 марта 1952 г. в Германии, городе Бад-Хомбург. Учился во Фрайбургском и Боннском университетах. В 1975 г. окончил Боннский университет. В 1978 году защитил две диссертации доктора философии в Боннском университете и в Радиоастрономическом институте Макса Планка. В 1986 г. стал профессором в Мюнхенском университете Людвиг-Максимилиана. С 1999 г. также преподает в Калифорнийском университете в Беркли. В 2010 г. возглавил институт внеземной физики общества Макса Планка. ▶



Американский астрофизик **Андреа Гез** родилась 16 июня 1965 года в Нью-Йорке (США). Ее детство прошло в Чикаго, где ее отец был профессором экономики школы бизнеса университета Рузвельта, а мать – директором художественного музея Чикагского университета. Училась вначале по специальности математика, но потом сменила специализацию на физику. В 1992 г. получила степень доктора философии в Калифорнийском технологическом институте. В настоящее время – профессор кафедры физики и астрономии в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе.

в пространстве-времени не может распространяться со сверхсветовой скоростью). Наиболее проста структура пространства-времени Минковского – пустого плоского пространства, в котором отсутствует гравитация. В двумерном аналоге (рис. 1), где ось времени t направлена вверх, а пространственная координата x – направо, мировые линии неподвижных объектов являются прямыми, параллельными оси t . Пространство Минковского – псевдоевклидово, т.е. «теорема Пифагора» для интервала между двумя событиями, находящимися в точках $A(x, t)$ и $B(x + dx, t + dt)$, записывается в виде $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2$. Здесь c – скорость света в вакууме, мировая константа. Никакой физической сигнал не может распространяться в пространстве-времени и переносить информацию с большей, чем c , скоростью. События, для которых интервал равен нулю, $ds^2 = 0$, называются светоподобными, а линии, их соединяющие – это световые лучи (нулевые геодезические). Они идут под углом 45 градусов к оси x (или t). Если интервал между событиями положителен, $ds^2 > 0$, события не могут быть связаны причинно (на диаграмме Минковского линия AB между двумя событиями составляет угол меньше 45 градусов к оси x , интервал пространственно-подобен). Если интервал отрицателен, $ds^2 < 0$, события могут быть связаны причинно, интервал времени-подобен. Движение массивных физических тел в пространстве-времени может происходить только по времениподобным (причинно-связанным) траекториям, а безмассовые частицы (например, фотоны) движутся только по нулевым геодезическим.

Пока пространство-время пустое (нет гравитации), на диаграмме Минковского для любого разрешенного движения по времениподобным траекториями касательная в любой точке траектории,

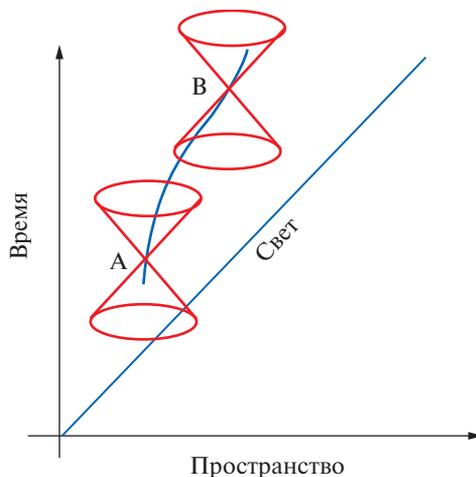


Рис. 1. Пространство-время Минковского (без гравитации). Свет распространяется под углом 45 градусов. Причинная структура описывается в каждой точке световым конусом. Угол раствора светового конуса 90 градусов. Реальные тела движутся по времениподобным траекториям (синяя кривая) – траектория в каждой точке лежит внутри светового конуса

характеризующая мгновенную скорость частицы, имеет угол наклона к оси времени t меньше 45 градусов (т.е. скорость меньше скорости света). Иными словами, траектория все время находится внутри световых конусов, исходящих из любой точки под углом 45 градусов к оси t (см. рис. 1), а ось светового конуса всегда параллельна оси времени.

Однако в реальном мире, заполненном веществом и физическими объектами, из-за действия всемирной гравитации ситуация меняется. Траектории тел по-прежнему времениподобны (принцип причинности), а вот световой конус в каждой точке будет изменяться из-за эффекта искривления траекторий света в поле тяготения – световые лучи, его составляющие, будут отклоняться от угла 45 градусов к оси t . Более того, в различных координатах полный угол раствора светового конуса

(90 градусов в пространстве Минковского) может изменяться. Например, в сферически-симметричных координатах Шварцшильда вокруг точечной массы M , по мере приближения к тяготеющему центру угол светового конуса уменьшается, и вообще формально «схлопывается» при достижении координаты $r_g = 2GM/c^2$ (радиус Шварцшильда, на котором возникает координатная особенность), а сам световой конус превращается в линию, параллельную оси t (рис. 2).

Ситуация с изображением структуры пространства-времени на плоскости в координатах Шварцшильда может быть проиллюстрирована попыткой изобразить видимую часть сферы (например, глобуса Земли) на плоской карте. Все объекты и структуры на видимой половине (аналог пространства-времени в координатах Шварцшильда при $r > r_g$) с увеличивающимися искажениями однозначно проецируются на круг, а невидимая половина глобуса требует второй карты, которую составляет наблюдатель, смотрящий на глобус с противоположной стороны (аналог пространства-времени в координатах Шварцшильда при $r < r_g$). Граница глобуса ($r = r_g$ в координатах Шварцшильда) является «горизонтом» для внешнего наблюдателя, за которым он ничего не видит, но за которым находится вторая половина пространства-времени.

Неудобство координат Шварцшильда для отображения пространственно-временной структуры было сразу же отмечено физиками, и были предложены координатные преобразования, его устраняющие. Совершенно очевидно, что физическая суть явлений не зависит от выбора координат. Так, уже в 1924 г. А.С. Эддингтон и позже – независимо от него – Д. Финкельштейн (1958) предложили координаты, в которых световой конус не

вырождается в линию на радиусе Шварцшильда, однако там его угол уменьшался до 45 градусов и продолжал уменьшаться по мере приближения к координате $r = 0$ (сингулярности, см. ниже). Образующая светового конуса, соответствующая направленным к тяготеющему центру (входящим) световым лучам, в этих координатах всегда направлена под углом 45 градусов к оси времени. Образующая светового конуса, касательная световым лучам, выходящим наружу, в координатах Эддингтона-Финкельштейна на Шварцшильдовском радиусе становится вертикальной (см. рис. 2 справа). Это означает, что внешний наблюдатель никогда не получит световой сигнал, испущенный с поверхности Шварцшильда.

Теперь нужно определить математически, что же происходит с коллапсирующим телом при r стремящимся к нулю. Формально, в этой точке возникает физическая особенность – обращаются в бесконечность компоненты тензора Римана, описывающего в ОТО структуру пространства-времени, в том числе характеризующие плотность и другие физические величины. (В отсутствие гравитации – в пространстве-времени Минковского – все компоненты тензора Римана тождественно равны нулю). Математически корректно можно определить сингулярность как совокупность точек, в которых заканчиваются геодезические – траектории движения тел и света в пространстве-времени. В пространстве-времени Минковского (без гравитации) все геодезические – или времениподобные, соответствующие движению физических тел, или светоподобные (нулевые) – продолжают в прошлое или будущее бесконечно. При наличии гравитации геодезические становятся либо замкнутыми кривыми, либо уходят на бесконечность (конические сечения вокруг тяготеющего центра в ньютоновской

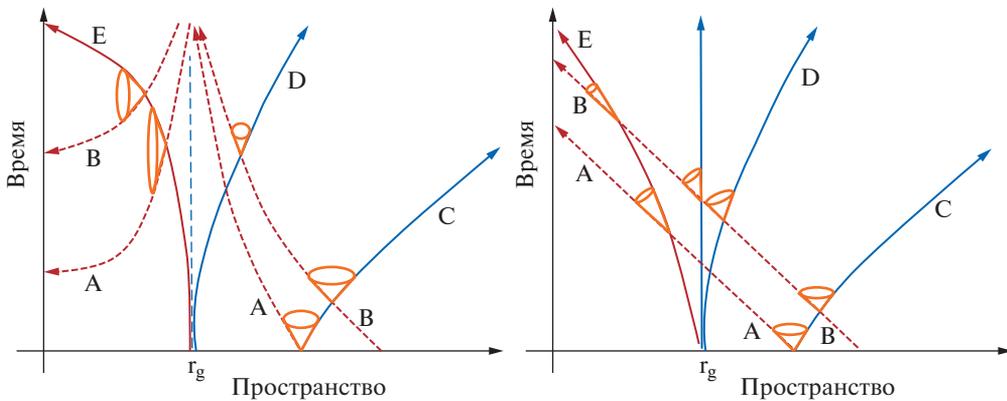


Рис. 2. Пространство-время в координатах Шварцшильда (слева) и Эддингтона-Финкельштейна (справа). В координатах Шварцшильда возникает особенность на радиусе $r_g = 2GM/c^2$ (вертикальная пунктирная кривая) – лучи света, идущие к тяготеющему центру (красные пунктирные кривые А и В), испытывают разрыв на r_g . Световой конус в каждой точке, образованный входящими (красные пунктирные кривые) и выходящими (синие сплошные кривые С и D) световыми траекториями, «сжимается» по мере приближения к r_g и вырождается в вертикальную линию на r_g . Внутри r_g световой конус направлен вдоль пространственной координаты, а траектории тел становятся пространственно-подобными. Эта особенность координат Шварцшильда отсутствует в координатах Эддингтона-Финкельштейна (справа). Входящие лучи (пунктирные красные прямые) всегда направлены под углом 45 градусов. По мере приближения к $r = 0$ световой конус сжимается, однако при $r = r_g$ имеет полный угол раствора 45 градусов. При $r = r_g$ выходящие лучи идут параллельно оси t – внешний наблюдатель никогда не получит сигнал из области $r \leq r_g$. Внутри Шварцшильдовского радиуса входящие и выходящие лучи (А, В, Е) обрываются в сингулярности при $r = 0$

гравитации), либо обрываются при конечном значении собственной длины. Если продолжить пространственно-временное многообразие за такую конечную точку нельзя (например, потому что там возникает бесконечная кривизна – расходится тензор Римана), то такая конечная точка и все близлежащие конечные точки геодезических и будут называться сингулярностью.

Ловушечные поверхности и гравитационный коллапс

Впервые гравитационный коллапс пылевидного (т. е. холодного, без давления) вещества в рамках ОТО был рассчитан в 1939 г. в работе Р. Оппенгеймера и его ученика Х. Снайдера. Впервые было показано, что массивное тело

под действием только гравитационных сил сжимается за конечное собственное время под Шварцшильдовский радиус. Бесконечная плотность, которая возникает при $r = 0$, смущала многих физиков – так, Эйнштейн полагал, что неизбежные в реальном мире отклонения от строго сферической симметрии, предполагавшиеся в расчетах Оппенгеймера и Снайдера, приведут к остановке гравитационного коллапса (например, к движению частиц вокруг плотного центра по орбитам с конечным значением момента импульса). Гравитационный коллапс реальных физических тел таким образом мог быть следствием только специально подобранных начальных условий, а значит – скорее умозраительным процессом. После кончины А. Эйнштейна, в 1955 г. индий-

ский физик-теоретик Райчаудури доказал важную теорему о «притяжении геодезических» – под действием гравитации близкие геодезические не удаляются, а сближаются. Однако оставалось неясным, чем же закончится гравитационный коллапс физического тела при произвольных начальных условиях.

Одним из важных понятий, введенным Пенроузом для изучения структуры пространства-времени, является понятие замкнутой «ловушечной поверхности» (*trapped surface*). Это такая двумерная поверхность внутри горизонта геометрии Шварцшильда, в каждой точке которой как «исходящие» световые лучи (нулевые геодезические, идущие наружу перпендикулярно этой поверхности), так и «входящие» световые лучи (идущие внутрь перпендикулярно этой поверхности) неизбежно попадают в сингулярность. Образно говоря, как входящие, так и выходящие лучи с ловушечной поверхности «засасываются» в сингулярность из-за сильного действия гравитации.

Пенроуз (1965) использовал понятие ловушечной поверхности для доказательства неизбежности образования сингулярности при гравитационном коллапсе при любых (необязательно сферически-симметричных) начальных условиях. Теорема Пенроуза утверждает, что если пространство-время обладает поверхностью Коши (такой, из которой, двигаясь по геодезическим, можно попасть в любую точку в будущем, т. е. пространство-время обладает «предсказуемостью») и имеет замкнутую ловушечную поверхность, то при выполнении положительного энергетического условия¹ это пространство

неполно относительно продолжения световых лучей. Важно, что эта теорема не опирается на предположение о сферической симметрии и имеет большую общность. Например, она проверяется для метрики Керра, описывающей пространство-время снаружи вращающегося тела.

При гравитационном коллапсе возникновение ловушечных поверхностей сигнализируют об образовании черной дыры, а граница заполняемых ими области асимптотически стремится к горизонту событий. Горизонт событий – важнейшее понятие, также введенное Пенроузом. Для геометрии Шварцшильда поверхность $r = r_g = 2GM/c^2$ является горизонтом событий (рис. 3).

Рис. 3 иллюстрирует процесс образования невращающейся черной дыры в координатах Эддингтона-Финкельштейна (упрощенная двумерная схема из работы Пенроуза 1965 г.) Коллапсирующая поверхность звезды (нижний эллипс) сжимается. В момент времени t_i в пространстве-времени образуется ловушечная поверхность, а значит, и горизонт событий. Важно отметить, что это происходит еще «внутри» коллапсирующей звезды, до момента t_e , когда ее поверхность оказывается внутри ловушечной поверхности (под горизонтом).

После работы Пенроуза 1965 г. С. Хокинг распространил идеи Пенроуза на космологическую сингулярность и сформулировал ряд новых теорем о сингулярностях, которые могут применяться и к гравитационному коллапсу, и к космологическим моделям.

всегда для обычного вещества, но может нарушаться в экзотических обстоятельствах, например, на стадии инфляции в ранней Вселенной, или для гипотетической «темной энергии», ответственной в рамках ОТО за наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной.

¹ Положительное энергетическое условие означает, что сумма плотности энергии вещества и трех главных значений давления (одинаковы в случае идеальной жидкости) больше нуля. Выполняется

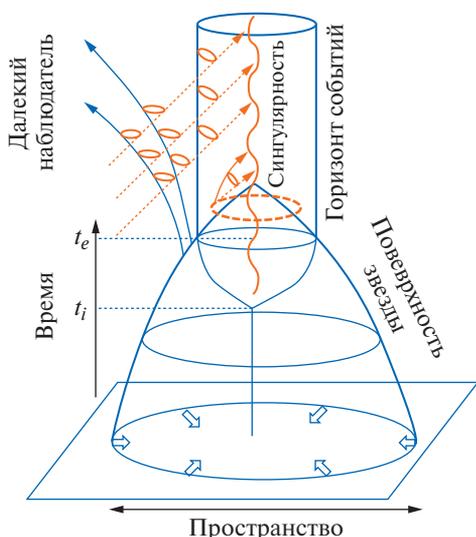


Рис. 3. Двумерная иллюстрация коллапса звезды в черную дыру в координатах Эддингтона-Финкельштейна (схема из оригинальной работы Пенроуза 1965 г.). Красные пунктирные линии, идущие под углом 45 градусов к оси времени – входящие световые лучи. Синие кривые со стрелками – выходящие световые лучи. Одна из ловушечных двумерных поверхностей обозначена красным пунктирным эллипсом. Ловушечные поверхности возникают в момент времени t_i . Ловушечные поверхности заполняют пространство-время внутри r_g и асимптотически формируют горизонт событий (на r_g в геометрии Шварцшильда). Черная дыра формируется в момент времени $t_e > t_i$, когда поверхность звезды пересекает Шварцшильдовский радиус. Красная волнистая линия при $r = 0$ – сингулярность внутри черной дыры

В своих совместных работах Хокинг и Пенроуз привлекали новые методы дифференциальной геометрии и топологии. Пенроуз ввел понятие о конформной бесконечности и предложил так называемые «диаграммы Пероуза», которые позволяют наглядно изображать причинную структуру всего пространства-времени, включая бесконечно

удаленные точки в прошлом и будущем, сингулярности и скрывающие их горизонты событий.

Принцип «космической цензуры» и процесс Пенроуза

В 1968 г. Пенроуз доказал теорему о горизонтах, которую Хокинг использовал для доказательства неубывания площади поверхности горизонта событий черных дыр при аккреции вещества, процессах слияния и распада черных дыр. Было доказано, что вращающаяся Керрская черная дыра не может распасться на части, а процесс слияния черных дыр возможен и должен сопровождаться потерей массы на гравитационное излучение. Наблюдения гравитационного излучения от сливающихся двойных черных дыр лазерными интерферометрами LIGO/Virgo блестяще подтвердили эти теоретические предсказания.

Пенроуз также выдвинул важную гипотезу – принцип космической цензуры (1970). Согласно этому принципу, любые сингулярности пространства-времени должны быть скрыты горизонтом событий от внешнего наблюдателя («природа не терпит голых сингулярностей»). Эта гипотеза остается математически строго не доказанной, и интерпретация сингулярных решений в ОТО по-прежнему является актуальной теоретической задачей.

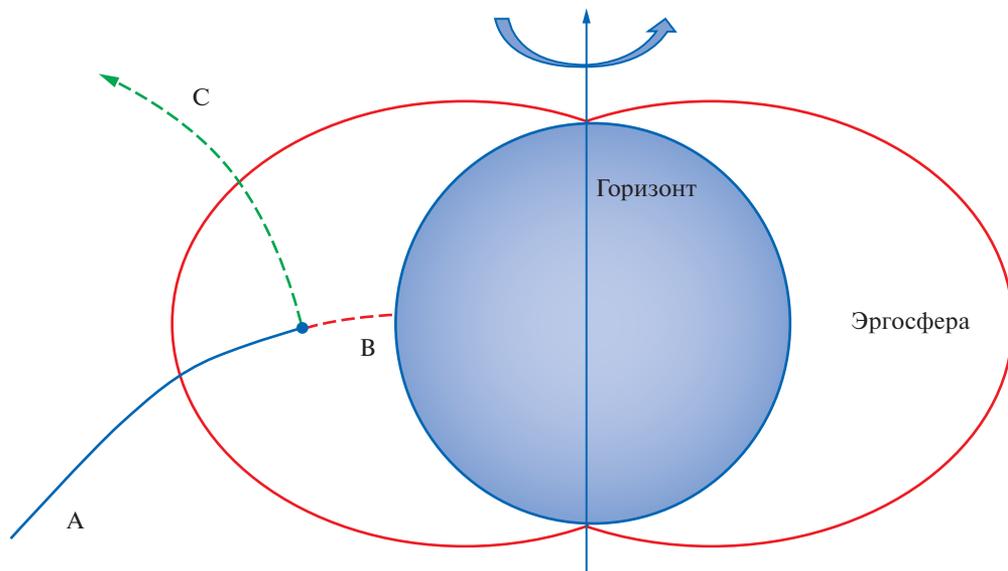
Важным вкладом Пенроуза в изучение черных дыр явился мысленный эксперимент (1969), который показал, что из вращающихся черных дыр можно извлекать энергию. Суть его схематически заключается в следующем. Пусть некоторая частица А влетает внутрь эргосферы вращающейся черной дыры (в область пространства-времени над горизонтом событий, внутри которой невозможно существование статических наблюдателей – пространство-время

внутри эргосферы вовлечено во «вращение» черной дыры с угловой скоростью, пропорциональной моменту вращения черной дыры). Пусть эта частица распадается на две, $A \rightarrow B + C$, одна из которых (скажем, B) попадает под горизонт событий и таким образом теряет связь с внешними наблюдателями, а вторая (C) – вылетает из эргосферы (рис. 4). В таком процессе энергия вылетевшей частицы C будет больше, чем начальная энергия частицы A. Образно говоря, эргосфера вращающейся черной дыры работает как «праща», а энергия вылетающих из эргосферы частиц черпается из энергии вращения черной дыры. В 1971 г. эта важная идея привела Я.Б. Зельдовича к пониманию, что вращающийся объект, поглощающий электромагнитные волны (например, металлический цилиндр) может усиливать падающее на него излучение, в том числе и квантовые флуктуации. В 1974 г. идеи Пенроуза и Зельдовича были исполь-

зованы С. Хокингом при доказательстве возможности квантового испарения черных дыр. В 1977 г. Р. Бландфорд и Р. Знаек предложили использовать электромагнитное поле вокруг вращающихся черных дыр для извлечения их энергии вращения. Сейчас механизм Блэндфорда-Знаека признается одним из лучших объяснений образования релятивистских джетов в активных ядрах галактик и квазаров и в космических гамма-всплесках.

Теоретические работы Пенроуза были выполнены в первой половине 1960-х годов и считаются крупнейшим вкладом в развитие ОТО после А. Эйнштейна. В это же время появились новые астрономические наблюдения, в первую очередь – открытие квазаров Мартином Шмидтом в 1963 г., которые стали указывать на существование массивных компактных образований в ядрах галактик. Эти наблюдения вдохновили замечательных теоретиков – Дж.А. Уиллера,

Рис. 4. Иллюстрация процесса Пенроуза. Частица A влетает и распадается в эргосфере вращающейся черной дыры (красная граница) на две частицы, A+B. Частица B попадает внутрь горизонта, а вторая (C) – вылетает из эргосферы. Энергия частицы C может быть больше начальной энергии частицы A



Я.Б. Зельдовича, И.Д. Новикова, Р. Пенроуза, С. Хокинга, К. Торна и других – на исследования процессов гравитационного коллапса и возможные астрофизические проявления коллапсирующих звезд – черных дыр (термин, придуманный Дж.А. Уиллером в 1968 г.). О замечательных высокоточных наблюдениях звезд в окрестностях центральной черной дыры в нашей Галактике пойдет речь дальше.

НАБЛЮДЕНИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР

Очень важно то, что Нобелевская премия 2020 года присуждена не только за теоретические, но и наблюдательные исследования черных дыр (ЧД). Лауреатами стали проф. Райнхард Гентцель (Калифорнийский университет Беркли, США, и Институт внеземной физики общества Макса Планка, Германия) и Андреа Гез (Калифорнийский университет Лос-Анжелеса, США) – «за открытие сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики».

Краткая история наблюдений астрофизических черных дыр

Наблюдения ЧД начались в рентгеновском диапазоне электромагнитного спектра примерно с конца 1960-х годов после замечательных работ Я.Б. Зельдовича и Е.Е. Салпитера (1964), в которых было показано, что при несферической аккреции вещества (т.е. выпадения вещества на тяготеющий центр) на ЧД может выделяться огромная энергия, в десятки раз превышающая энергию, высвобождающуюся при термоядерных реакциях. Таким образом, была обоснована возможность наблюдений ЧД (точнее, их окрестностей) в рентгеновском диапазоне спектра.

Теория дисковой аккреции вещества на нейтронные звезды (НЗ) и ЧД в двойных системах была развита в

работах Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева, Дж. Прингла и М. Риса, И.Д. Новикова и К.С. Торна в 1972–1973 гг. Эта теория позволила быстро понять природу компактных рентгеновских источников, открытых с борта американской рентгеновской обсерватории *Uhuru*, как аккрецирующих НЗ и ЧД в тесных двойных системах. Оптические проявления рентгеновских двойных систем, состоящих из нормальной оптической звезды и НЗ или ЧД, были открыты и исследованы в 1972–1975 гг. в работах Н.Е. Курочкина, В.М. Лютого, А.М. Черепашука, Ю.Н. Ефремова, Р.А. Сюняева, Н.И. Шакуры, а также в работах Дж. и Н. Бакал (США). На базе этих исследований были развиты надежные методы определения масс ЧД в рентгеновских двойных системах, которые описаны, например, в монографии (Черепашук А.М., Тесные двойные звезды, М.: Физматлит, 2013). В работе В.М. Лютого, Р.А. Сюняева и А.М. Черепашука в 1973 году была дана одна из первых оценок массы ЧД в рентгеновской двойной системе Cyg X-1.

За полвека исследований рентгеновских двойных систем рядом научных групп, включая отечественные научные коллективы, было открыто свыше трех десятков надежных кандидатов в звездные ЧД, массы которых превышают $3M_{\odot}$ – абсолютный верхний предел массы НЗ, предсказываемый ОТО А. Эйнштейна.

В 2002 г. Риккардо Джиакони, руководитель космического эксперимента UHURU, был удостоен Нобелевской премии за развитие рентгеновской астрономии и открытие источника Cyg X-1 – кандидата № 1 в ЧД.

Открытие в 2015 году гравитационных волн от слияния ЧД в двойных системах поставило проблему исследования звездных ЧД на качественно новый уровень. В работах А.В. Тутукова и Л.Р. Юнгельсона (1993) и неза-

висимо В.М. Липунова, К.А. Постнова и М.Е. Прохорова (1997) было предсказано, что первыми в лазерном гравитационно-волновом (ГВ) эксперименте LIGO должны быть открыты слияния ЧД, а не НЗ, что подтвердилось на практике. ГВ астрономия окончательно утвердила современную астрономию не только как всеволновую, но и многоканальную науку. Определены массы многих десятков ЧД в ГВ двойных системах, даны оценки их угловых моментов, изучены тонкие эффекты ОТО при слиянии ЧД. Можно утверждать, что «пальма первенства» в исследованиях звездных ЧД в настоящее время перешла от рентгеновских двойных систем к ГВ системам.

В 2017 г. открытие ГВ было удостоено Нобелевской премии (Кип Торн, Райнер Вайс, Барри Барриш).

Сверхмассивные черные дыры

В начале 1990-х годов началось массовое открытие сверхмассивных ЧД в ядрах галактик. Следует отметить, что на необычные и нестационарные процессы, происходящие в ядрах галактик впервые указал В.А. Амбарцумян (1950-е годы). Длительное время природа ядер галактик казалась загадочной. Ситуацию прояснило открытие в 1963 году Мартином Шмидтом квазаров – очень активных ядер галактик. Эти активные ядра излучают больше энергии, чем их родительские галактики. Быстрая переменность квазаров (как следовало из открытия А.С. Шаровым и Ю.Н. Ефремовым переменности квазара 3С 273) свидетельствовала, что эта громадная энергия выделяется в весьма малом объеме, размером менее 0.01 парсека. Поэтому феномен квазара с середины 1960-х годов стал рассматриваться как следствие несферической (дисковой) аккреции вещества на сверхмас-

сивную ЧД. По оценкам, выполненным в 1964 году Я.Б. Зельдовичем и И.Д. Новиковым, столь высокие светимости квазаров соответствуют огромным массам ЧД, порядка $10^8 M_{\odot}$.

Систематические определения масс сверхмассивных компактных объектов в ядрах активных галактик (Сейфертовского типа) были проведены в 1980-х годах Э.А. Дибеем, который совместно с В.Ф. Есиповым на Крымской станции ГАИШ получил высококачественные спектры ядер многих Сейфертовских галактик (с применением электронно-оптических преобразователей).

Чтобы определить массу объекта достаточно знать скорость «пробного тела», вращающегося вокруг него, а также расстояние этого тела до исследуемого объекта. По ширине мощных линий излучения водорода в спектре галактического ядра определялась средняя скорость движения «пробных тел» – газовых облаков, двигающихся в окрестностях центрального компактного объекта, а по полной интенсивности этих линий определялся характерный объем излучающего газа и, как следствие, оценивалось по порядку величины характерное расстояние газовых облаков от центрального компактного объекта. На этой основе Э.А. Дибеем были получены оценки масс сверхмассивных компактных объектов в ядрах ряда Сейфертовских галактик, которые оказались порядка $10^8 M_{\odot}$.

В 1971 году В.М. Лютый и А.М. Черепашук открыли эффект запаздывания переменности эмиссионных линий в спектрах активных ядер галактик относительно переменности непрерывного спектра (континуума). Времена этого запаздывания составляли порядка недель и месяцев. Изменяя время запаздывания, можно дать надежную оценку расстояния газовых

облаков – «пробных тел», излучающих в линиях, от центрального сверхмассивного компактного объекта. При известной скорости движения газовых облаков, определяемой по ширинам эмиссионных линий, таким способом можно определить массу компактного объекта.

Эффект запаздывания был положен в основу метода определения масс сверхмассивных ЧД, называемого методом эхокартирования. К настоящему времени методом эхокартирования измерены массы сотен сверхмассивных ЧД в активных ядрах галактик.

Надежность этих измерений проверена независимыми измерениями, сделанными другими методами. Поскольку скорости и расстояния «пробных тел» в методе эхокартирования оцениваются опосредованно, этот метод применим к удаленным галактикам (которых большинство), для которых разрешающей способности телескопов недостаточно, чтобы непосредственно увидеть индивидуальные «пробные тела» вблизи сверхмассивной ЧД.

В последние годы в работах Ю.Н. Гнедина и В.Л. Афанасьева с сотрудниками метод эхокартирования был обобщен на случай спектрополяриметрических наблюдений ядер активных галактик. Привлечение поляризации излучения в линиях позволяет оценить геометрию излучающей области вблизи сверхмассивной ЧД, что позволяет лучше прокалибровать результаты, полученные методом эхокартирования.

В случае достаточно близких галактик применяется весьма надежный метод определения масс сверхмассивных ЧД, называемый методом «разрешенной кинематики». Именно этот метод применяли нобелевские лауреаты Генцель и Гез. В этом методе скорости и расстояния отдельных «пробных тел» (звезд, газовых дисков, газовых облаков) вокруг сверхмассивной

ЧД удастся измерить непосредственно с помощью крупнейших наземных телескопов, а также космического телескопа Хаббла.

Первое определение массы сверхмассивной ЧД методом разрешенной кинематики было сделано группой Х. Форда (США) в 1994 году для галактики M87. С помощью космического телескопа Хаббла была открыта дискообразная спиральная структура – газопылевая оболочка, окружающая центр галактики. Радиус оболочки 73 парсека. Спектры, полученные в разных частях этой структуры, показали, что она вращается по кеплеровскому закону. Отсюда была определена масса центральной сверхмассивной ЧД $(3.2 \pm 0.9) 10^9 M_{\odot}$ (современное значение этой массы, оцененное по кинематике звезд, вдвое больше $\sim 6.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$).

Группа Дж. Морана (США) с помощью техники межконтинентальной радиоинтерферометрии с угловым разрешением в 200 миллисекунд и спектральным разрешением 0.1 км/с по доплеровским смещениям мазерных линий водяного пара открыла дискообразную оболочку около сверхмассивной ЧД в ядре галактики NGC4258 радиусом $\sim 10^{17}$ см. По движению отдельных уплотнений в этой оболочке дана надежная оценка массы ЧД $3.5 \cdot 10^7 M_{\odot}$.

Помимо наиболее надежных методов эхокартирования и разрешенной кинематики существуют более косвенные и менее точные оценки масс сверхмассивных ЧД, которые используются для быстрых определений масс ЧД.

К настоящему времени разными научными группами измерены массы тысяч сверхмассивных ЧД, которые лежат в пределах $10^6 \div 10^{10} M_{\odot}$. Родилась новая наука – демография ЧД, которая изучает рождение, рост ЧД и их связь с классическими объектами Вселенной (звездами, галактиками и т.п.).

*Сверхмассивный компактный объект
в центре Галактики.*

Центр нашей Галактики расположен очень близко к Земле, «всего» на расстоянии ~ 8 килопарсек (примерно 25 тыс. световых лет). Поэтому изучению ядра нашей Галактики всегда уделялось большое внимание. Еще в 1978 году английский астрофизик Мартин Рис подчеркивал, что можно считать почти неизбежным коллапс центральных частей Галактики и формирование там ЧД. В работах Оорта, а также Генцеля и Таунса, выполненных в 1977–1987 гг., было исследовано распределение звездных масс вблизи центра

Галактики, с которым был отождествлен компактный радиоисточник Sgr A*. Ими была обнаружена сильная концентрация звезд к центру Галактики, откуда следовало, что здесь располагается очень массивный и компактный объект, скорее всего, ЧД.

Систематические наблюдения за движениями индивидуальных звезд вблизи Sgr A* были начаты в 1992–1995 гг. двумя научными группами под руководством Райнхарда Генцеля и Андреа Гез. Нынешние нобелевские лауреаты взялись за решение очень трудной задачи. Центр Галактики испытывает громадное межзвездное поглощение газовой-пылевой средой, расположенной

Рис. 5. Телескопы VLT Южной европейской обсерватории La Silla (Чили)



в плоскости Галактики. Поэтому наблюдения должны вестись не в оптическом, а в ИК-диапазоне, где влияние межзвездного поглощения значительно уменьшается. Кроме того, угловой размер ближайших окрестностей сверхмассивной ЧД, где звезды центрального звездного скопления подвержены значительному влиянию центральной ЧД, весьма мал, менее 1 секунды (одна секунда дуги на расстоянии до центра Галактики 8 килопарсек соответствует 0.04 парсека или ~ 8000 астрономических единиц). Поэтому исследователям необходимо было использовать самые передовые технологии наблюдений на крупнейших наземных телескопах. Использование космического телескопа Хаббла было нереалистично ввиду того, что для наблюдений медленных перемещений звезд требовались годы наблюдательного времени.

Профессор Райнхард Генцель к тому времени уже имел большой опыт разработки различных уникальных приборов, поскольку он ранее занимался созданием приборов для ИК и субмиллиметровой астрономии и участвовал в разработке VLT – очень большого телескопа Южно-Европейской обсерватории (ESO), состоящего из четырех 8.2-метровых телескопов. Обсерватория расположена на горе Паранал в Чили (рис. 5).

Он стал применять технику спекл-интерферометрии сначала на 3.5-метровом телескопе NTT (телескоп новых технологий), расположенном в обсерватории Ла-Силья в Чили, а затем на одном из 8.2-метровых телескопов Южно-Европейской обсерватории. Спекл-интерферометрия предполагает многократную и быструю (примерно раз в сотую долю секунды) регистрацию излучения звездного участка неба на крупном телескопе. Поскольку характерный размер неоднородностей в Земной атмосфере порядка 1 м, по-

верхность главного зеркала телескопа при наблюдениях звезды с высоким временным разрешением разбивается на небольшие элементы порядка 1 м, которые быстро меняют свои положения на зеркале ввиду турбулентных движений воздуха в атмосфере. Интерференция излучения звезды, отраженного от различных элементов (внутри которых искажающее действие земной атмосферы незначительно) приводит к формированию быстропеременных изображений звезды в фокальной плоскости телескопа. Угловые размеры этих изображений (спеклов) соответствуют теоретической разрешающей способности большого зеркала телескопа (для 8.2-метрового телескопа VLT оно в ИК-области составляет 0.05 секунды дуги).

Использование техники спекл-интерферометрии позволило группе Генцеля открыть перемещения индивидуальных звезд вблизи источника Sgt A. Скорости этих перемещений оказались громадными и в ряде случаев достигали 1000 км/с.

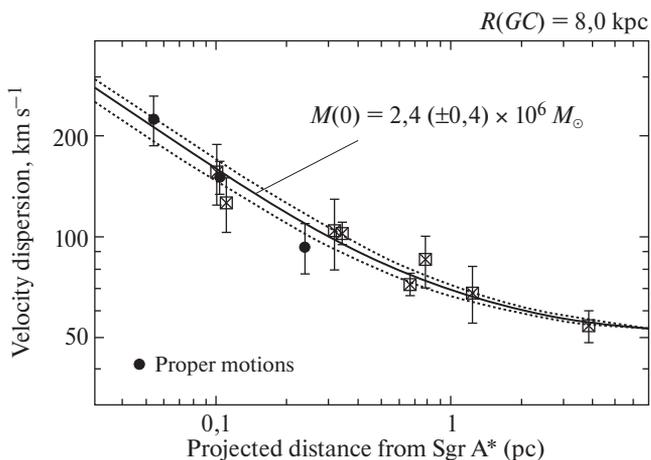
Профессор Андреа Гез в 1995 г. на 10-метровом телескопе Кека II, расположенном на Гавайских островах (США) (рис. 6) начала высокоточные наблюдения собственных движений

Рис. 6. Два 10-метровых телескопа им. У. Кека на вершине Мауна Кеа на Гавайских островах



индивидуальных звезд в области $5'' \times 5''$, окружающей объект Sgr A. Наблюдения проводились в ближнем ИК-диапазоне (длина волны ~ 2.2 микрон) с использованием адаптивной оптики. Система адаптивной оптики телескопа KeckII содержит быстро деформируемое зеркало, опирающееся на 349 активных разгрузочных элементов. Использование контрольной звезды и применение системы обратной связи, реализующей быструю деформацию поверхности зеркала, позволяет скомпенсировать атмосферные искажения и достичь дифракционного предела разрешения для 10-метрового телескопа (~ 0.05 секунды дуги для ИК-диапазона). Специальная обработка изображений звезд позволяет получить точность определения их положений ~ 0.003 секунды дуги. Такая же точность была реализована и Генцелем с помощью спекл-интерферометрии.

В 1996–1998 гг. группы Генцеля и Гез сообщили о результатах наблюдений Галактического центра. За три года наблюдений авторы смогли надежно измерить собственные движения многих звезд на картинной плоскости вблизи Галактического центра. Соответствующие проекции скоростей звезд на картинную плоскость составляли многие сотни км/с.



В работе группы Генцеля была измерена дисперсия скоростей собственных движений у 90 звезд как функция расстояний до Галактического центра, которая монотонно нарастает по мере приближения к центру вплоть до нескольких сотен км/с. Независимые спектральные наблюдения этих звезд позволили по доплеровским смещениям линий измерить распределение дисперсии лучевых скоростей, которое оказалось прекрасно согласующимся с распределением дисперсии собственных движений. Сравнение наблюдаемого распределения дисперсий скоростей звезд с теоретическим распределением, рассчитанными методами звездной динамики, позволило оценить массу центрального компактного объекта $2.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$. При этом некоторые звезды вблизи центра (на расстоянии ~ 0.01 парсека) двигаются со скоростями, превышающими 1000 км/с (рис. 7).

Дальнейшие наблюдения наиболее близких к Галактическому центру звезд позволили установить их регулярные траектории движения около центра, которые оказались криволинейными. В 2000 г. группа под руководством Гез опубликовала результаты наблюдений на 10-метровом телескопе Кека с адаптивной оптикой, которые были начаты в 1995 г. Для трех наиболее близких к центру Галактики звезд на расстояниях $0.005 \div 0.01$ парсека были измерены не только скорости, но и ускорения по кривизне траекторий их движения.

Рис. 7. Дисперсия скоростей звезд вблизи центра Галактики. Из работы Eckart A. & Genzel R., Nature 383, 415 (1996)

Соответствующие ускорения оказались сравнимыми с ускорением, которое испытывает Земля на орбите, вращаясь вокруг Солнца: $0.3 \div 0.6 \text{ см/с}^2$, а скорости составляют $570 \div 1350 \text{ км/с}$. Соответствующие расстояния этих звезд до Галактического центра для эпохи 1995 года составили $0.004 \div 0.013 \text{ парсека}$. При этом векторы ускорений пересекаются в точке, которая с точностью 0.05 секунды дуги совпадает с динамическим центром Галактики (источником Sgr A*). Это доказывает, что сверхмассивная ЧД лежит точно в Галактическом центре. С использованием проекций радиус-векторов звезд и векторов их ускорений на картинную плоскость была независимо определена масса центрального сверхмассивного объекта, которая составила $3 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Это значение прекрасно согласуется с величиной $(2.3 \div 3.3)10^6 M_{\odot}$, найденной с использованием проекций скоростей этих звезд на картинную плоскость. Звезды S1, S2 и S4 – члены звездного скопления, расположенного в Галактическом центре (рис. 8).

Дальнейший детальный многолетний мониторинг астрометрических перемещений многих звезд этого скопления, выполненный группами Генцеля и Гез, позволил пронаблюдать отрезки эллиптических орбит многих звезд, а для звезды S2 авторам удалось построить полную орбиту, у которой период оказался равным 15.6 лет.

Зная угловые размеры большой полуоси орбиты звезды S2 при известном расстоянии до Галактического центра, можно определить абсолютные линей-

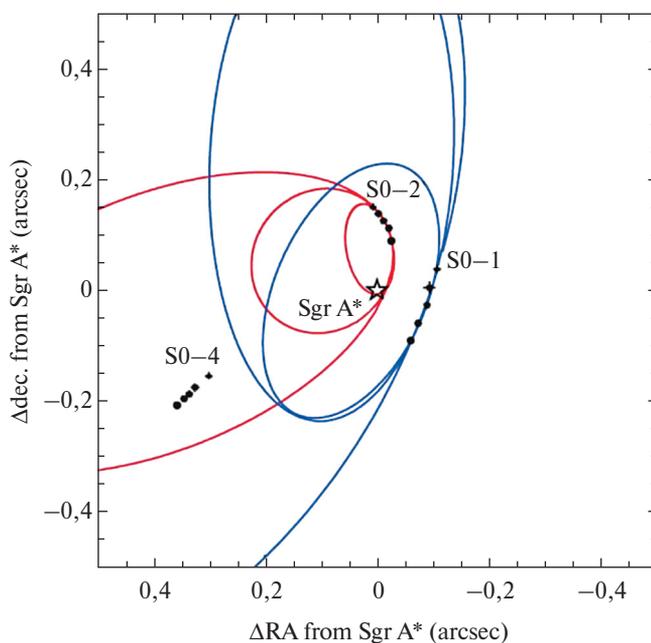


Рис. 8. Восстановленные орбиты трех звезд вокруг центра Галактики (источник Sgr A*, отмечен звездочкой), по ускорениям которых была оценена масса центрального компактного объекта. Рис. из работы Ghez A. et al., Nature 407, 349 (2000)

ные размеры большой полуоси. При известных значениях большой полуоси орбиты a и орбитального периода P по третьему закону Кеплера находится сумма масс компонент двойной системы (центральная, сверхмассивная ЧД, плюс движущееся вокруг нее по эллиптической орбите «пробное тело» – звезда S2). Поскольку масса звезды S2 порядка $10 M_{\odot}$, таким способом с большой точностью и надежностью находится масса сверхмассивной ЧД в центре Галактики. По данным на 2009 г., это значение составляло $(4.31 \pm 0.36)10^6 M_{\odot}$. Таким образом, значение массы ЧД в Галактическом центре получено с точностью лучше 10%. Это значение подтверждается наблюдениями орбит других звезд центрального Галактического скопления (всего около трех десятков

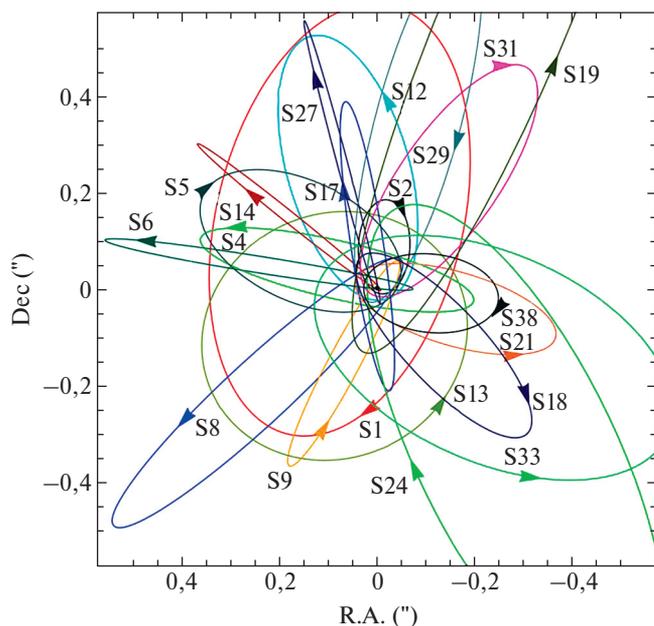


Рис. 9. Орбиты 26 звезд вокруг центра Галактики, использованные для определения массы центрального компактного объекта. Из работы Gillesen et al., *Astrophysical J.* 692, 1075 (2009)

звезд, см. рис. 9). Таким образом, авторами (Генцель и Гез) получена наиболее точная, наиболее надежная и, главное, наиболее убедительная оценка массы сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики.

К настоящему времени (2020 г.) удалось пронаблюдать у звезды S2 почти два орбитальных периода (рис. 10). Измерено релятивистское смещение периастра орбиты звезды S2, которое в точности согласуется с теоретическим значением этого смещения, предсказанным в рамках ОТО Эйнштейна (при найденной массе ЧД). Высказывались гипотезы о том, что ввиду сильной концентрации гипотетической темной материи вблизи сверхмассивной ЧД, у звезды S2 может наблюдаться ньютоновская прецессия орбиты, значительно превышающая релятивист-

скую. Наблюдения показали, что это не так. Прецессия орбиты звезды S2 для известной массы сверхмассивной ЧД $4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$ строго согласуется с ОТО Эйнштейна.

Недавно в центре Галактики была открыта еще одна, более слабая звезда S62, которая расположена ближе к сверхмассивной ЧД и у которой орбитальный период равен 9.9 лет. Звезда S4711 массой $2M_{\odot}$ имеет еще более короткий орбитальный период 7.6 лет. Совсем недавно была открыта звезда под номером S4714, которая

обращается вокруг сверхмассивной ЧД в центре Галактики с релятивистской скоростью 24 000 км/с. Дальнейшие наблюдения этих очень близко расположенных к ЧД звезд позволят, с одной стороны, проверить ОТО, с другой – дадут возможность оценить вклад вещества (в том числе загадочной темной материи) вблизи центральной ЧД.

Поскольку к настоящему времени измерены орбитальные движения многих десятков звезд вблизи сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики, ученые, изучив ориентацию орбит этих звезд в пространстве, дали оценку безразмерного углового момента вращения этой ЧД $a = 0.1$. Это означает, что ЧД в центре нашей Галактики вращается медленно.

Таким образом, центр нашей Галактики представляет собой уникальную физическую лабораторию, данную нам природой. Можно быть уверенным, что в ближайшем будущем (лет через 10–20) эта лаборатория позволит ученым получить уникальные результаты по проверке фундаментальных физических теорий.

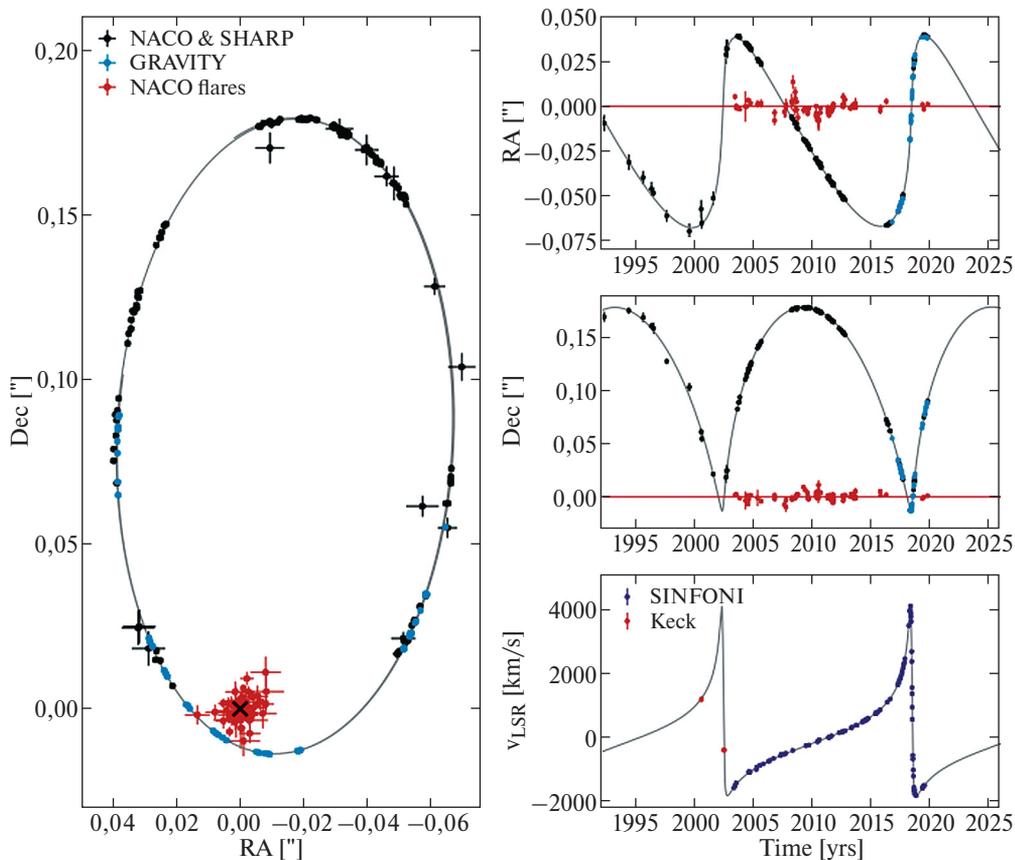


Рис. 10. Орбита звезды S2 по наблюдениям 1992–2019 (VLT). Красные кресты – положение ИК-источника, совпадающего с центральным источником Sgr A*. Из работы GRAVITY collaboration (Abuter R. et al.), *Astronomy & Astrophysics* 636, L5 (2020)

В этом состоит огромная ценность для науки многолетних и высокотехнологичных исследований, выполненных Нобелевскими лауреатами Райнхардом Генцелем и Андреа Гез. Эти результаты увенчали большим успехом описанную выше полувековую программу поиска и исследования ЧД во Вселенной.

Отметим, что формулировка Нобелевского Комитета в отношении этих авторов звучит так: «За открытие сверхмассивного компактного объекта в центре Галактики». Подчеркнем, что за открытие не черной дыры, а компактного объекта.

Есть две возможности для объяснения такой осторожной формулировки.

Во-первых, авторы дали наиболее точное, надежное и убедительное определение лишь массы сверхмассивного компактного объекта, но не его размеров, что необходимо, чтобы окончательно идентифицировать этот объект с ЧД.

Во-вторых, под словами «компактный объект» можно понимать не только ЧД, но и «кратовую нору». В отличие от черных дыр, кратовые норы не имеют горизонта событий и сингулярностей. Это топологические структуры,

соединяющие разные части пространства-времени. Идея кротовых нор в центрах некоторых галактик в последнее время активно развивается в нашей стране в работах классика релятивистской астрофизики И.Д. Новикова и его сотрудников. Поиск кротовых нор был включен в программу космического радиointерферометра «Радиоастрон» (руководитель – Н.С. Кардашев). Поиск кротовых нор запланирован также на будущем космическом радиointерферометре «Миллиметр».

Что касается определения радиуса сверхмассивного компактного объекта в центре нашей Галактики, то здесь эстафету подхватили другие научные группы. Например, недавно ученым из консорциума европейских институтов, входящих в Южно-Европейскую обсерваторию, удалось наблюдать вращение газовых облаков вокруг сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики с угловым разрешением порядка 10^{-3} секунды дуги на расстоянии около 3.5 Шварцшильдовских радиусов со скоростями ~ 0.3 скорости света. Использовался комплекс из четырех 8.2-метровых телескопов, которые с помощью приемной системы GRAVITY связаны в единый интерферометр с базой около 130 метров, работающий в ближнем инфракрасном диапазоне. Таким образом, ученым удалось прямыми наблюдениями убедиться в наличии очень быстрых (релятивистских) движений газа вблизи последней устойчивой орбиты вокруг «нашей» ЧД.

Также нельзя не отметить недавние огромные успехи в построении прямых изображений сверхмассивных черных дыр (точнее, теней или силуэтов черных дыр на фоне излучения аккреционных дисков). В 2019 году международная научная группа Event Horizon Telescope (ЕНТ), используя интерферо-

метр из 8 субмиллиметровых радиотелескопов с максимальной базой около 10 000 км, получила с разрешением $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ секунды дуги изображение ближайших окрестностей и тени сверхмассивной ($M = 6.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$) черной дыры в ядре галактики М87. Размеры тени прекрасно согласуются с предсказанием ОТО Эйнштейна, что позволило значительно ограничить класс теорий гравитации, обобщающих ОТО.

В настоящее время научная группа ЕНТ работает над проблемой построения изображения ближайших окрестностей, а также тени сверхмассивной ЧД в центре нашей Галактики. Пожелаем им успехов!

Интересно отметить, что за последние 10 лет были получены четыре Нобелевские премии по астрономии: за открытие ускоренного расширения Вселенной (2011), за открытие гравитационных волн (2017), за открытие экзопланет (2019) и за наблюдения черных дыр (2020). Это свидетельствует о бурном прогрессе в современной астрономии, который обещает привести нас к новым выдающимся открытиям.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Литература для дополнительного чтения

1. Хокинг С., Пенроуз Р. Природа пространства и времени (пер. с англ.) / ОГИЗ Издательство АСТ, 2018.
2. Новиков И.Д., Фролов В. Физика черных дыр. М.: Наука, 1986.
3. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. Фрязино: Век-2, 2015.
4. Черпацук А.М. Тесные двойные звезды. М.: Физматлит, 2013.
5. Многоканальная астрономия / под ред. А.М. Черпацук. Фрязино: Век-2, 2019.

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



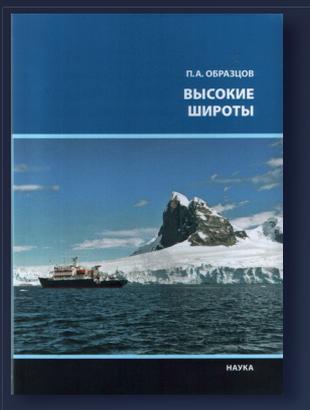
Капанадзе А.Л.

**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.

БЫСТРЫЕ И ОЧЕНЬ ЭНЕРГИЧНЫЕ. ТРАНЗИЕНТНЫЕ ЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И В БЛИЖНЕМ КОСМОСЕ*



ПАНАСЮК Михаил Игоревич,

доктор физико-математических наук

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова



DOI: 10.7868/50044394821010023

Транзиентными, то есть быстропреходящими, энергичными явлениями в контексте данной статьи называются земные гамма-всплески (Terrestrial Gamma Flashes – TGF), некоторые типы так называемых «транзиентных световых явлений» (Transient Luminous Events – TLE), «быстрые грозовые земные возрастания» (Fast Thunderstorm Ground Enhancements – FTGE). Они появляются как в нижних слоях атмосферы, так и верхней ее области, вплоть до мезосферных (около десятков км) высот в виде кратковременных потоков электронов, позитронов, гамма-квантов и нейтронов, а также всплесков оптического излучения от ультрафиолетового до инфракрасного. Одна из вероятных моделей их объяснения использует как ключевой элемент генерацию лавин субрелятивистских и релятивистских электронов, природа которой может быть связана с быстрыми изменениями атмосферных электрических полей во время проявлений грозовых эффектов (это так называемая модель «снизу-вверх»). Но можно предположить, что электроны меньших энергий могут высыпаться из радиационных поясов Земли в атмосферу (эта модель, соответственно, называется «сверху-вниз»). Именно лавины электронов, проникающие в атмосферу снизу, вкупе с пучками электронов сверху, могут быть ответственны за весь комплекс явлений со значительным выделением энергии и в нижней, и в верхней атмосфере. Не исключено, что все рассматриваемые транзиентные энергичные явления развиваются на примерно одинаковой временной шкале. Предполагается, что аналогичным механизмом можно объяснить и появление потоков транзиентных лавин гамма-квантов в области под грозовыми облаками (феномен FTGE). Ниже излагаем экспериментальные аргументы, подтверждающие предложенные модели, и обсуждаем ряд нерешенных проблем и направления дальнейших целевых экспериментальных исследований в этой области физики экстремальной атмосферы.

* Статья поступила в редакцию в июне 2020 г., а ее отредактированную версию М.И. Панасюк прислал 11 октября, менее чем за месяц до ухода из жизни. Публикуем ее в авторской версии, с незначительными корректорскими изменениями. – Прим. ред.

Фото на заставке: Gemini Observatory / Association of Universities for Research in Astronomy (AURA)

ГАММА-ВСПЛЕСКИ ЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ИХ ГРОЗОВАЯ ПРИРОДА

Конец прошлого века принес удивительные открытия в той области физики атмосферы, которая, казалось бы, к тому времени была детально исследована. Американский исследователь Р. Фишман в 1994 г. в эксперименте BATSE (Burst and Transient Source Experiment – «Эксперимент по импульсным и быстрым источникам») на борту астрофизической космической обсерватории CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory – Гамма-обсерватория им. Комптона) с помощью детектора гамма-излучения, направленного вниз, в атмосферу, обнаружил очень короткие, длительностью от долей до нескольких миллисекунд, всплески гамма-излучения¹.

Это было открытие: Р. Фишман показал, что атмосфера нашей планеты может быть источником транзитных всплесков гамма-излучения, очень похожих на гамма-всплески космической природы (известны под аббревиатурой GRB, открыты в 1960-х годах). Но если GRB рождаются где-то в ходе мощных астрофизических катаклизмов на окраинах Вселенной и на самой ранней фазе ее зарождения, то каково происхождение земных гамма-всплесков?

Эти гамма-вспышки получили название «земные гамма-вспышки» – (Terrestrial Gamma Flashes, или TGF). Их максимальная энергия оказалась очень большой, до десятков мегаэлектрон-вольт (МэВ) и даже выше. Достаточно упомянуть, что электроны с энергией 10 МэВ способны преодолеть слой, например, алюминия в 20 мм, а воздуха – около 400 м.

Вслед за экспериментом Фишмана изучение TGF продолжалось и другими исследователями. Современные их наблюдения (например, на космическом аппарате *Fermi*) показывают, что частота таких транзитных невелика: порядка 500 TGF за сутки. Однако, вероятно, это лишь нижняя граница, так как малоинтенсивные TGF зарегистрировать довольно сложно – необходимы приборы большой чувствительности.

Приблизиться к пониманию природы TGF помогла идея связать эти явления с атмосферным электричеством. Очень скоро после экспериментального обнаружения была выявлена их связь с разрядами молний, при кото-

рых усиливаются электрические поля в нижних слоях атмосферы.

«Генетическая связь» между всплесками и грозовой активностью действительно подтверждается экспериментальными данными: на спутниках TGF регистрируются преимущественно над областями с проявлениями грозовой активности. Это видно при сравнении карт, на кото-

рых обозначены, с одной стороны, места – наблюдений TGF и, с другой стороны, наиболее активные области грозообразования. И молнии, и гамма-всплески наблюдаются преимущественно над континентами и на низких и средних широтах. Была даже обнаружена сезонная зависимость их появления: зимой они наблюдаются, в основном, над облачным покровом, расположенным ниже над землей, чем летом, когда грозовые облака расположены выше.

Р. Фишман показал, что атмосфера нашей планеты может быть источником транзитных всплесков гамма-излучения, очень похожих на гамма-всплески космической природы (известны под аббревиатурой GRB, открыты в 1960-х годах).

¹ Статья была опубликована в журнале Science в 1994 г.: *Fishman et al. Science* 264 1313 (1994).

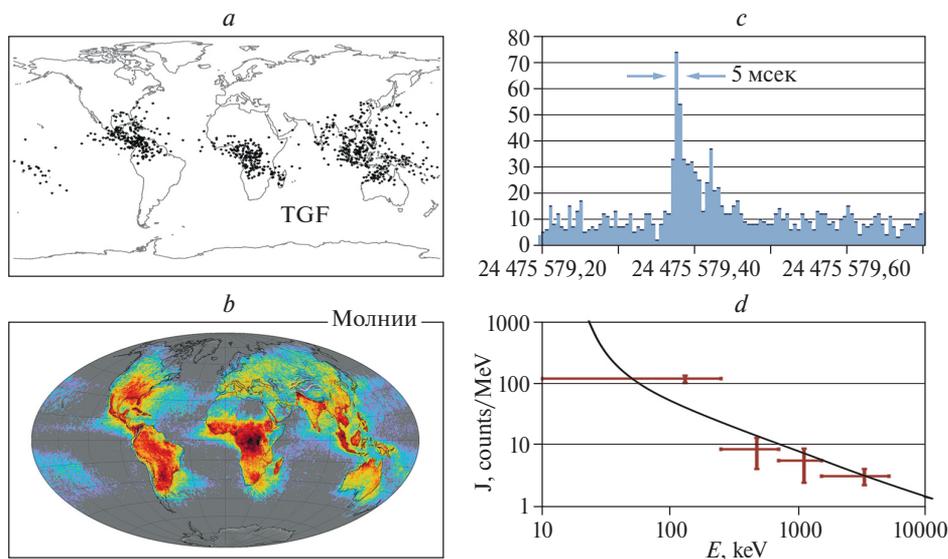


Рис. 1. Вверху – земные гамма-всплески (TGFs – Terrestrial Gamma Flashes): а – географическое распределение по данным на спутнике CGRO; с – типичный временной профиль и энергетический спектр по данным спутника «Вернов». Внизу – результаты наблюдений разрядов молний на спутнике TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) с 1995 по 2002 г. Компиляция из: (1a) Briggs M.S. et al. *Geophys. Res. Lett.* 38 L02808 (2011); (1b) <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>; (1c; 1d) M. Panasyuk et al., *Cosmic Research*, 2016, Vol. 54, No. 5, pp. 343–350

Результаты ряда наблюдений демонстрировали, что TGF должны быть созданы высоковольтными электрическими полями непосредственно перед ударом молнии в грозовом облаке, происходящим через миллисекунды после наступления ее первоначальной фазы – появления ее лидера², но до основной вспышки. Большинство современных исследователей склоняются к модели генерации TGF как результата межоблачных и (или) внутриоблачных разрядов на высотах в несколько километров.

² Лидер молнии – узкий канал ионизированного воздуха, электрический ток в котором распространяется сверху вниз, причем ступенчато. Он может разветвляться, формируя своеобразную фрактальную структуру. См. Bogomolov V.V., Iyudin A.F., Maximov I.A., Panasyuk M.I., and Svertilov S.I. *Phys. Rev. D* 99.

Вслед за обнаружением TGF появилась и первая модель, позволяющая приблизиться к пониманию их механизма генерации. Оказалось, что именно в районе скопления грозовых облаков, благодаря мощным электрическим полям, создаются условия для ускорения электронов окружающей среды. Более того, было показано (здесь мы ссылаемся на первые модели 1990-х годов А.В. Гуревича и его коллег³), что этот процесс носит лавинообразный характер. Восходящие потоки электронов покидают область грозовой активности, рождая «лаvinу убегающих электронов», направленную вверх от поверхности Земли вдоль силовых линий

³ Например, статьи Gurevich, Milikh, Roussel-Dupre *Phys. Lett. A* 165 463 (1992); Гуревич А.В., Зыбин К.П. *УФН*, 171 1177–1199 (2001).

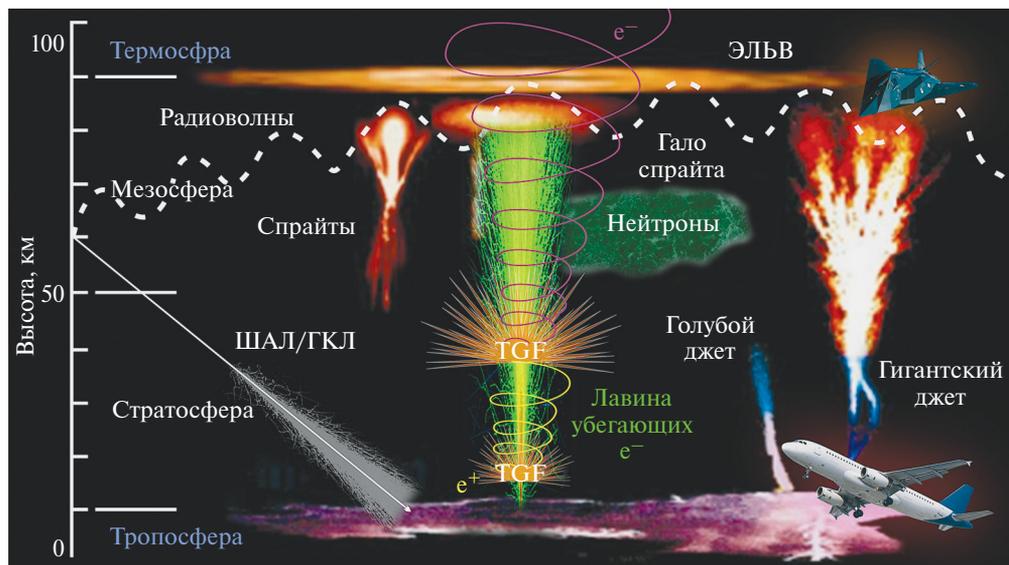
магнитного поля. Их энергия – от десятков кэВ до 1 МэВ и более. Возникает пробой воздуха, причем величина порогового значения электрического поля оказывается меньше его типичной величины. Получается, что грозовая активность «приводит в действие» импульсный ускоритель с очень короткой длительностью пучков электронов. Такую модель можно назвать «моделью снизу-вверх».

Энергичные электроны лавины в результате столкновений с атомами воздуха могут создавать в атмосфере вспышки гамма-квантов – так называемое тормозное излучение. Это и есть TGF. Именно они были обнаружены Фишманом в ходе анализа данных со спутника. В свою очередь, TGF посредством

ядерных реакций рождают новые частицы – электроны, позитроны и нейтроны. Электроны лавины замедляются в атмосферной среде, рождая фотоны, которые, в свою очередь, в результате фотоядерных реакций с атомами воздуха генерируют поля нейтронов, а также пары электронов и позитронов. Последним предназначена дополнительная и важная роль.

Положительно заряженные позитроны, в отличие от отрицательных электронов, в электрическом поле должны лететь в противоположном направлении, к Земле, и могут вызвать новую порцию гамма-излучения. Получается эффект усиления TGF – своеобразная положительная обратная связь.

Рис. 2. Модель («снизу-вверх») генерации TGF и транзитных световых событий TLE в верхних слоях атмосферы над районами грозовой активности: лавина убегающих электронов, ускоренная электрическим полем и направленная вверх, создает атмосферный пробой выше грозовой облачности, вызывая кратковременное флуоресцентное свечение атмосферы и всплески гамма-излучения – TGF. Последние ответственны за рождение нейтронов и электрон-позитронных пар (e^+ , e^-). Поток позитронов, направленные вниз, генерируют дополнительные потоки гамма-излучения, тем самым увеличивая яркость TGF. Эти транзитные энергичные явления в нижней и верхней атмосфере могут быть опасными для авиалайнеров на типичных высотах в несколько км и для будущих суборбитальных летательных аппаратов в стратосфере, а также способны нарушать условия распространения радиоволн



Формирование нейтронных полей в районе появления TGF не представляется чем-то удивительным. Чтобы фотоядерные реакции осуществились, необходима пороговая энергия гамма-квантов около 10 МэВ в воздухе. Такие гамма-кванты в TGF, очевидно, есть. Тем не менее следует упомянуть, что обсуждается еще одна возможность рождения нейтронов – в результате ядерного синтеза.

Принимая во внимание всю совокупность явлений: лавины электронов, гамма-излучения и вторичного излучения в виде электронов, позитронов и нейтронов, стоит задуматься о радиационной опасности таких явлений.

К физической модели генерации TGF, подразумевающей активную роль заряженных частиц (электроны лавины), можно добавить идею о механизме генерации самих молний. В ряде работ было показано, что молниевый разряд может возникать при проникновении в область грозового облака огромного количества вторичных частиц – широких атмосферных ливней (ШАЛ), возникающих при взаимодействии галактических космических лучей (ГКЛ) с атмосферой и увеличивающих локальную ионизацию воздуха. Это должно способствовать электрическому пробое и появлению электрических разрядов. Однако есть много скептиков, отвергающих такую возможность. Их мнение основано на том, что до сих пор не было достоверных одновременных наблюдений молний и ШАЛ на наземных установках космических лучей.

Тем не менее существуют статистические наблюдательные данные, в пользу значительной положительной корреляции между изменениями плотности ионизации воздуха и облачного покрова Земли. Чем плотнее облака, тем более вероятным становится проявление грозовой активности и молниевых разрядов. С другой

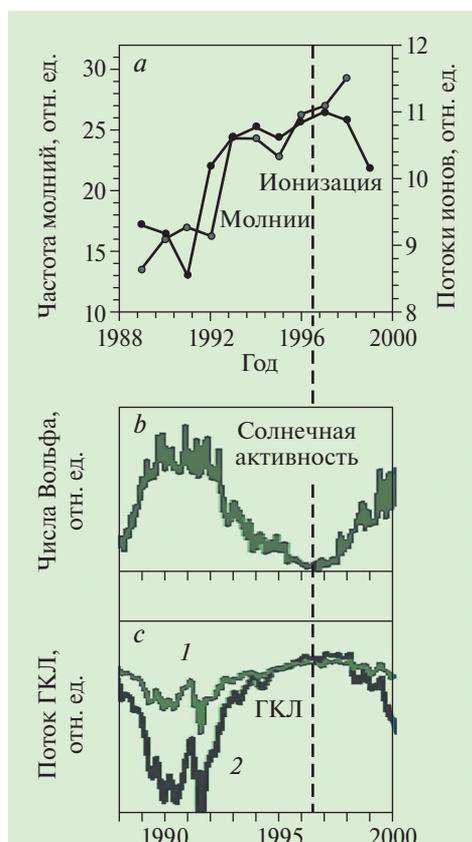


Рис. 3. Сверху вниз: а – частота разрядов молний, уровень ионизации атмосферы; б – изменение уровня солнечной активности по числам Вольфа; с – поток галактических космических лучей по наземным наблюдениям нейтронных мониторов в высоких (1) и низких (2) широтах. Компиляция из: Stozhkov Y.I., 2003, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **29** 913

стороны, частота молний действительно коррелирует с изменением ионизации воздуха. В ряде работ отмечалось, что ионизация воздуха и рост частоты молниевых разрядов совпадают с минимумом цикла солнечной активности. Именно в этот период потоки ГКЛ достигают своей максимальной величины. Возрастание фоновой ионизации не отвергается в качестве причины появления стримеров (плазменного

канала) молниевых разрядов. Эти факты позволяют не отвергать, а рассматривать возможность существования механизма генерации молний с участием ШАЛ ГКЛ.

Основываясь на имеющихся экспериментальных данных по TGF и предлагаемой для их объяснения модели, в основе которой – лавина убегающих электронов, получается довольно привлекательная глобальная картина, связывающая воедино процессы, происходящие в космическом пространстве и вблизи поверхности Земли.

Однако открытием TGF – мощных транзитных явлений в атмосфере Земли, давшим, по сути, начало физике экстремальной атмосферы, развитие этого направления не ограничилось.

СВЕТОВЫЕ СПЛОХИ

В 1990 г., немного раньше открытия TGF, с помощью скоростных и высокочувствительных телевизионных камер было обнаружено еще одно интересное явление в высотной атмосфере – чрезвычайно быстрые, длительностью порядка 30 миллисекунд, вспышки света, похожие на струи или фонтаны, над грозовыми облаками на высоте 14 км и простирающиеся вверх, как минимум до 20 км.

Авторы этих наблюдений⁴ уже тогда отметили их возможную связь с усилением грозовой активности. Затем начались спутниковые наблюдения. Измерения из космоса оказались более информативными для изучения глобальных свойств этих явлений.

Теперь мы знаем, что TLE (сокращение от *Transient Luminous Events*) – «транзитные световые явления» – это общее название различных феноменов, разнообразных по своей природе. По

физическим характеристикам в оптическом диапазоне различают спрайты, эльфы, голубые джеты и др.

Спектральные измерения TLE в разных диапазонах могут быть использованы для того, чтобы отличить их от молниевых разрядов. В спектральном составе TLE – преимущественно линии излучения вибрационных переходов молекулярного атмосферного азота в красной и инфракрасной частях спектра видимого излучения.

TLE типа «спрайтов» обычно появляются на высотах мезосферы и имеют сложную структуру с пространственным горизонтальным масштабом в десятки километров. Обычно спрайты возникают одновременно с ореолами: своеобразным диффузным свечением над спрайтом. Длительность таких оптических вспышек – от десятков до сотен миллисекунд, они происходят на высотах от десятков до 100 км и, возможно, несколько выше. Важной особенностью спрайтов является одновременное развитие нескольких лавин: вначале – нисходящие разряды, соседствующие с основным разрядом. Разница цветов у спрайта объясняется различным давлением и составом атмосферы на разных высотах. На высоте около 70 км красное свечение дает азот. Чем ближе к земле, тем больше давление и количество кислорода, и цвета меняются соответственно на синий, голубой и белый. Так называемые «синие струи» и «синие стартеры» – это самые низковысотные TLE, которые распространяются вверх от вершин облаков до высот около 40 км.

В эксперименте на спутнике «Вернов» (2014 г.) было показано, что слабые по своей светимости TLE встречаются на более обширной «территории» по сравнению с более мощными. Регистрация последних схожа с картиной пространственного распределения TGF. Это наводит на мысль об их единой

⁴ Frantz et al., Science, 249, 48–51 (1990).

природе, связанной с грозовой активностью в нижних слоях атмосферы.

Однако если это так, то опираясь на модель «снизу-вверх» – модель лавины убегающих электронов, следует предположить, что поток релятивистских электронов может участвовать в генерации и ультрафиолетового излучения, наряду с гамма-эмиссией.

Этому есть теоретические и экспериментальные подтверждения. В штате Юта (США) существует ускоритель электронов с энергией 40 МэВ, который используется для калибровки флуоресцентных детекторов космических лучей предельно высоких энергий на установке по их изучению Telescope Array, расположенной там же. Его импульсный пучок релятивистских электронов, взаимодействуя с атомами воздуха, генерирует столб флуоресцентного света.

Численные модели флуоресцентных излучений для электронно-фотонной компоненты ШАЛ космических лучей были впервые представлены еще в середине 1960-х годов. Количество испускаемых флуоресцентных фотонов пропорционально энергии, теряемой электронами в атмосфере. Именно поэтому гипотеза о связи лавины убегающих электронов с генерацией оптического излучения не лишена оснований. Лавины

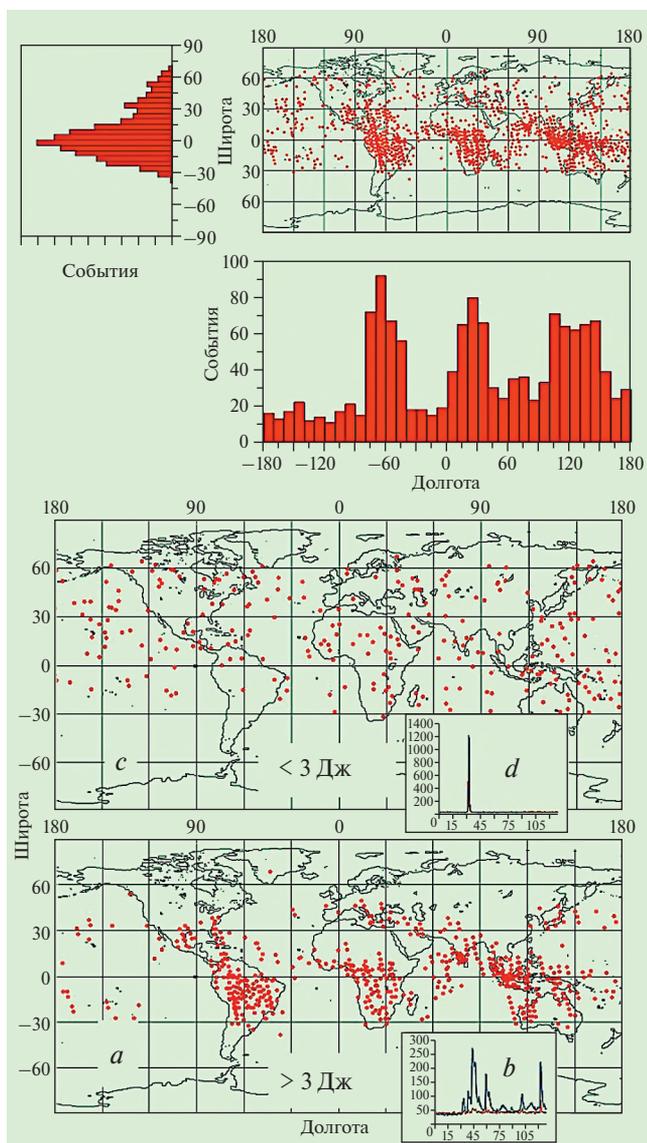


Рис. 4. Вверху – распределение TLE на карте. Внизу – TLE различной природы: a, b – длительные, наблюдающиеся только в ультрафиолете по данным эксперимента на спутнике «Вернов» и c, d – более короткие, зарегистрированные в более широком спектральном диапазоне, вплоть до инфракрасного. Первые, в отличие от вторых, наблюдаются в основном над сушей, над районами преимущественного грозообразования. Компильяция из: Garipov G.K., Khrenov V.A., Klimov P.A. et al., 2013. *J. Geophys. Res.* 118 (2), 370–379; *Extreme Events in Geospace*. Garipov G. et al., Elsevier, 2018. 625 p.

энергичных электронов могут создать светящиеся в ультрафиолете транзиенты над грозowymi облаками – TLE. Тогда встает вопрос: какие именно типы TLE могут рождаться в рамках такой модели?

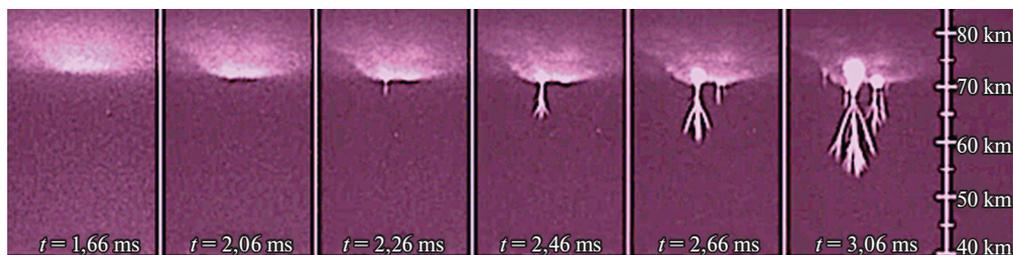
Если предполагаемые импульсные лавины убегающих электронов действительно существуют, то, вероятно, они должны генерировать TLE преимущественно в нижних слоях атмосферы, в районе над грозowymi облаками, где плотность воздуха больше, чем на больших высотах. Поэтому такой механизм скорее ответственен за генерацию струй – джетов, нежели спрайтов и эльвов (название последних от английской аббревиатуры ELVES – Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources, «световая эмиссия и очень низкочастотные возмущения, порожденные источниками электромагнитного импульса»), возникающих на гораздо больших высотах. Тем не менее исключать возможность «участия» лавин убегающих электронов в генерации транзиентов и на больших высотах, по-видимому, нельзя. Согласно вышеупомянутой модели, они могут служить триггером возникновения электрического пробоя на больших высотах. Как следствие такого пробоя также можно ожидать и генерацию вспышек в оптическом диапазоне.

Обратимся вновь к спрайтам, а именно к их динамике. В ряде работ отмечалось, что начальный этап их развития начинается в нижних слоях мезосферы (см. кадры 1–3 на рис. 5) в течение короткого времени < 2 мс. Лишь на втором этапе начинают развиваться его структуры (стримеры), направленные вниз.

Последовательность такой динамики развития спрайта потребовала и модификации стандартной модели лавины убегающих электронов, предполагающей существование двух стадий. Первая, мощная, связана с сильноточным разрядом на высотах в десятки км. Она вызывает пространное диффузное свечение, и затем появляются спорадические пробои около вершин грозowych облаков на относительно малой высоте и простирающиеся вверх, вплоть до таких значительных высот, как 90 км. Но не исключается модель появления стримеров, направленных вниз. Именно вторую стадию процесса связывают с молниевым разрядом, замыкающим электрический потенциал между облаком и землей. Можно отметить, что такая картина двухстадийного развития спрайта наводит на мысль, что наблюдаемые нами мощные и сложные по своей структуре TLE над сушей, в большинстве наблюдаемых событий и являются именно этим классом световых транзиентов. В пользу такой интерпретации свидетельствуют и наблюдения

Рис. 5. Динамика развития спрайта в миллисекундном диапазоне.

Источник: Cummer S.A., Jaeger N., Li J., Lyons W.A. et al., 2006. *Geophys. Res. Lett.* 33, L04104



множественных разрядов молний с периодом в десятки – сотни миллисекунд, часто наблюдающихся в районах грозовой активности.

Принципиально другие, на наш взгляд, по своей физической природе – эльвы – своеобразные кольцевые структуры красноватого цвета (что указывает на высвечивание кислорода), наблюдающиеся в нижней ионосфере (высоты около 80–100 км) в течение < 1 мс, принципиально отличны от других световых транзиентов. Возникнув, они быстро расширяются и достигают огромного горизонтального размера – до 500 км.

На спутнике «Ломоносов» нам удалось исследовать динамику этих явлений с помощью быстрого ультрафиолетового телескопа ТУС на его борту, смотрящего вниз, на Землю. Светящиеся

кольцо этого гигантского атмосферного явления, расширяясь, распространяется со световой скоростью на большие расстояния. Это очень напоминает взрывной процесс с «эпицентром» в точке зарождения эльва. Интересно, что иногда наблюдается парное рождение световых колец. После их первого наблюдения с борта американского шаттла *Discovery* в 1989 г. появилась идея объяснения их генерации электромагнитным импульсом (ЭМИ), связанным с разрядом молнии. ЭМИ, распространяясь вверх, разогревает свободные электроны на мезосферных высотах. Последние, в результате столкновений с молекулами воздуха (в основном – азота), возбуждают их. Затем, в процессе их релаксации, происходит эмиссия флуоресцентного света в УФ-диапазоне.

На спутнике «Ломоносов» (2016–2018) для регистрации УФ-транзиентов был установлен телескоп ТУС («Трековая УСтановка» с диаметром зеркала около 1,5 м). Фотоприемник телескопа состоял из 256 фотоумножителей – пикселей и быстрой считывающей электроники, обеспечивающей измерения полезных сигналов в различных временных диапазонах. Это позволило исследовать световые явления в атмосфере различной природы: вспышки УФ-света, возникающие от взаимодействия космических лучей с атмосферой, события типа TLE, полярные сияния, антропогенные свечения и даже следы от метеоров. Разнообразие транзиентных световых событий, регистрируемых телескопом ТУС в УФ-диапазоне длин волн, значительно улучшило наши знания об атмосферных явлениях, полученных в более ранних космических экспериментах МГУ на спутниках «Татьяна», «Татьяна-2» и «Вернов». ТУС – наиболее чувствительный прибор из применявшихся до сих пор в космосе для изучения световых транзиентов. Так, например, оценка полного числа УФ-фотонов, испускаемых эльвами, оказалась > 10^{18} , что на четыре порядка меньше, чем было измерено с помощью прибора в эксперименте ISUAL (> 10^{22}) на спутнике FORMOSAT-2.

Итак, «лавина убегающих электронов» может быть триггером к развитию таких процессов, как некоторые классы TLE и TGF. Однако встает вопрос: есть ли прямые наблюдения таких лавин как подтверждение данной модели? Ответ на этот вопрос неоднозначен.

Прямых наблюдений восходящих потоков электронов на высотах выше облачного покрова нет. Впрочем, это – следствие трудностей осуществления экспериментов на таких высотах. Вообще, область атмосферы от 10 до 100 км по-прежнему остается мало-

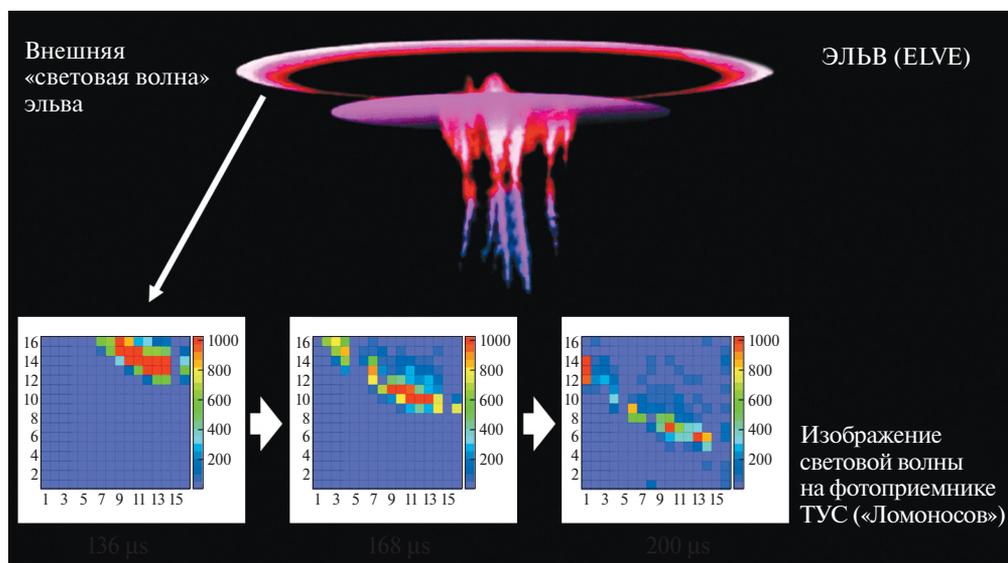


Рис. 6. Вверху – событие TLE типа эльв (ELVE) в представлении художника. Внизу – динамическое отображение его фронта в фотоприемнике ультрафиолетового телескопа ТУС на борту спутника «Ломоносов». Движущийся световой внешний фронт эльва распространяется со световой скоростью на расстояния в десятки-сотни км. Компиляция из: Klimov P. et al., *Remote Sens.* 2019, **11**, 2449

изученной – единственной платформой для экспериментов здесь остаются аэростаты. Именно поэтому модель лавин убегающих электронов продолжает оставаться рабочей гипотезой.

Тем не менее есть косвенные экспериментальные данные – наблюдения вторичных излучений в виде электронно-позитронных пар, которые должны быть следствием развития электронных лавин, а также нейтронов, рождающихся в результате ядерных реакций с участием гамма-квантов. Эти наблюдательные факты могут быть косвенным, но довольно сильным аргументом в пользу существования лавин релятивистских электронов, генерируемых в сильных электрических полях в районах грозовой активности.

При этом видно, что качественно географические распределения TGF и мощных TLE схожи: большая их часть регистрируется именно над районами

грозовой активности. Это подтверждает их возможную «генетическую» связь с проявлениями атмосферного электричества в нижних слоях атмосферы, но, конечно, не обязательно между собой. Тем не менее и ее, как рабочую гипотезу, отвергать нельзя.

Можно ли рассмотреть альтернативный вариант – модель «сверху – вниз»? Иными словами, «запустить» пучок электронов из космоса в атмосферу?

ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНЗИЕНТЫ И МОДЕЛЬ «СВЕРХУ-ВНИЗ» ГЕНЕРАЦИИ TLE

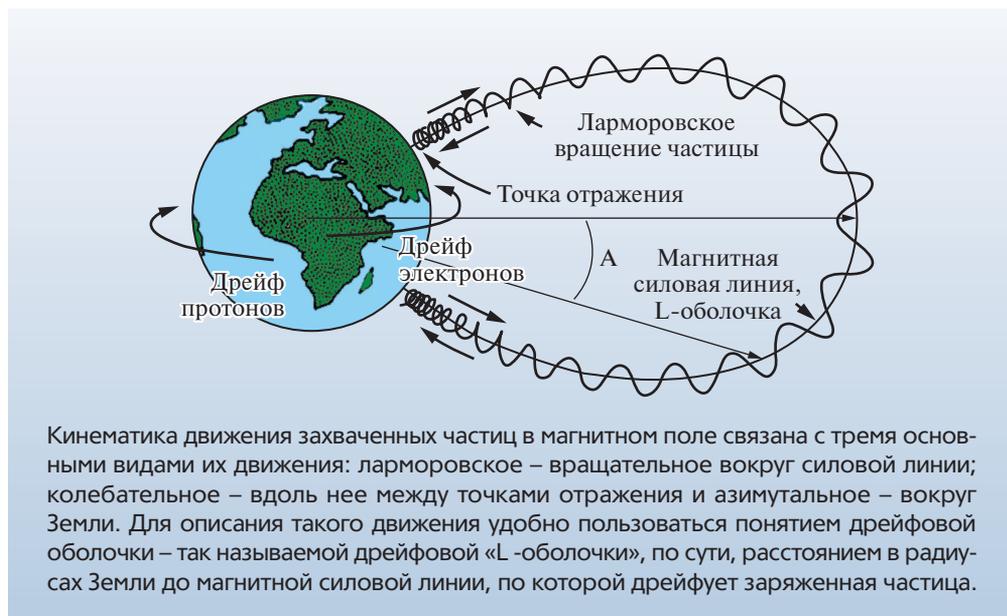
В рамках такой модели следует предположить существование нисходящих транзитных пучков электронов в окружающем нас околоземном космическом пространстве, в направлении к поверхности Земли. В пользу такого

варианта свидетельствуют хорошо известные полярные сияния, создаваемые потоками электронов энергией несколько кэВ, которые вторгаются из магнитосферы в плотные слои атмосферы и вызывают свечения, в том числе и в УФ-диапазоне.

Но можно заметить, что основная доля TLE регистрируется совсем в другом месте – на средних широтах и ближе к экватору. Кроме этого, сама топология магнитного поля Земли в авроральных и полярных широтах способствует формированию потоков электронов, направленных вниз. Откуда могут появиться потоки электронов «сверху» на средних и низких широтах?

Чтобы попытаться ответить на этот вопрос, напомним еще об одном классе энергичных транзиентов в околоземном космическом пространстве, детальное исследование которых также началось в 1990-х годах и интенсивно продолжается до сих пор. Речь идет о высыпающихся из радиационных поясов энергичных электронах (Transient Electron Precipitation или TEP). Такие TEP радиационных поясов Земли наблюдаются не только в авроральных широтах, но и на средних и низких.

Возникает вопрос, какова природа микровсплесков и какое воздействие на атмосферу они могут оказать?



Основной механизм, который может привести к высыпанию частиц из радиационных поясов, известен давно, по сути, сразу после их открытия в конце 1950-х годов. Это взаимодействия «волна-частица». Электромагнитные волны, частота которых близка к частоте ларморовского вращения частицы в магнитном поле, в результате резонанс-

ного взаимодействия могут передавать часть своей энергии частицы, изменяя направление ее преимущественного движения – дрейфа в магнитном поле Земли.

Для большей части электронов радиационных поясов эти частоты соответствуют диапазону очень низкочастотных волн (ОНЧ) в килогерцовом

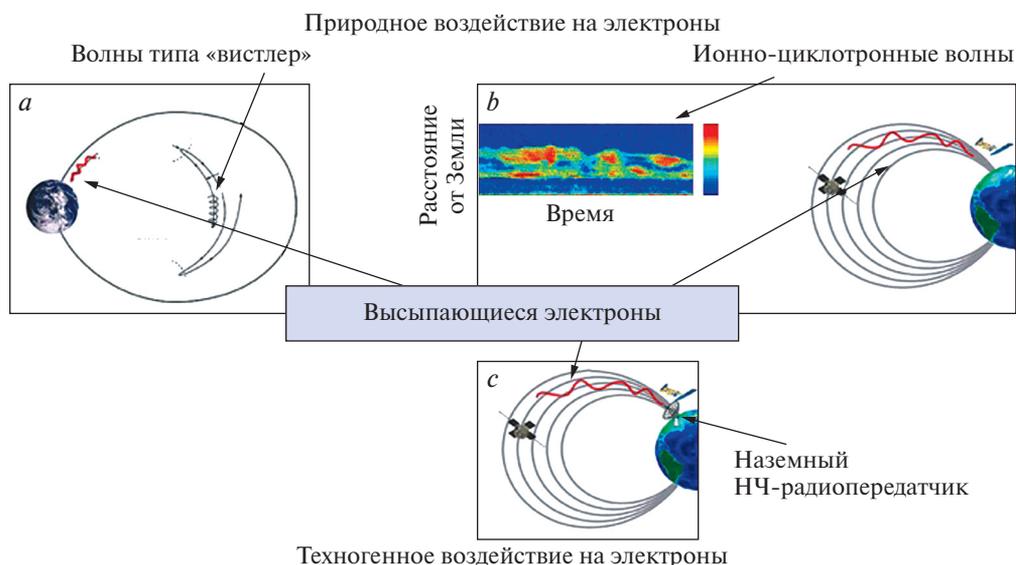


Рис. 7. Процессы, обусловленные взаимодействием типа «волна-частица» природного происхождения (а, b) и техногенного происхождения (с). Оба эти механизма приводят к высыпанию частиц из радиационных поясов в атмосферу

диапазоне. Оказывается, что именно в этом диапазоне частот находятся так называемые «свистящие атмосферерики», или вистлеры, – волны, генерируемые во время молниевых разрядов в районах грозовой активности. У них широкий частотный спектр с максимумом в районе 1–10 кГц. Эти волны распространяются преимущественно вдоль магнитных силовых линий и, «встречая» на своем пути захваченные электроны, «заставляют» их покинуть область устойчивого захвата – направить их движение в верхние слои атмосферы.

Рис. 7а иллюстрирует механизм взаимодействия вистлеров с электронами радиационных поясов. Считается, что зазор между внешним и внутренним радиационным поясом электронов на $2 < L < 3$ – следствие именно такого механизма взаимодействия частиц с волнами. Именно здесь, на средних широтах, происходит интенсивная генерация вистлеров во время грозовой

активности, которые «истощают» захваченные в магнитном поле потоки частиц. Это явление наводит на мысль о том, не могут ли пучки высыпавшихся электронов на средних широтах вызывать в верхней атмосфере явления типа TLE? На первый взгляд, это соответствует действительности: вистлеры распространяются в виде коротких импульсов, длительность которых должна соответствовать времени развития разрядного процесса в грозовом облаке, формируя тем самым сопоставимые по длительности пучки высыпавшихся частиц и вспышек света.

Высыпания частиц типа TEP с энергией в десятки – сотни кэВ также могут приводить к увеличению проводимости D-слоя ионосферы над грозовой областью или в сопряженной точке и, как следствие, к изменению порога локального электрического пробоя атмосферы.

В 1995 г. был осуществлен эксперимент EuroSprite по генерации импульсов

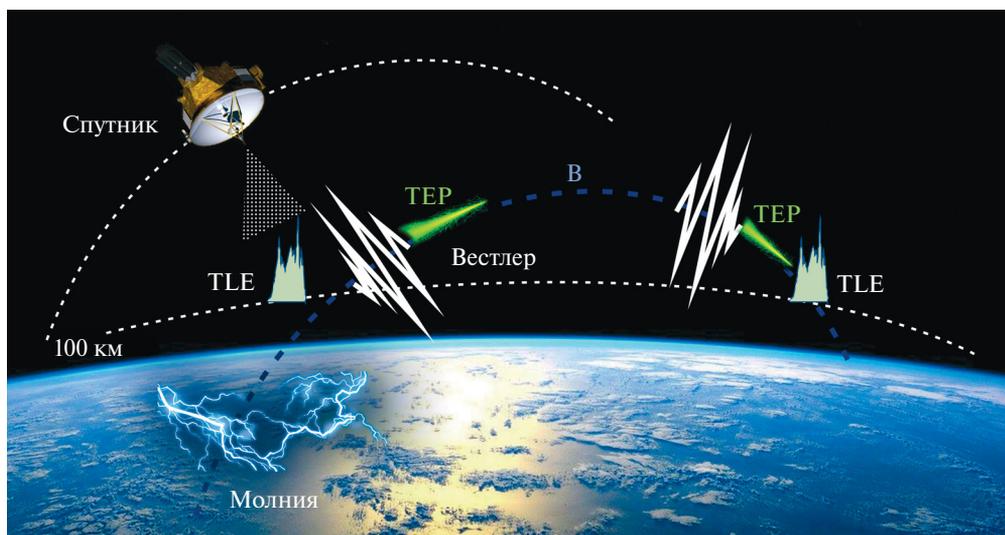


Рис. 8. Возможный механизм выпадения транзитных потоков электронов (ТЕР) при взаимодействии с низкочастотными пакетами электромагнитных волн типа «вистлер» и, как следствие, генерация флуоресцентного света (ТЛЕ) при взаимодействии частиц с атмосферой

ОНЧ-волн в диапазоне 3–30 кГц – по сути, имитации воздействия вистлера на атмосферу. Оказалось, что в широкой пространственной области на высоте около 100 км происходит изменение проводимости D-слоя ионосферы и генерируются оптические вспышки типа спрайтов.

В подтверждение этой модели приведем более подробные данные о потоках электронов как в области внутреннего радиационного пояса, так и под поясами, полученными на спутнике «Вернов». Этот спутник летал на орбите высотой около 600 км, и поэтому на столь малых высотах он мог регистрировать высыпавшиеся и квазизахваченные (т.е. совершающие не более одного оборота вокруг Земли) частицы – кратковременные всплески электронов длительностью с энергией более 50 кэВ.

Полная картина пространственного распределения частоты наблюдений таких всплесков показана на рис. 9. Они наблюдаются в довольно обшир-

ной широтной области околоземного пространства на малых высотах: от авроральной области и внешнего радиационного пояса и до экваториальных областей, где существование стабильно захваченных частиц исключено.

Можно предположить, что часть регистрируемых на спутнике электронов (на высоте 600 км) могла появиться и за счет инжекции восходящих лавин убегающих электронов. Однако такой механизм представляется малоэффективным в силу энергетических потерь электронов в процессе их транспорта из нижних слоев атмосферы до высот орбиты спутника в несколько сот км. Действительно, в наших экспериментах на спутниках «Татьяна» и «Вернов» нам не удалось обнаружить такие спорадические потоки электронов.

Остается возможность появления электронов как вторичных, возникающих в процессе комптоновского рассеяния и генерации, электрон-позитронных пар при взаимодействии гамма-квантов

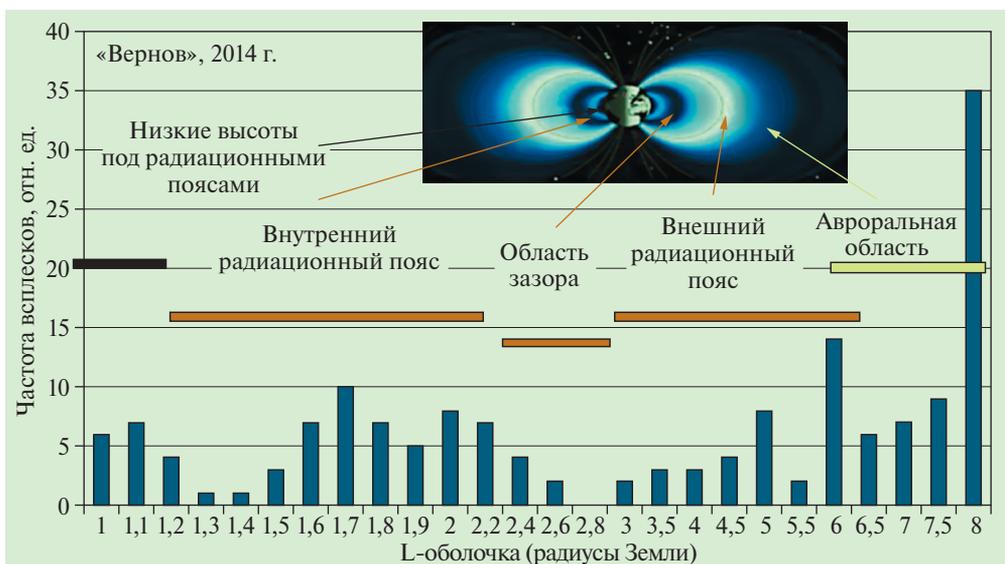


Рис. 9. Глобальное распределение и частота появления всплесков, высыпающихся и квазизахваченных электронов на разных L-оболочках на малых высотах (около 600 км)

TGF с атомами атмосферы на высотах около 40 км (рис. 2). Действительно, такие вторичные частицы наблюдались в эксперименте BATSE на спутнике CGRO, RHESSI и *Fermi*. Эти вторичные энергичные электроны и позитроны могли быть инжектированы вдоль магнитного поля во внутреннюю магнитосферу как результат развития TGF. Они обнаруживаются на низкой околоземной орбите: либо непосредственно над местом генерации TGF или в сопряженной точке на расстоянии нескольких тысяч километров. Более того, был отмечен их дрейф в магнитном поле после выхода в космическое пространство из атмосферы. Однако, насколько это явление может быть типичным и масштабным, предстоит еще выяснить. Нельзя исключить и альтернативный вариант объяснения их природы за счет и высыпания электронов и позитронов из радиационных поясов. Поэтому гипотеза о происхождении таких электронных транзиентов на малых высотах в средних и низких

широтах за счет их рассеяния на электромагнитных волнах типа грозовых вистлеров представляется более предпочтительной.

Электромагнитные волны внутри радиационных поясов могут появиться не только вследствие грозовой активности. Человек в этом плане также вносит свою лепту. В прошлом веке начала развиваться дальняя радиосвязь в килогерцовом диапазоне. На земле были сооружены мощные радиопередатчики, работа которых, как оказалось, напрямую оказывает воздействие на частицы, захваченные магнитным полем. По аналогии с воздействием грозовых вистлеров, наземные радиопередатчики «заставляют» электроны покидать область устойчивого захвата и вторгаться в атмосферу (рис. 7с). Это еще один из возможных механизмов появления электронных транзиентов на малых высотах.

Очевидное «присутствие» транзиентных потоков высыпающихся электронов в широкой области пространства

(рис. 9) хорошо согласуется с пространственной картиной слабых TLE, и поэтому они могут быть рассмотрены в качестве частиц, вызывающих флуоресцентные свечения в атмосфере, что и наблюдается в эксперименте (рис. 3с).

Обратимся вновь к данным на рис. 9. Определенная доля TEP регистрируется и в районе внешней границы радиационных поясов и в авроральной области. На этих широтах, очевидно, никакой грозовой активности нет. Какова же может быть природа этих электронных высыпаний?

Опять-таки, во всем могут быть «виноваты» волны. Но в этой области они не связаны с атмосферным электричеством – грозы на севере и на юге в авроральной зоне, как правило, не наблюдаются. Сразу следует отметить, что до конца механизм генерации TEP на высоких широтах неясен, но представления о нем есть.

Чтобы детально исследовать возможные механизмы генерации TEP, мы недавно осуществили специальный эксперимент. Два спутника: «Ломоносов» на низкой высоте и «Электро-2» на геостационарной орбите – одновременно регистрировали потоки высыпавшихся электронов в одной и той же магнитной силовой трубке. Одновременно с измерениями на спутниках европейские коллеги осуществили запуск аэростата на высоту около 40 км из Кируны (Швеция) с измерительной аппаратурой, также позволяющей регистрировать энергичные электроны (рис. 10). Мы заметили одновременное появление всплесков электронов и на спутниках, и на аэростате, что подтверждает картину их высыпания вдоль магнитной силовой трубки в атмосферу.

Оказалось, что во время наблюдения TEP фиксировалась интересная динамика различных плазменных образований

Рис. 10. Эксперимент по синхронным измерениям процесса высыпания энергичных электронов из радиационных поясов: спутник «Электро-2» на геостационарной орбите (36 000 км) регистрировал изменения параметров плазмы, спутник «Ломоносов» на низкой орбите (600 км) – потоки электронов, а на аэростате, запущенном из Кируны, Швеция – тормозное излучение высыпавшихся электронов (эксперимент BARREL)



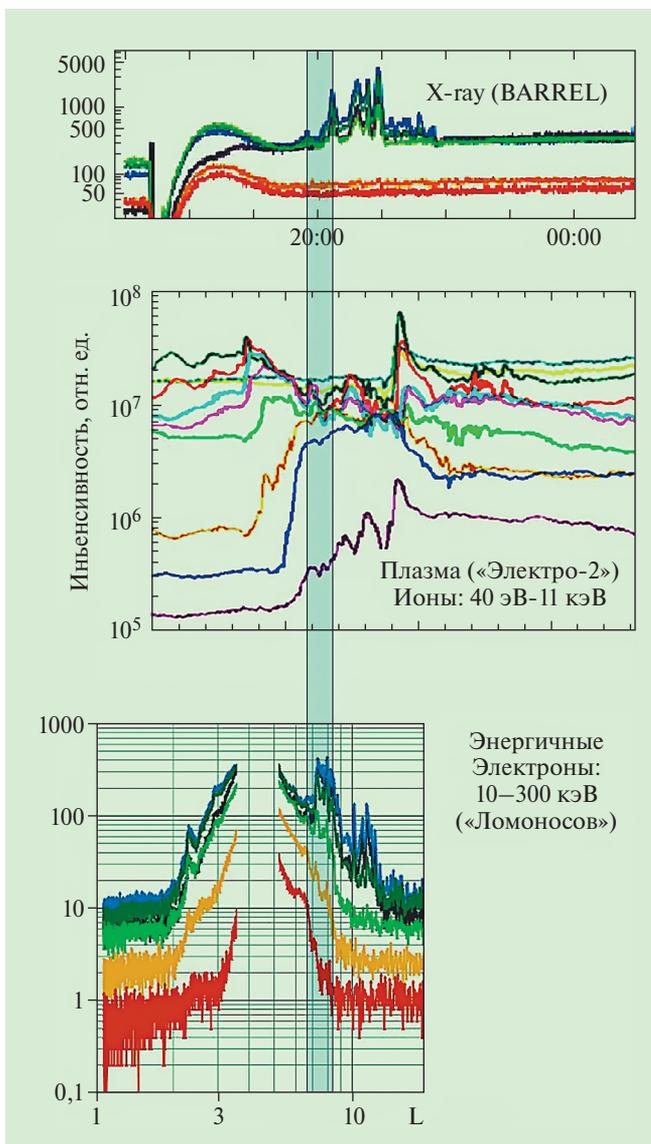


Рис. 11. Результаты синхронных измерений в рентгеновском диапазоне (тормозное излучение электронов) на аэростатах над Кируной, Швеция (эксперимент BARRELL), плазмы на геостационарной орбите (эксперимент на спутнике «Электро-2») и измерения энергичных электронов на спутнике «Ломоносов»

в этой области пространства: взаимодействие горячей плазмы из плазменного слоя, набегающей на область

повышенной концентрации холодной плазмы с ночной стороны магнитосферы во время небольшого геомагнитного возмущения (рис. 11).

Именно этот эффект может быть ответственным за генерацию так называемых ионно-циклотронных волн, которые и рассеивают электроны радиационных поясов (рис. 7b). Так могли появиться TEP на высоких широтах. Вторгаясь в атмосферу, они инициируют, в свою очередь, транзитные свечения в т. ч. и в УФ-диапазоне, известные как дискретные полярные сияния – очень короткие пульсации (до мсек) на фоне квазистационарного свечения. Такие дискретные авроры наблюдаются и наземными быстрыми фотометрами, и приборами на спутниках.

Полярные сияния – результат воздействия на атмосферу в основном электронов с энергией около 10 кэВ. Именно они ответственны за возбуждение молекул и атомов воздуха на высотах порядка 100 км и несколько ниже. Проводя аналогию со средне- и низкоширотными TLE, можно предположить, что и последние инициируются электронами таких же энергий. В этом их отличие от более мощных TLE, которые связаны с грозovým электричеством над континентами и обусловлены существованием лавин электронов значительно больших энергий.

Подразумевая возможность альтернативной реализации моделей генерации «снизу-вверх» и «сверху-вниз»,

Подразумевая возможность альтернативной реализации моделей генерации «снизу-вверх» и «сверху-вниз»,

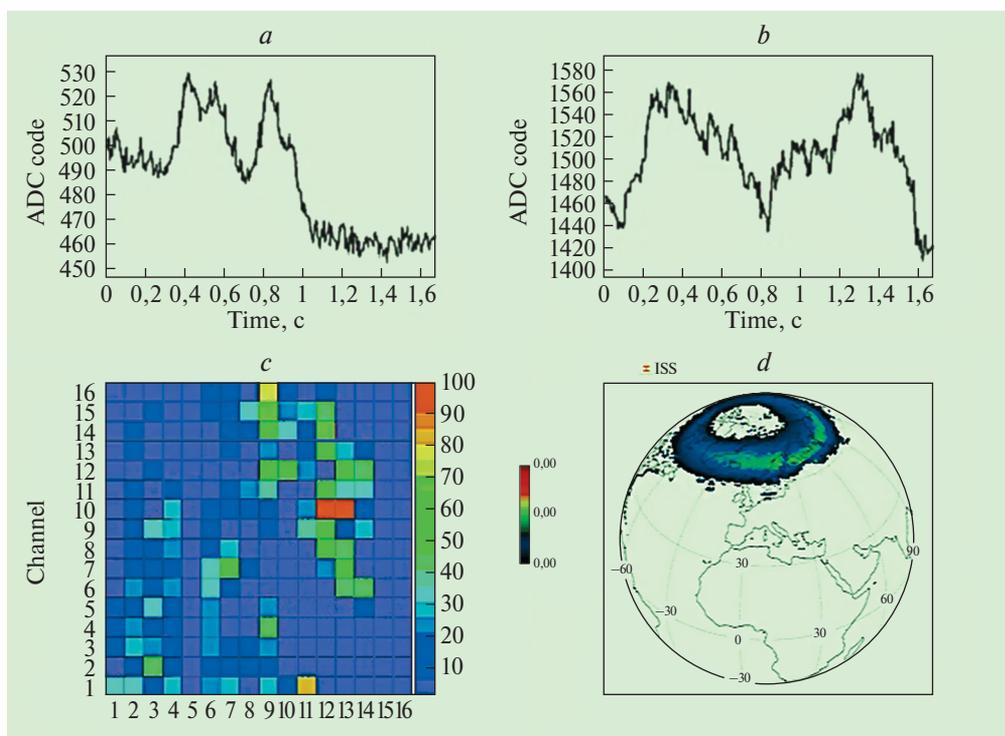


Рис. 12. Пример регистрации дискретного полярного сияния. *a, b* – Временные профили потока УФ-излучения во время пролета спутника «Ломоносов» над овалом полярного сияния; *c* – пиксельная карта события в том же пролете; *d* – плотность потока низкоэнергичных электронов, вызывающих полярное сияние. Источник: Klimov P. et al., *Remote Sens.* 2019, **11**, 2449

нельзя исключить и их совместное воздействие на атмосферу на высотах мезосферы в несколько десятков км. В этом случае можно говорить о синергии их воздействия на область, где генерируются TLE типа спрайтов, эльвов и джетов. Лавины убегающих электронов и ТЕР могут способствовать развитию электрического пробоя на высотах в десятки км и, как следствие, вызвать свечения азота и кислорода. Нельзя исключить и прямого воздействия ТЕР на атомы атмосферы посредством, скажем, ударной ионизации. В основе такого совместного действия двух механизмов лежат процессы в нижней атмосфере, связанные с генерацией атмосферного электричества и молниевых разрядов. Но пучки электронов «снизу» – это лавины

убегающих электронов, а ТЕР «сверху» – высыпания электронов из радиационных поясов под воздействием электромагнитных низкочастотных волн.

ТРАНЗИЕНТЫ ПОД ОБЛАКАМИ

В рамках такой «симбиозной» модели генерации энергичных транзиентов в гамма- и оптическом диапазонах на атмосферных высотах в десятки км, можно попытаться объяснить и появление гамма-излучения и на высотах ниже облачного покрова во время усиления грозовой активности.

Эмиссия гамма-излучения с энергиями до 50 МэВ во время гроз была зарегистрирована в ряде экспериментов

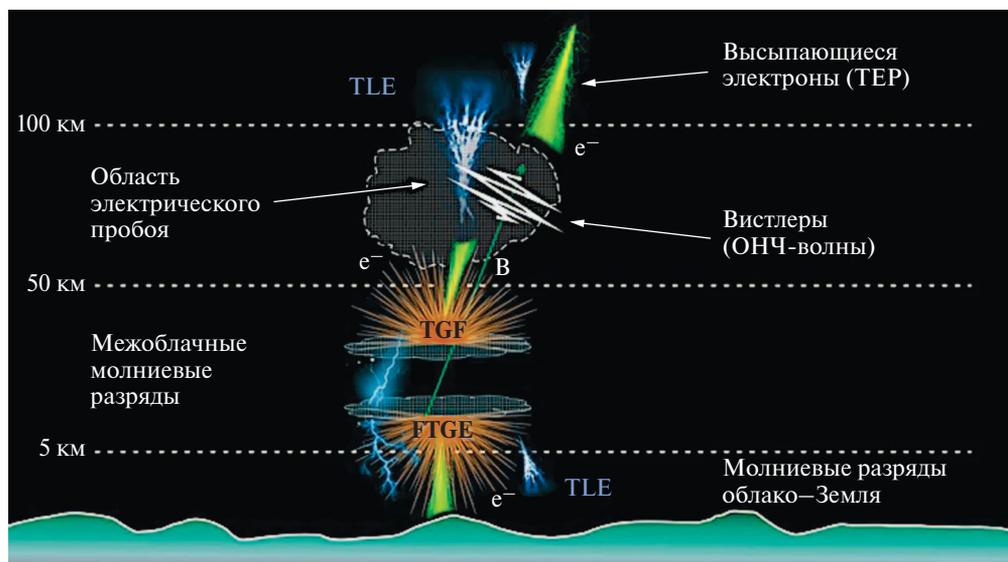


Рис. 13. Возможный сценарий развития транзистентных электромагнитных явлений в оптическом (события типа TLE) и гамма-диапазонах (события типа TGF и FTGE), в которых лавины электронов, генерируемые в районах грозовой активности, а также пучки электронов, высыпавшихся из радиационных поясов, играют ключевую роль

на поверхности Земли и в горах. Длительность таких событий достигает нескольких часов, и они затухают после окончания грозы. Гамма-излучение, наблюдающееся на высотах гор во время усиления грозových электрических полей, получило название TGE (сокращение от Thunderstorm Ground Enhancements, «грозовые наземные возрастания») или гамма-свечения⁵. Их происхождение может быть связано с фоновыми электронами от ШАЛ космических лучей, ускоренных электрическим полем, но потоками, направленными вниз, к поверхности Земли.

Однако такие явления не могут быть отнесены к транзистентным процессам, которые рассматриваются в данной статье, генетически связанным с самим молниевым разрядом. В отличие от последних, их длительность дости-

гает, как указывалось, десятки минут и даже часы. Возрастания интенсивности потоков TGE прерываются и достигают фонового уровня в момент молниевое разряда. Более того, было доказано, что низкоэнергичная часть (< 3 МэВ) т. н. TGE обусловлена эманацией радона (Rn^{222}) из горных пород, продукты распада которого, распространяясь вместе с аэрозольными частицами или выпадая в виде осадков с дождевой водой, создают поля гамма-излучения с характерными для продуктов распада радона моноэнергетическими структурами без формирования самой лавины электронов – ключевого агента энергичных транзистентов⁶.

Для предмета этой статьи интересно появление действительно транзистентных всплесков гамма-излучения на

⁵ Chilingarian A.A. et al. Phys. Rev. D82043009 (2010).

⁶ Bogomolov V.V., Iyudin A.F., Maximov I.A., Panasyuk M.I., and Svertilov S.I. Phys. Rev. D99.

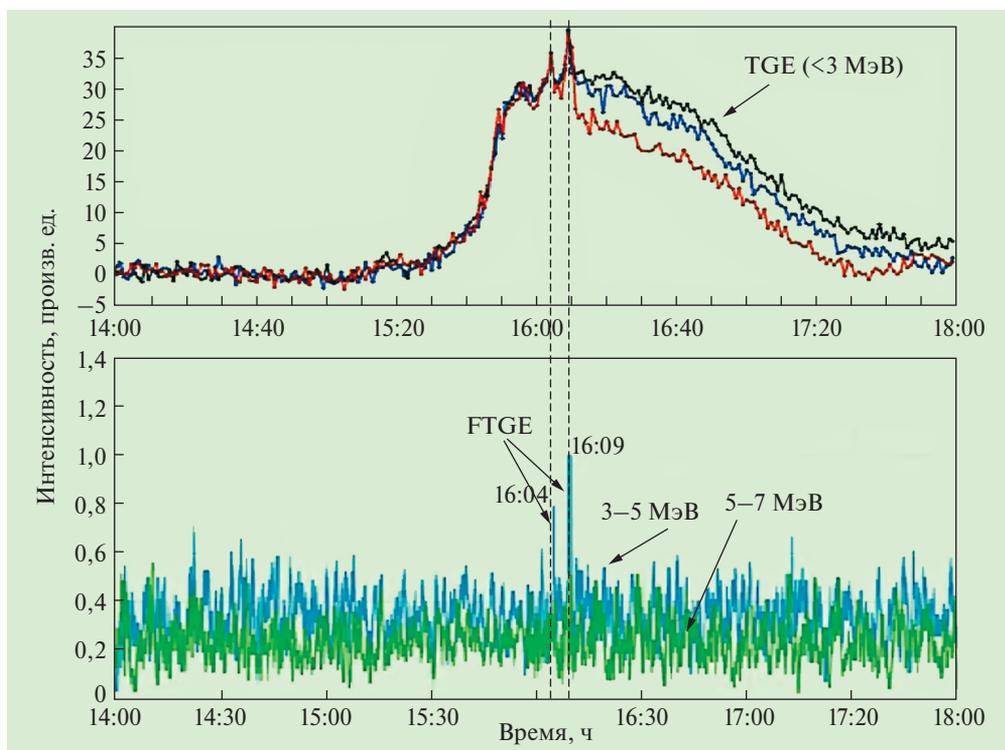


Рис. 14. Регистрация быстро всплеска гамма-излучения (FTGE) с более жестким энергетическим спектром на фоне более медленного (TGE) на установке на горе Арагац (3200 м) во время грозовой активности. Компиляция из: Bogomolov V. et al. Phys. Rev. D99

фоне более медленного процесса эмиссий типа TGE. Такие транзиенты имеют более жесткий спектр по сравнению с TGE. Именно импульсная картина этих явлений, связанная с быстрыми вариациями электрических полей, дает основания объяснять их генерацией на малых высотах, под облачным покровом, лавин убегающих электронов, направленных к Земле, в отличие от процесса генерации «медленных» явлений типа TGE. Эти события можно назвать «быстрыми приземными возрастаниями» (Fast Terrestrial Ground Enhancement, FTGE). В рамках рассматриваемой модели с участием лавин электронов FTGE это – те же TGF, генерируемые на больших высотах, но направленные вниз.

Такие выводы хорошо подтверждаются и результатами экспериментов на установке Telescope Array в США, в которых были зарегистрированы транзиентные (в миллисекундном диапазоне) потоки гамма-излучения во время гроз, связанные с появлением лидера молниевых разрядов на высоте в несколько км. Проведенное моделирование показало, что они могут быть вызваны электронными лавинами электронов с энергией > 100 эВ. Могут ли FTGE быть связаны с оптическим излучением? В пользу этого предположения свидетельствуют результаты другого эксперимента, проведенного в горах Тянь-Шаня⁶. С помощью быстрых, работающих вплоть до микросекундного диапазона, детекторов электрических

полей, гамма-излучения, а также ультрафиолета и инфракрасного света были действительно зарегистрированы оптические вспышки практически одновременно со всплесками гамма-квантов (FTGE) и сильных вариаций электрических полей. Эти результаты не противоречат модели «лавины убегающих электронов» как инициатора комплекса транзиентных энергичных явлений во время грозовой активности.

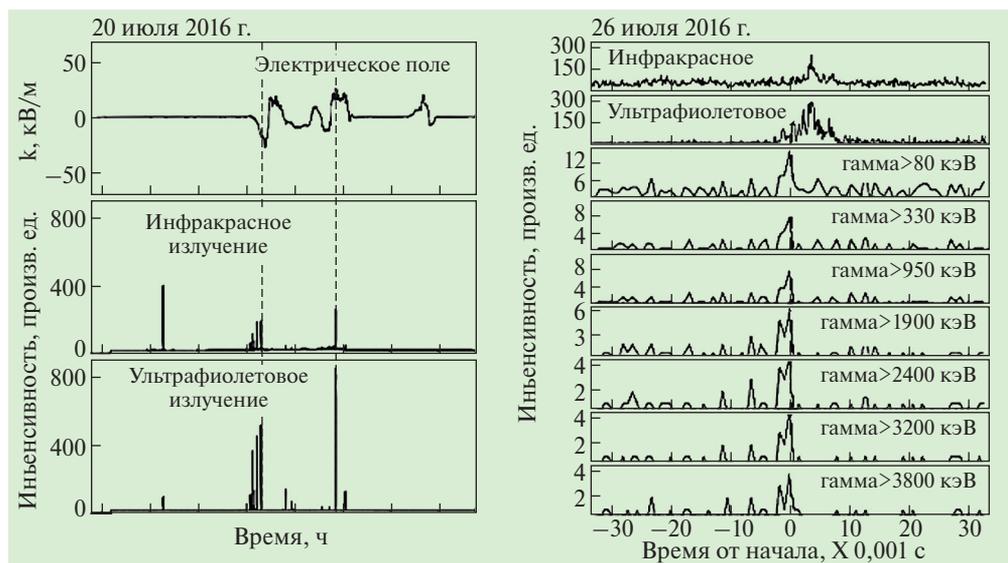
Дальнейшие эксперименты с быстрыми гамма- и электронными детекторами и с большей чувствительностью, чем используемые в настоящее время, могут подтвердить эти результаты и предоставить больше экспериментальных аргументов в пользу обсуждаемой модели. В этом случае картина транзиентных явлений в нижней и верхней атмосфере типа TGF, TLE и FTGE найдет объяснение в рамках единой модельной концепции.

УГРОЗА ТРАНЗИЕНТОВ?

Представляют ли описанные выше энергичные транзиентные явления в атмосфере Земли какую-либо опасность для летательных аппаратов? Если рассматривать TLE только в плане высвобождения световой энергии, то, несмотря на их огромную энергетику (энергия излучения в импульсе для них может достигать сотен мегаджоулей), существенной опасности представлять они не могут, т. к. ультрафиолет поглощается в достаточно тонком слое материала. Тем не менее для открытых сенсоров на борту космических аппаратов воздействие ультрафиолета может стать губительным.

Другое дело – транзиентные лавины убегающих электронов, которые создают радиационные поля нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов.

Рис. 15. Регистрация транзиентных всплесков ультрафиолетового (240–380 нм) и инфракрасного (610–800 нм) излучений во время быстрых вариаций электрических полей (слева) и аналогичное оптическое событие (справа), связанное с генерацией гамма-излучения (FTGE). Измерения на высокогорной станции ФИАН на Тянь-Шане во время грозовой активности. Адаптировано из статьи: Gurevich A., Garipov G., Almenova A. et al., *Atmospheric Research*, **211**, 73–84 (2018)



Оценки радиационных доз, которые были сделаны на основе модельных соображений, дают значения, которые считаются безопасными для организма человека. Но такие расчеты носят весьма приблизительный характер. Необходимы прямые измерения вблизи «эпизента» события типа TLE или TGF.

Прямые измерения были проведены американским исследователем Дж. Дайером (J. Dwyer) на самолете вблизи грозового облака. Они дали относительно небольшие, неопасные величины доз радиации. Но какие дозы могут быть наверху, значительно выше грозовых облаков, где развиваются активные процессы, связанные с электромагнитными транзиентами, пока непонятно.

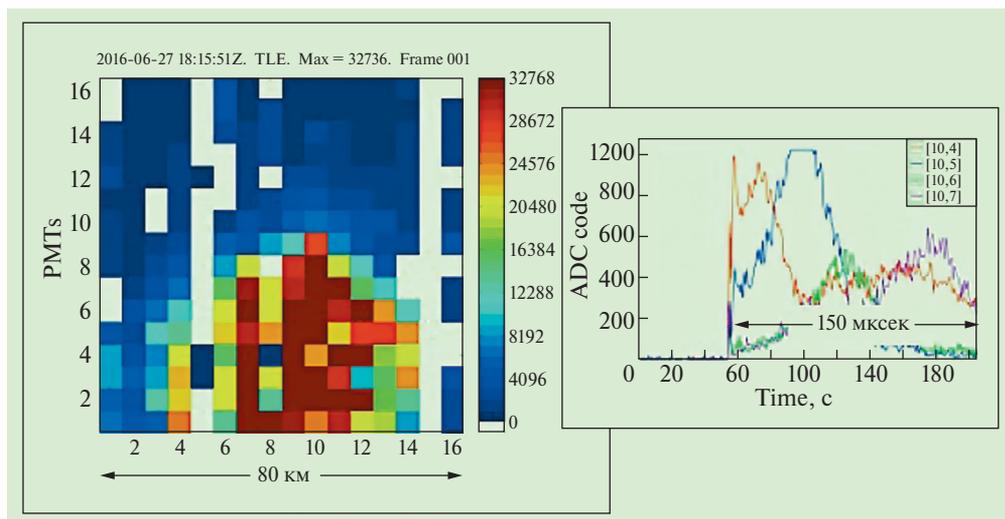
Есть еще один, потенциально опасный фактор – он связан с электромагнитным излучением, сопровождающим такие явления как TLE или TGF. В районе их генерации должны возникать мощные флуктуации электрических полей, обусловленные изменением параметров

окружающей плазмы, в первую очередь, за счет воздействия на среду либо лавины убегающих электронов, либо пучков, высыпающихся из радиационного пояса. Эти факторы должны, к тому же, изменить проводимость мезосферы на высотах в десятки километров, что не может не отразиться и на распространении радиоволн, а значит, возможны проблемы для телекоммуникаций.

На таких высотах самолеты пока не летают. Но мы уже видим единичные запуски стратосферных летательных аппаратов, и можно быть уверенными, что число их будет расти. Поэтому этот фактор природных потенциальных угроз сбрасывать со счета не следует.

Транзиентные электромагнитные процессы в атмосфере должны влиять на ее химический состав. Поток электронов, сопровождающие такие явления как TLE, TGF и FTGF, могут вызвать диссоциацию молекул азота и появление его оксидов – NO, NO₂, наряду с космическими лучами. Оксиды

Рис. 16. Необычное мощное транзиентное световое явление, наблюдавшееся на спутнике «Ломоносов» над Средиземным морем в безоблачную погоду (горизонтальный размер около 80 км, длительность до 150 мксек). Слева – его изображение в фотодетекторе ультрафиолетового телескопа ТУС; справа – временные профили яркости свечения в разных пикселях. Источник: P. Klimov et al., Remote Sens. 2019, 11, 2449



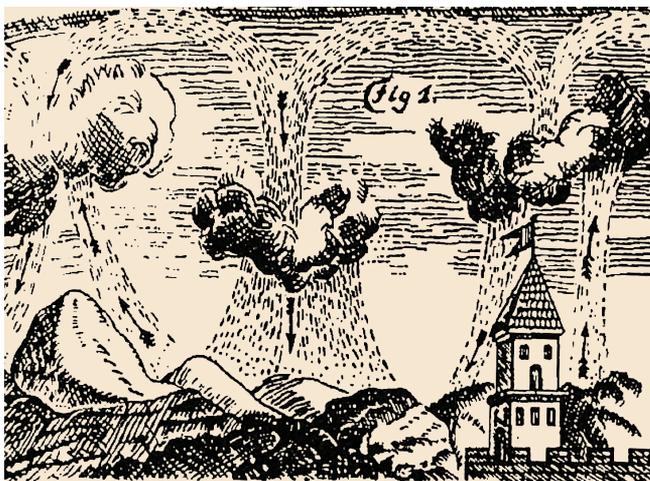


Рис. 17. Атмосферное электричество как результат взаимодействия восходящих и нисходящих потоков воздуха по М.В. Ломоносову

азота ответственны за образование озона (O_3). Этот процесс может иметь компенсирующий эффект на естественную убыль озона в результате воздействия на него солнечного ультрафиолета или антропогенных источников. Транзиенты также могут привести к изменениям концентрации парниковых газов.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Возможные сценарии генерации световых транзиентов, описанные выше, в настоящее время не исчерпывают новые экспериментальные данные по их наблюдениям. Свидетельством этому являются необычные события TLE, наблюдавшиеся на спутнике «Ломоносов» заведомо вдали от областей грозовой активности. Их мощность была чрезвычайно велика, и пока не удалось связать их появление с определенным геофизическим или антропогенным явлением.

Недавно появилась модель⁷, которая, возможно, приблизит нас к выяснению природы подобных явле-

ний, а также более слабых по своей энергетике TLE и, как это подчеркивалось выше, не связанных с грозовым электричеством. Эта модель основана на предположении существования заряженных областей в мезосфере размером в 10–15 км на высотах 60–70 км при определенных метеорологических условиях. Эти области отличаются от обычных грозовых облаков меньшей плотностью пространственного заряда и меньшим порогом пробоя воздуха. Модель предсказывает генерацию «мезосферных разрядов» длительностью в несколько миллисекунд и мощностью до нескольких мегаджоулей. Вероятно, можно предположить, что высыпания электронов типа TEP (в рамках данной модели) могут играть роль дополнительного фактора, уменьшающего величину электрического пробоя воздуха за счет его ионизации.

Еще одна проблема имеет фундаментальный характер и может быть решена в ходе дальнейших экспериментов. Могут ли явления типа TLE быть связаны единым физическим процессом с TGF? Это вопрос для будущих исследований. До сих пор экспериментаторы не получили объективных доказательств такой связи. Впрочем, следует упомянуть недавно опубликованный результат, полученный с помощью прибора ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor) на Международной космической станции. Авторы показали, что TGF возникает в течение первоначальной фазы межоблач-

⁷ Surkov V.V. Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics, 210 (2020).

ного разряда молнии, а TLE типа ELVE возникает через 10 мксек после гамма-всплеска. Однако это результат пока единичного синхронного наблюдения этих явлений, и он относится только к событиям типа ELVE. Необходимы более детальные исследования.

Остается много вопросов и в области теоретических моделей. Именно поэтому исследования и световых и гамма-транзиентов активно развиваются. Пока невозможно дать окончательный ответ в пользу той или иной модели. Мы находимся на стадии интенсивного исследования этих необычных явлений в атмосфере нашей планеты. И конечный ответ может отличаться от рассуждений, приведенных выше.

Что касается самих электрических полей в атмосфере, то наш великий соотечественник Михайло Ломоносов еще в 1753 г. описал механизм их появления в своей речи «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих»: «...восходящие и нисходящие потоки, вследствие трения частиц паров друг о друга, могут дать электричество. Грозы бывают чаще в 3–4 часа дня, так как именно в это время приземная часть атмосферы сильнее всего нагрета и лег-

че и быстрее поднимается вверх. Если электрическая сила простирается до самой земли, то даже при наличии грозовой тучи молнии и грома нет; если же электричество до земли не доходит, то облако передает его земле круто – молнией и громом». Трансформация механических движений атмосферных масс в электрическую энергию не подвергается сегодня сомнению.

Практически одновременно с Ломоносовым американский ученый Бенджамин Франклин в 1752 г. сделал вывод о природе молнии как разряда между облаком и землей.

Уместно вспомнить ранние работы Нобелевского лауреата Чарльза Вильсона, который в начале XX в. выдвинул идею о связи остаточного тока в электроскопе с ускоренными в электрических полях грозовых облаков электронами (чем не «лавина убегающих электронов», положенная в основу ряда современных моделей!). И хотя эта интерпретация не была применена к обнаруженному им явлению, сама идея через много лет получила свое развитие в транзिएнтах типа TGF и TLE, открытых в конце XX века! Таков извилистый путь науки.



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) данную услугу мы предоставляем бесплатно

Задать вопрос и узнать о стоимости услуги вы можете по адресу cee@naukaran.com

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА



СЫСОЕВ Артем Андреевич,
ИУДИН Дмитрий Игоревич¹,

доктор физико-математических наук

Институт прикладной физики РАН

Приволжский исследовательский медицинский университет

DOI: 10.7868/50044394821010035



В статье представлены основы современных представлений о физике атмосферного электричества в целом и многообразии форм молниевых разрядов в частности. Освещаются основные проблемы, методы исследований и прикладная значимость данной области науки. Кратко обсуждаются возможные причины, отвечающие за многообразие типов атмосферных разрядов.

ВВЕДЕНИЕ

Вероятно, молнии на Земле существовали на протяжении большей части ее истории, возникнув примерно три миллиарда лет назад. Возможно также, что именно они сыграли ключевую роль в появлении первых органических молекул, а следовательно, и самой жизни.

¹ Также Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Молния, будучи самым известным из проявлений атмосферного электричества, с незапамятных времен будоражила воображение людей. На заре человечества красота и величие молниевых разрядов без сомнения вызывали у наших предков благоговейный страх. Религиозные верования всех без исключения древних цивилизаций включали в себя молнию. Молния является атрибутом древнегреческого Зевса, древнеримского Юпитера, древнеегипетского Сета, древнеиндийского Индры,

древнескандинавского Тора, древнесирийского Тешупа. На изготовленной в Месопотамии печати, датированной примерно 2200 г. до н.э., изображена богиня, стоящая на плечах крылатого создания и держащая по пучку молний в каждой руке. За ней в четырехколесной повозке изображен бог погоды, вызывающий гром ударом хлыста. Молния также является эмблемой богини Тянь Му в китайской мифологии. Тянь Му почиталась как одна из пяти сановников «Министерства Гроз» под председательством Лэй Цу, Бога Грома, которому также помогает Лей Кунг, бьющий в барабан Повелитель Грома. Многие ранние статуи Будды изображают его с зубчатой молнией в правой руке. Буряты считали, что их бог создает молнии, бросая камни с неба. Некоторые индейские, североамериканские и африканские племена сохраняют веру в то, что молния создается некоей магической птицей, пикирующей с облаков на землю.

Ассоциирование молнии с орудием возмездия богов, вероятно, связано с тем, что чрезвычайно быстротечный многокилометровый разряд, сопровождающийся яркой вспышкой света и раскатом грома, всегда казался людям чем-то пугающим и опасным. И не зря.

Молниевые разряды представляют реальную угрозу не только жизни и здоровью людей, но и работоспособности технических устройств. Последнее особенно актуально в эпоху слаботочной электроники, которая чрезвычайно уязвима к порождаемым молниями индукционным токам. Причиняемый молниями ущерб трудно переоценить. Так, по данным американской статистики за 1966–1995 гг. в США в год от молний гибнет примерно 85 человек и еще несколько сотен получают травмы, что делает молнию

вторым по опасности после наводнения природным бедствием². Особенно опасны молнии, ударяющие в места хранения горючих материалов. При этом зачастую дело не ограничивается только экономическими потерями. Так например, в Люксембурге в 1807 г. ударившая в оружейный склад молния стала причиной возгорания бочек с порохом. В результате взрыва и пожаров было разрушено два квартала города, а сотни людей погибли.

В настоящее время основной ущерб от молниевых разрядов связан с нарушением работы электрических сетей, без которых жизнь современного человека практически немыслима. Речь здесь идет не только о банальных телевизионных и радиопомехах. Нередки случаи, когда удары молнии приводили к долговременным перебоям с электрической энергией. Так, поздно вечером 13 июля 1977 г. молния стала причиной отключения электричества в Нью-Йорке, которое продлилось целые сутки. Отсутствие привычных благ превратило внешне цивилизованных горожан в дикарей: начались массовые грабежи и общественные беспорядки, значительно повысился общий уровень агрессии. Более полутора тысяч магазинов оказались разорены местными жителями, а оценки общего ущерба от суточных беспорядков варьировались от 300 миллионов до миллиарда долларов. Огромной проблемой стало спасение застрявших в лифтах людей. Со всем недавно, в 2011 г. взрыв трансформатора в результате удара молнии в Ирландии стал причиной серьезного сбоя работы дата-центров компаний *Microsoft* и *Amazon*. Клиенты потеряли доступ к медицинским сервисам

² Данные по Rakov V.A. *Lightning: Physics and effects* / V.A. Rakov, M.A. Uman New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p.

Amazon, произошли сбои в бизнес-приложениях *Microsoft*, а также приложениях других компаний. Восстановление больших объемов данных потребовало около двух суток. Угроза нарушения работы онлайн-приложений быстро приобретает глобальный экономический характер в связи с тенденцией массового перехода к работе через удаленный доступ. Таким образом, основная практическая ценность изучения молниевых разрядов связана с совершенствованием методов защиты от них.

Кроме чисто прикладных аспектов, изучение явлений атмосферного электричества представляет огромный теоретический интерес. Хотя исследования электрического пробоя в воздухе ведутся уже многие десятки лет, до сих пор не создана исчерпывающая теория, позволяющая количественно описать, а в некоторых случаях даже качественно объяснить динамику некоторых наблюдаемых в лабораторных и природных условиях процессов. Можно сказать, что сегодня физика атмосферного электричества во многом находится на стадии сбора экспериментальных данных.

Сложность изучения явлений атмосферного электричества обусловлена как большим количеством электродинамических, плазмохимических и термодинамических процессов, сопровождающих пробой, так и принципиально стохастическим характером развития разряда. Кроме того, исследование активных геофизических систем в целом и экстремальных атмосферных явлений в частности объективно связано с большими трудностями, обусловленными, прежде всего, масштабностью происходящих в них явлений. Величины физических параметров, характеризующих активную атмосферу, изменяются на 15 порядков величины: от атомных расстояний, актуальных для процессов электризации грозового облака, до масштабов в десятки и сотни

километров, охватывающих молниевые разряды и движения воздуха во всей грозовой системе.

Даже молния, будучи самым известным из проявлений атмосферного электричества, изучена относительно слабо. Показательным примером этого факта является список десяти наиболее актуальных проблем физики молнии, приведенный в недавнем обзоре³. Возглавляют его вопросы о том, каким образом происходит инициация молнии в облаке и какие физические механизмы отвечают за распространение различных типов молниевых разрядов. Сами авторы выражают свое отношение к современному уровню понимания физики молнии следующей яркой фразой: *«Размышляя о том, как много мы знаем о сложных экзотических астрофизических объектах, расположенных в другой части вселенной, кажется поразительным, что мы не понимаем основ процесса зарождения привычной всем молнии в облаке, находящемся всего в нескольких милях над нашими головами»* (перевод авторов).

ОТЦЫ-ОСНОВАТЕЛИ УЧЕНИЯ ОБ АТМОСФЕРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Может показаться, что отсутствие проработанной теории атмосферного электричества связано с недостаточно долгим периодом его изучения, что, конечно же, не верно. На сегодняшний день история исследований молнии насчитывает около 250 лет. Главным зарубежным основоположником данной области науки является Бенджамин Франклин, причем он увлекся изучением атмосферного электричества в воз-

³ Dwyer J.R. The physics of lightning / J.R. Dwyer, M.A. Uman // Physics Reports. 2014. jan. V. 534, No. 4. P. 147–241.

расте 40 лет, когда случайно зашел на популярную лекцию доктора Спенса. Сразу после этого Франклин выписывает из Англии все существующие к тому моменту приборы и начинает свои знаменитые исследования. Уже через год он заводит переписку с Коллинсоном, в которой излагает основы окончательно оформившейся позднее франклиновой теории электричества. Именно он впервые заговорил о том, что электричество крайне популярной тогда лейденской банки и молнии имеют единую природу и предложил способ извлечения грозового электричества. Под влиянием идей Франклина в 1752 г. французский священник Далибар во время грозы извлек искру из установленного у себя во дворе изолированного металлического штыря. В том же 1752 г. был проведен знаменитый и крайне опасный опыт Франклина по извлечению искры из металлического ключа, висевшего на нити, к которой был привязан запущенный во время грозы воздушный змей, снабженный металлическим штырем. От ключа Франклин зарядил лейденскую банку и провел с ней серию экспериментов, окончательно подтвердив электрическую природу молнии. Он же изобрел громоотвод и впервые сформулировал закон сохранения заряда.

В России своими работами по атмосферному электричеству прославились современники Франклина: профессор Георг Вильгельм Рихман и величайший русский ученый-энциклопедист Михаил Васильевич Ломоносов.

Будучи теоретиком, Ломоносов написал обстоятельный трактат «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих». В этом поразительном по своей глубине сочинении ученый представляет передовую по тем временам теорию атмосферного электричества и предлагает детальную программу исследований атмосферных

электрических явлений и порождающих их причин. В этом же трактате Ломоносов, среди прочего, сформулировал идею безындукционного механизма зарядки грозового облака. В своем сочинении он утверждает: *«...того ради нет сомнения, что натуральной в воздухе электрической силы суть те же причины, то есть трение или теплота, разное или совокупно»*. Ломоносов справедливо связывает электризацию облачных частиц с конвекцией: *«Что трение паров на воздухе приключиться и произвести электрическую силу может, о том нет ни единого сомнения... трению паров чрез встречное сражение оных быть должно; встречному сражению не отступит воспоследовать, как от противных течений воздуха, в котором оные пары держатся...»* Таким образом, причиной электризации ученый считает *«...движения воздуха, к горизонту перпендикулярные, ... которые не токмо гремущей на воздухе электрической силы, но и многих других явления в атмосфере и вне оной суть источник и начало»*. Установив причину соударения частиц, Ломоносов переходит к «микрoфизике», рассматривая электризацию на языке движения молекул. Академик заявляет, что *«...остается исследовать, есть ли на воздухе те материи и так ли расположены, чтобы встречным их движением возбуждена быть могла электрическая сила. Двоякого рода материи к сему требуются: первое те, в коих электрическая сила рождается; второе – которые рожденную в себя принимают. Между сими электрическую силу крепче всех вода в себя вбирает, которой безмерное множество в воздухе обращается... В числе тел, в которых она трением возбуждается, великое действие производят, жирные материи, которые пламенем загореться могут»*. В том числе приводится и описание физической природы «жирной материи»: *«Между тем жирные шарички горючих паров,*

которые ради разной природы с водяными слиться не могут и ради безмерной малости к свойствам твердого тела подходят, скорым встречным движением сражаются, трутся, электрическую силу рождают, которая, распространяясь по облаку, весь оный занимает». Поразительно, что идеи, высказанные Ломоносовым в XVIII веке по своей сути мало отличаются от современных представлений, о чем будет сказано ниже.

К чести Ломоносова стоит отметить, что на пути к своим открытиям ему приходилось преодолевать не только научные проблемы. Переписка ученого с его покровителем графом Шуваловым свидетельствует о постоянной нехватке денежных средств на проведение исследований. Кроме того, существовали и чисто технические трудности. Так, в том же письме патрону Шувалову академик отмечает: «Я могу уверить Ваше превосходительство, что в мастеровых людях здесь великая скудость, так что для делания себе электрической



машины не токмо где инде, но и с Вашего двора столяра за деньги не мог достать. И для того по сие время вместо земной машины служат мне иногда облака, к которым я с кровли шест выставил». Стоит также отметить, что руководство тогдашней Академии Наук всячески пыталось дискредитировать учение Ломоносова, расценивая материалистическую идею атмосферного электричества как кощунственную. Примечательно, что работы Ломоносова и Франклина независимо друг от друга появились практически одновременно. Во избежание обвинений в плагиате Ломоносов был вынужден аргументированно отстаивать свои научные достижения.

Еще одним выдающимся ученым, оставившим свой вклад в науке, был действительный член Российской Академии наук и художеств, друг и соратник Ломоносова Георг Вильгельм Рихман. Прямо у себя дома Рихман соорудил грозовую машину, изолированный металлический шест, соединенный с электрическим указателем, который можно назвать первым в мире электрометром. Впоследствии к указателю была подсоединена и лейденская банка. С помощью своей установки Рихман провел множество измерений, изучая «электрическую силу» в ясную и грозовую погоду. Основной научной работой Рихмана является законченный в июле 1753 г. доклад «Речь об опытах, примененных над электрической силою посредством машины электрической, показывающей величину себя силы, и о сходстве явлений, произве-

Рис. 1. Гравюра академического мастера Ивана Соколова, посвященная гибели профессора Рихмана во время эксперимента 6 августа 1753 года. Художник должен был зарисовать возникающие искры, чтобы потом проиллюстрировать научную работу Рихмана, и стал свидетелем трагедии

денных искусством такой силы, с явлениями натуральной силы электрической». В нем был дан исчерпывающий обзор всех важнейших экспериментальных исследований того времени, в том числе выполненных самим ученым в 1745–1753 гг. К сожалению, исследования Рихмана не продлились долго. Ученый погиб во время грозы 26 июля (6 августа по новому стилю) 1753 года. Он находился рядом с электрометром, когда от незаземленного штыря отделилась шаровая молния и ударила в висок Рихмана, прошла через все его тело и на выходе в деревянный пол разорвала подошву ботинка. Смерть наступила мгновенно. Показательно, что тогдашняя Академия наук не только не оценила подвиг павшего жертвой науки ученого, но и, несмотря на усилия Ломоносова, отказала вдове в пенсии на воспитание троих малолетних детей. Более того, даже полагавшееся Рихману жалование за день гибели не было выплачено.

ВАЖНЕЙШИЕ СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЯВЛЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Сегодня исследования атмосферного электричества одновременно ведутся по многим направлениям. Одним из самых очевидных методов является фото- и видеосъемка. Именно благодаря ему еще в конце XIX века удалось показать, что после контакта с землей по каналу молнии распространяется не один, а несколько последовательных импульсов тока. В 1900 г. Чарльз Бойс изобретает свою знаменитую камеру (камера Бойса), с помощью которой впервые удалось измерить скорость нисходящего лидера молнии. В дальнейшем он усовершенствовал свое изобретение, достигнув времен-

ного разрешения порядка 1 мкс, что уже достаточно даже для регистрации наиболее быстрого импульса возвратного удара.

В начале XX столетия удалось зафиксировать разветвленность нисходящего лидера молнии, измерить среднее число импульсов в рамках одной молнии и времена между импульсами. Начиная с 1930-х годов стали проводиться оптические наблюдения, выявившие асимметрию развития положительных и отрицательных лидеров молнии. Сегодня активно используются высокоскоростные оптические камеры с частотой кадров до 300 тыс. в секунду для сбора информации о параметрах молниевых лидеров.

Начиная с 60-х годов прошлого века одним из способов исследования параметров молниевых каналов стал запуск в облако специальных ракет, тянущих за собой заземленный провод. Возможность получения искусственных молний была высказана в 1958 г. Ньюманом и в 1961 г. Бруком. Первая триггерная молния была получена в 1960 г. запуском небольшой ракеты с исследовательского судна у западного побережья Флориды, а первая искусственная молния, ударившая в землю, была инициирована в 1973 г. во Франции.

Поднимаясь в облако, ракета переносит вместе с собой потенциал земли, что приводит к усилению поля на ее заостренном конце и, как следствие, к индуцированной инициации так называемой **триггерной молнии** (rocket-triggered lightning).

Действительно, зная место и время заземления канала молнии, исследователь может заранее заготовить всю необходимую измерительную аппаратуру, что позволяет ему извлекать экспериментальные данные с максимальной эффективностью. К тому же, на нескольких первых сотнях метров

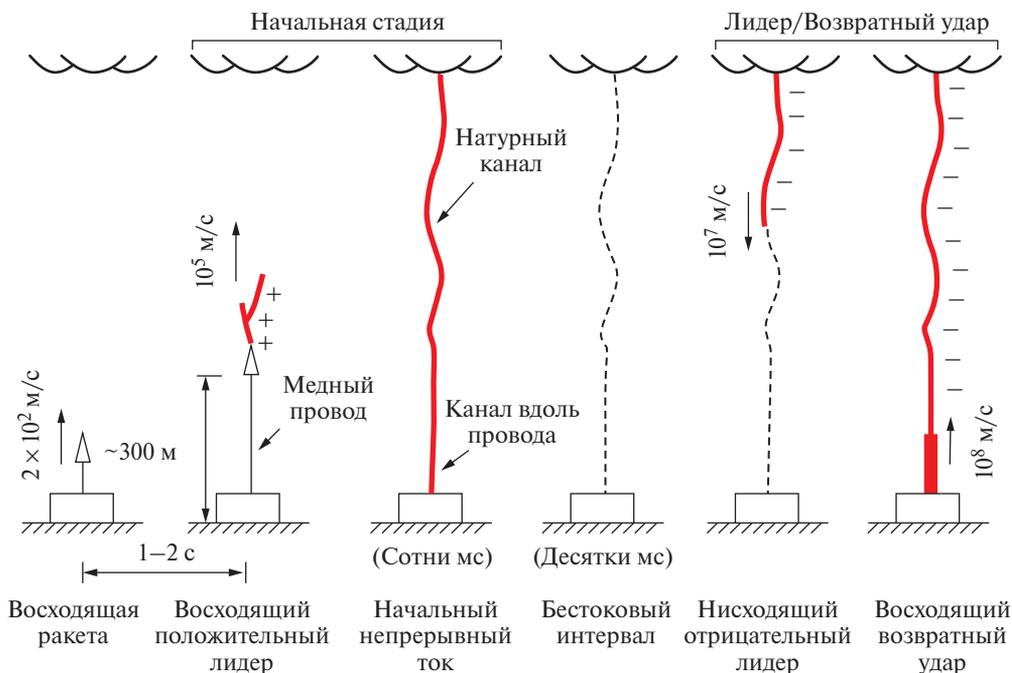


Рис. 2. Последовательность событий, происходящих при инициации триггерной молнии классическим способом. Адаптированный рисунок из работы Rakov V.A. A Review of Triggered-Lightning Experiments / V.A. Rakov. 30th International Conference on Lightning Protection Cagliari, Italy, September 13–17, 2010

от земли канал молнии, предопределяемый положением провода, является почти идеально прямым, что очень удобно с точки зрения проверки теоретических гипотез, многие из которых дают большие ошибки для каналов, отличных от вертикальных. Если провод целиком состоит из меди, он полностью определяет нижнюю часть траектории молнии от точки ее старта до земли (рис. 2). Это позволяет измерить параметры не только восходящей с заостренного конца ракеты молнии, но и последующих стреловидных лидеров и связанных с ними импульсов тока возвратного удара. Если среднюю часть медного провода заменить кевларовой вставкой, то, поскольку кевлар является хорошим изолятором, нисходящая часть канала триггерной

молнии ниже точки соединения меди с кевларом начинает развиваться в виде отрицательного ступенчатого лидера (рис. 3), что позволяет изучать его свойства на достаточно близком расстоянии.

Еще со времен появления первых электрических машин огромную роль в изучении атмосферного электричества играют лабораторные исследования. Современные генераторы высокого напряжения позволяют создавать искровые разряды длиной в несколько сотен метров. Хотя многокилометровая молния, в отличие от метрового слаботокового лабораторного лидера с током и проводимостью канала порядка 1 А и 1 См/м соответственно, обладает гораздо большей энергетикой, физические основы распростра-

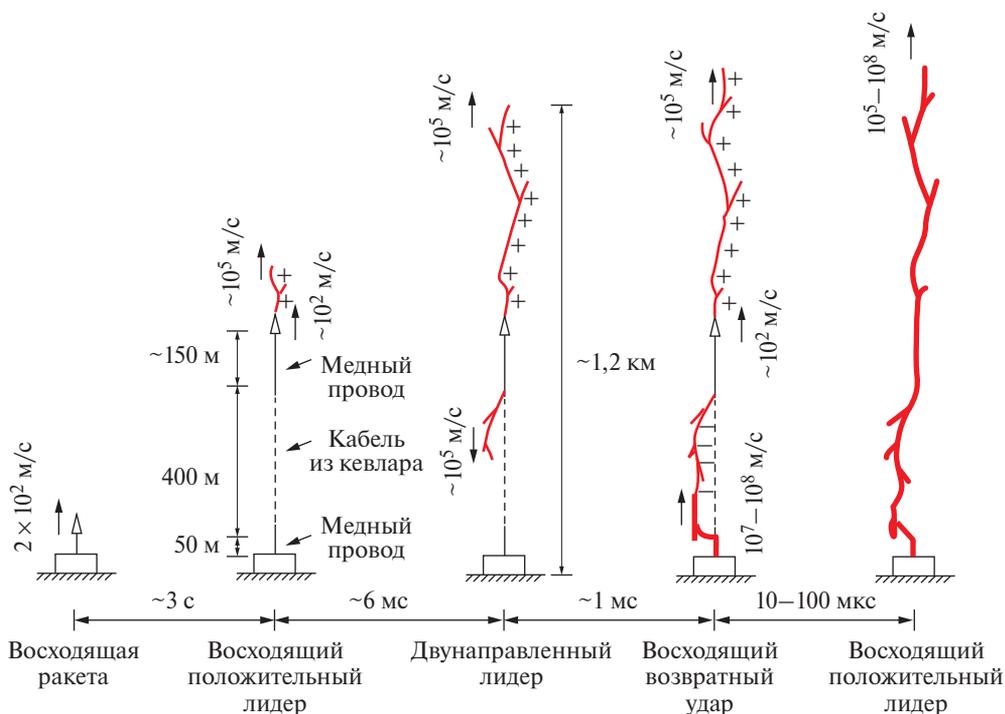


Рис. 3. Последовательность событий, происходящих при высотном способе инициации триггерной молнии. Адаптированный рисунок из работы Rakov V.A. A Review of Triggered-Lightning Experiments / V.A. Rakov. 30th International Conference on Lightning Protection Cagliari, Italy, September 13–17, 2010

нения их каналов имеют много общего. Даже несмотря на то, что нагретый до десяти тысяч градусов канал молнии с характерным током в несколько сотен ампер является не искрой, а дугой (его проводимость и продольное поле составляют порядка 10^4 См/м и 10^4 В/м соответственно), создающая данный канал стримерная зона лидера, как и в лабораторном случае, состоит из миллионов стримеров, являющихся основой искрового разряда в воздухе. Все это позволяет экстраполировать результаты, полученные для длинных искр, на натуральный молниевый разряд.

Очевидным преимуществом данного метода, как и в случае триггерных молний, является возможность прямого доступа к разряду, что позволяет эф-

фективно использовать для его изучения различную аппаратуру, совместное использование которой уже дало ряд важнейших результатов, недоступных для полевых измерений.

Одно из ведущих мест в области экспериментов с газовыми разрядами принадлежит отечественному высоковольтному испытательному стенду Всероссийского электротехнического института имени В.И. Ленина Высоковольтного научно-исследовательского центра, созданному в 1967 г. для испытания оборудования ультравысокого напряжения постоянного и переменного токов (рис. 4). Последние проведенные на базе данного стенда уникальные эксперименты породили серьезный сдвиг в понимании процесса инициации молнии в облаке.



Рис. 4. Экспериментальные установки высоковольтного испытательного стенда (г. Истра). Слева виден генератор Маркса, способный создавать разность потенциалов амплитудой 6 МВ. Справа расположен разрядный промежуток, перекрытый 9-метровым каналом положительной длинной искры. Рисунок 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 / A.Yu. Kostinskiy, V.S. Syssoev, N.A. Bogatov et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. V. 123, No. 10. P. 5360–5375

Несмотря на ценность лабораторных экспериментов, наличие огромного количества накопленных за годы исследований экспериментальных данных не позволило сильно продвинуться в построении теории. Вот как описывают ситуацию крупнейший теоретик физики газового разряда Ю.П. Райзер и не менее известный экспериментатор Э.М. Базелян: «Экспериментальных данных вроде бы много, но тех, что нужны для построения картины, – на редкость мало. В лабораториях детально изучались внешние характеристики искры – сведения о токе разряда, перенесенных зарядах, скоростях развития, пробивных напряжениях достаточно полны и разнообразны... Ощущение пустоты возникало при любых попыт-

ках отыскать сведения о параметрах плазмы в канале искрового разряда, об электрическом поле в области волны ионизации, в стримерном и лидерном каналах и даже в области, куда еще не успел проникнуть разряд. В лучшем случае удавалось обнаружить единичные эксперименты, поставленные со множеством оговорок и допущений»⁴. Исследователи также отмечают, что «внешнее многообразие проявлений искрового разряда объясняет и в какой-то мере оправдывает едва ли не повальное увлечение феноменологией явления, сохранившееся частично до наших дней. За полвека

⁴ Базелян Э.М. Искровой разряд / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер Москва: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.

накоплен необъятный, но так до конца и не востребованный экспериментальный материал. Значительно меньше внимания уделялось анализу физической природы явления и формулировке систематической и последовательной теории наиболее фундаментальных его сторон. Впрочем, следует признать, искра – одно из самых сложных и запутанных явлений в области газового разряда».

Сложности возникают не только на этапе сбора экспериментальных данных. Из-за чрезвычайной сложности процессов, сопровождающих развитие искрового разряда, построение хоть сколь-нибудь правдоподобной теории представляет существенные трудности. Те же авторы отмечают, что «далеко не всегда трактовка экспериментов в статьях бесспорна. Без особых натяжек на тех же результатах часто удавалось выстроить гипотезу, диаметрально противоположную авторской».

Выход из положения они видят в численном моделировании: «Хотя от компьютерной модели, в первую очередь, требуется число, важнее и интереснее с нашей точки зрения выяснять функциональные связи и обнажать роль определяющих процессов, когда это не удастся сделать аналитически. При таком подходе компьютер перестает быть машиной для сверхбыстрого счета, а становится исследовательским прибором. Численный эксперимент вместе с физическим – вот наиболее полезное, что привносит компьютер в исследования длинной искры».

Сегодня, с появлением высоко продуктивной вычислительной техники, моделирование явлений атмосферного электричества набирает обороты: растет число посвященных данной тематике работ, увеличивается степень вовлеченности в модели экспериментальных данных, происходит постепенное усложнение моделей. Первые модели молнии не обладали высоким пространственно-временным разрешени-

ем и не учитывали многих физических особенностей ее развития: одновременный рост нескольких ветвей разряда, двунаправленный (биполярный) характер его развития, эволюцию параметров разрядных каналов и возможность отмирания обесточенных ветвей разряда. Фактически они воспроизводили лишь способность молнии снимать внутриоблачную разность потенциалов. Для большинства из них, являвшихся частью более обширных метеорологических моделей, этого было вполне достаточно. Позднее появились продвинутое модели молнии, способные близко к реальности описать ее поведение в условиях различных структур пространственного заряда грозового облака и объяснить причины сложного механизма распространения ступенчатого отрицательного лидера молнии. Очевидно, что, поскольку производительность вычислительной техники продолжает расти, данное направление исследований остается одним из наиболее перспективных.

Еще одним методом изучения молниевой активности с конца XX века стали спутниковые наблюдения⁵. Поскольку наиболее интенсивные низкочастотные спектральные компоненты излучения молниевых разрядов существенно искажаются и поглощаются ионосферой, изначально спутники использовались для регистрации оптического излучения молний с пространственным и временным разрешением порядка 10 км и 2 мс соответственно. Данные наблюдения позволили продвинуться в понимании взаимосвязи тропосферной конвекции и молниевых разрядов на низких

⁵ Иудин Д.И. Физика молнии: новые подходы к моделированию и перспективы спутниковых наблюдений / Д.И. Иудин, С.С. Давыденко, В.М. Готлиб и др. // Усп. физ. наук. 2018. Т. 188, № 8. С. 850–864.



Рис. 5. Микроспутник «Чибис-М». Рис. -2 из работы Ovchinnikov M. Yu. *Development, integrated investigation, laboratory and inflight testing of chibis-m microsatellite adcs / M.Yu. Ovchinnikov, D.S. Ivanov, N.A. Ivlev et al. // Acta Astronautica. 2014. V. 93. P. 23–33. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576513002312>*

широтах и получить наиболее полные сезонные карты глобального распределения молниевой активности. Далее, поскольку высокочастотная (с частотами выше 15–20 МГц) часть спектра излучения молниевых разрядов проходит через ионосферу практически без искажений, некоторые спутники также используются для регистрации порождаемых молниями сигналов в ОВЧ-диапазоне (30–300 МГц), что позволило лучше понять природу так называемых компактных внутриоблачных разрядов, наиболее интенсивных источников излучения в атмосфере Земли. Именно спутниковые миссии позволили открыть и изучить явление гамма-вспышек земного происхождения.

С января 2012 г. по октябрь 2014 г. в космосе работал спроектированный и изготовленный в стенах Института космических исследований РАН отечественный микроспутник «Чибис-М», изначально нацеленный на изучение молний. В состав его научно-измерительного комплекса входили радиочастотный анализатор с частотной полосой 26–48 МГц, рентгеновский и гамма и ультрафиолетовый детекторы и цифровая камера. Спутник позволил сделать вывод о наличии в грозовых облаках широкого класса событий, характеризующихся морфологически различными высокочастотными

спектрами. По мнению авторов, данные результаты указывают на то, что источник излучения, молниевый разряд, представляет собой фрактальную динамическую структуру проводящих каналов, развивающихся в неоднородном электрическом поле грозового облака⁶.

В последующих разделах работы будут описаны основные понятия и объекты исследования учения об атмосферном электричестве, причем особое внимание будет уделено различным типам молниевых разрядов.

Сразу оговоримся, что читателю будут представлены лишь основные аспекты («киты») физики атмосферного электричества, при этом авторы сознательно уделяют особое внимание наиболее красочной, можно даже сказать «зоологической», стороне явлений, описывая морфологию и отличительные особенности развития различных типов атмосферных разрядов. Многие важные проблемы остаются необсужденными. Читатели, желающие более глубоко ознакомиться с историей исследований и современным состоянием дел в области физики атмосферного электричества, могут обратиться к фундаментальным трудам, перечисленным в конце статьи, а также к недавним обзорам.

⁶ Там же.

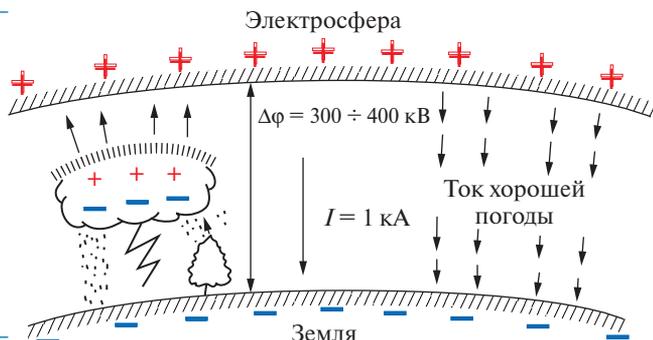
ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

В начале XX в. Чарлз Вильсон высказал предположение о том, что поверхность Земли и ионосферу можно рассматривать как обкладки огромного сферического конденсатора (рис. 6). Высокую проводимость ионосферы, которая, вообще говоря, сильно зависит от конкретной высоты и времени суток и на высоте 120 км днем достигает порядка 1 См/м, обеспечивают свободные электроны, возникающие под действием солнечного излучения. За проводимость почвы на уровне 10^{-3} См/м отвечают ионы солевой воды. В рамках упрощенной модели сферического конденсатора полный заряд на поверхности Земли является отрицательным и составляет порядка $5 \cdot 10^5$ Кл. Такой же по величине положительный заряд распределен в атмосфере, причем большая его часть (около 90%) расположена на высоте до 5 км. В отсутствие гроз этот заряд обеспечивает вблизи земли наличие вертикально направленного электрического поля хорошей погоды с напряженностью порядка 100 В/м. Поддерживаемая между «пластинами» глобального конденсатора разность потенциалов составляет порядка 300–400 кВ (много меньше внутриоблачной разности потенциалов, достигающей сотен мегавольт).

Воздух между поверхностью земли и ионосферой можно считать хорошим изолятором. Его проводимость, хотя и сильно увеличивается при подходе к ионосфере, вблизи земной поверхности составляет примерно 10^{-14} См/м (соответствует стационарной концентрации ионов на уровне 10^9 м $^{-3}$). Она обеспечивается ионизацией воздуха под действием естественной радиации почвы (до 50 км над уровнем Земли) и проникающих в атмосферу космических частиц (доминирующий фактор на высотах выше 1 км над почвой). Ниже примерно 60 км проводимость ионосферы обеспечивается преимущественно ионами, выше – свободными электронами. Этой проводимости достаточно, чтобы замкнуть **глобальную электрическую цепь (ГЭЦ)**.

По направлению к земле постоянно течет распределенный по всей поверхности планеты ток разрядки (ток хорошей погоды), составляющий порядка 1 кА. При этом на каждый квадратный километр воды или суши приходится всего пара микроампер, а по мощности (примерно 300 МВт) вся атмосферная цепь сравнима с одной турбиной крупной гидроэлектростанции. Даже такой небольшой ток хорошей погоды разрядил бы глобальный атмосферный конденсатор всего за 10 минут, если бы тот постоянно не подзаряжался. Электродвижущей силой, которая заряжает ионосферу

Рис. 6. Схематичное представление глобальной электрической цепи в виде огромного сферического конденсатора. Адаптированный рис. 1.4 из монографии Rakov V.A. *Lightning: Physics and effects* / V.A. Rakov, M.A. Uman. New York: Cambridge University Press, 2005. 687 p.



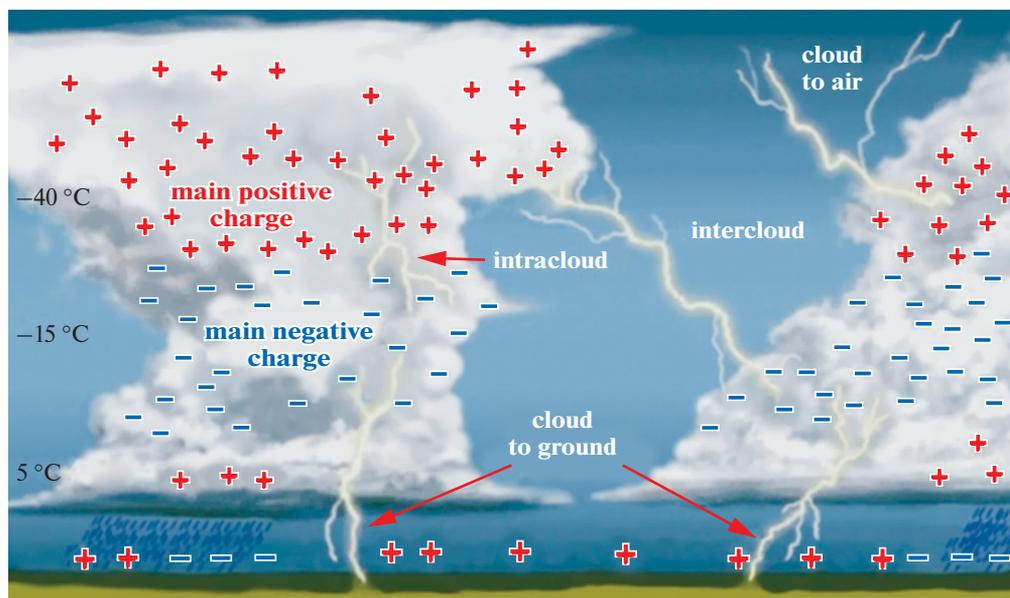


Рис. 7. Схематичное представление различных типов молниевых разрядов. Адаптированный рис. 1.1 из обзора Dwyer J.R. *The physics of lightning* / J.R. Dwyer, M.A. Uman // *Physics Reports*. 2014. jan. V. 534, No. 4. P. 147–241

положительно, а землю отрицательно, служат грозы и коронные разряды ниже уровня облака. Подавляющее большинство молний несет к земле отрицательный заряд, а положительный стекает с верхней границы облачности в ионосферу, поддерживая разность потенциалов в глобальном атмосферном конденсаторе. Кроме того, существенную роль играет заряд, доставляемый на землю вместе с частицами осадков. По знаку заряд осадков является положительным, а его величина сравнима с отрицательным зарядом, заземляемым молниями.

Каждые сутки небо прочерчивают 4 млн молний, т. е. каждую секунду происходит примерно 50 разрядов. На Земле постоянно существует около 2000 грозовых штормов, покрывающих примерно 10% площади поверхности планеты.

Большинство молниевых разрядов (около 75%) не доходит до земли, участвуя в перераспределении облачного заряда, поэтому они называются **внутри-**

облачными (intracloud) или **междуоблачными (intercloud)** разрядами. Остальные 25% завершаются контактом молниевых каналов с землей и называются **разрядами типа «облакоземля» (cloud-to-ground lightnings)**.

Из тех молний, что доходят до земли, примерно 90% переносят отрицательный заряд и, соответственно, называются **отрицательными**. Оставшиеся 10% молний, заземляющих положительный заряд, называют **положительными**. В дополнение к этому существует пренебрежимо малый процент **восходящих разрядов (upward lightning discharges)**, инициирующихся с вершин высоких объектов (порядка 100 м и выше) и распространяющихся по направлению к облаку, и **разрядов типа «облако-воздух» (cloud to air lightning discharges)**. Все обозначенные типы молниевых разрядов, кроме восходящих лидеров, представлены на рис. 7.

Продолжение следует

ПОДАРОК ОТ «ЛУННОЙ ПРИНЦЕССЫ»

ЛИСОВ Игорь Анатольевич

DOI: 10.7868/S0044394821010047

В ночь с 16 на 17 ноября 2020 г. в холодной гобийской степи совершил посадку возвращаемый аппарат китайского комплекса «Чанъэ-5» с герметичной капсулой, в которой было 1.73 кг лунного грунта. Такая «посылка» пришла адресатам на Земле в первый раз после 44-летнего перерыва.

ИСТОРИЯ ЛУННОЙ ПРОГРАММЫ

На протяжении 16 лет Китай последовательно реализует хорошо продуманную программу изучения Луны беспилотными космическими аппаратами. Изначально она состояла из трех этапов: изучение Луны с орбиты, посадка, доставка грунта. В настоящее время к ним добавлен четвертый: углубленное изучение отдельных районов Луны, представляющих большой научный интерес.

Первый этап лунной программы был утвержден Госсоветом (правительством) КНР 23 января 2004 г. Были спроектированы на базе типовых спутников связи и изготовлены два орбитальных аппарата – основной «Чанъэ-1» (嫦娥一号) и резервный «Чанъэ-2» (嫦娥二号), названные именем лунной принцессы из китайских легенд.

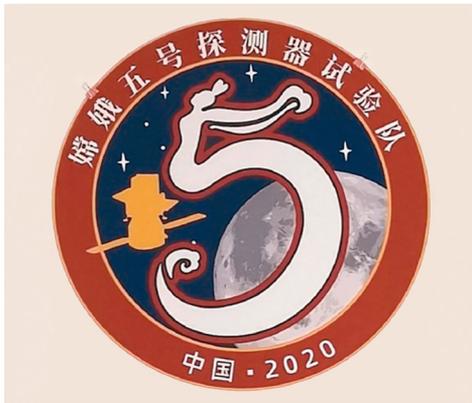
Первый из них был успешно запущен 24 октября 2007 г. (см. ЗиВ, 2008, №2) и 7 ноября после довольно сложных маневров вышел на рабочую селеноцентрическую орбиту высотой 200 км. «Чанъэ-1» выполнил сплошную съемку Луны с разрешением 120 м,

но главным результатом полета была не обзорная лунная карта, а бесценный опыт управления дальним КА. «Чанъэ-1» проводил и незапланированные эксперименты, включая съемку с высоты 100 км и снижение перицентра до 15 км. Полет завершился 1 марта 2009 г. падением на лунную поверхность.

Второй этап был одобрен правительством страны 15 февраля 2008 г. «Чанъэ-2» переоснастили камерой более высокого разрешения и запустили 1 октября 2010 г. (см. ЗиВ, 2011, № 2) с заданием съемки Луны с разрешением 7 м, а перспективных районов посадки – с метровым разрешением. 9 октября аппарат сформировал рабочую орбиту высотой 100 км над Луной и вел съемку в течение нескольких месяцев. Завершив основную программу и выпол-



Группа спасателей обследует возвращаемый аппарат



Эмблема полета «Чанъэ-5»

нив дополнительное задание по съемке с 15-километровой высоты, 9 июня 2011 г. «Чанъэ-2» покинул окололунную орбиту, временно «завис» вблизи точки либрации L_2 системы «Земля – Луна» и провел измерения параметров космической среды в этой области.

Покинув 15 апреля 2012 г. окрестности L_2 , китайский аппарат произвел успешный перехват и съемку астероида Тутатис, промчавшись 13 декабря на расстоянии всего в 3 км от его поверхности. После этого «Чанъэ-2» еще долго использовался для тестирования средств вновь созданного в Китае комплекса дальней космической связи на межпланетных расстояниях.

1 декабря 2013 г. стартовал «Чанъэ-3» (嫦娥三号) (см. ЗиВ, 2014, № 2), спроектированный уже «с нуля» и оснащенный посадочным двигателем переменной тяги. 6 декабря он вышел на окололунную орбиту, а 14 декабря выполнил успешную посадку в Заливе Радуги в точке 44.12° с.ш., 19.50° з.д. С посадочного аппарата сошел на поверхность ровер «Юйту» (玉兔) массой около 140 кг, названный в честь лунного кролика – спутника принцессы Чан Э в ее лунном дворце. Луноход, оснащенный радиоизотопной «печкой» и научными инструментами для дистанционных

и контактных исследований, благополучно пережил первую лунную ночь, но 15 января, во второй лунный день, потерял подвижность из-за повреждения кабельной сети. Ему удалось пройти всего 114.8 м – полетное задание было выполнено не полностью, хотя удалось получить ценный опыт и интересные научные данные о составе лунного вещества и подповерхностной структуре грунта.

В результате в Заливе Радуги остались две стационарные китайские научные станции, и если ровер в августе 2016 г. утратил способность «просыпаться» лунным утром, то посадочный аппарат все еще работает в качестве обсерватории с ультрафиолетовым телескопом LUT и аппаратурой для низкочастотных радиоастрономических наблюдений.

ЗАМЫСЕЛ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Успех «Чанъэ-3» подтвердил возможность реализации **третьего этапа**, утвержденного, ввиду особой сложности, заранее, в январе 2011 г. Главной задачей стала доставка 1–2 кг лунного грунта, причем как с поверхности, так и с глубины до 2 м. Идею и схему проекта научный руководитель первых двух этапов академик Е Пэйцзянь впервые озвучил в марте 2011 г. и добавил, что он может быть реализован «примерно в 2017 году».

Китайские специалисты решили построить экспедицию за лунным грунтом по баллистической схеме со стыковкой на окололунной орбите, то есть повторить американскую программу «Аполлон», но в беспилотном варианте. Китайский комплекс получил название «Чанъэ-5» (嫦娥五号). Можно провести точную аналогию: орбитальный и возвращаемый модули «Чанъэ-5» – это служебный и командный модули «Аполлона», а посадочный и взлетный модули – аналоги соответствующих

ступеней американского лунного модуля. Весь комплекс выходит на окололунную орбиту, половина его идет на посадку, взлетный модуль возвращается и стыкуется с орбитальным, а после перегрузки грунта сбрасывается. Наконец, орбитальный модуль обеспечивает доставку возвращаемого модуля с грунтом в земную атмосферу. Основная разница – в массе комплекса: 45 т у американцев и 8250 кг у китайцев.

Конечно, китайская схема с 11 этапами полета, 23 коррекциями, шестью разделениями и одной стыковкой оказалась значительно сложнее, чем в советском проекте Е8-5, где вся межпланетная станция («изделие КТ») садилась на Луну, а взлетная ракета с ее поверхности шла непосредственно к Земле. Платой за простоту была малая масса доставляемого грунта – максимум 170 г – и ограниченный район посадки, из которого можно было попасть на Землю после неуправляемого вертикального старта взлетной ракеты.

В китайском проекте теоретическая доставляемая масса могла быть до 10 кг, однако в реальности планировалось взять около 2 кг. При этом одну четвертую часть лунного вещества должна была составить двухметровая колонка грунта, а три четверти – реголит, собранный с поверхности.

Место посадки и забора образцов было выбрано вблизи горы Рюмкера, расположенной в северо-восточной части Океана Бурь в координатах 41° с. ш., 58° з. д. Эта формация диаметром 70 км и высотой до 1300 м представляет собой комплекс из примерно 20 древних вулканов, окруженных полями молодой по лунным меркам лавы – ее возраст составляет 1.2 и 1.5 млрд лет. Столь молодые образцы представляют собой большую ценность, так как не доставлялись ни американскими «Аполлонами», ни советскими «Лунами».

Перед полетом китайские специалисты опубликовали границы посадоч-



Возвращаемый аппарат «Чанъэ-5» – масштабная копия советского «Зонда»

ной зоны в Океане Бурь – от 41° до 45° по широте и от 49° до 79° по долготе, в пределах которой назывались многие потенциальные точки.

Комплекс «Чанъэ-5» проектировался в расчете на новый носитель «Чанчжэн-5» и полностью использовал его возможности по грузоподъемности на траекторию полета к Луне – 8250 кг. Разработка нового носителя шла не просто, с отставанием от сроков, и в итоге именно ракета предопределила отсрочку экспедиции с 2017 на 2020 г.

Впрочем, сложность проекта «Чанъэ» продиктовала необходимость предварительной летной отработки отдельных его этапов. Для этого было изготовлено экспериментальное изделие, известное под техническим обозначением СЕ5-Т1 и личным именем «Сяофэй». В его состав входили легкий орбитальный аппарат, аналогичный «Чанъэ-2», и возвра-

щаемый аппарат, представляющий собой копию спускаемого аппарата пилотируемого корабля «Шэньчжоу» в масштабе 1:2. «Шэньчжоу» унаследовал форму и аэродинамику от «Союза», а тот от «Зондов», которые облетали Луну в 1968–1970 гг. Правда, масштабирование в космической технике работает плохо (масса в норме пропорциональна кубу линейного размера, а площадь – квадрату, так что получить нужный баллистический коэффициент нетривиально), но китайцы взяли за основу то, что у них было.

Аппарат CE5-T1 стартовал 23 октября 2014 г. и 27 октября облетел Луну на расстоянии около 12 000 км с гравитационным маневром и выходом на «правильную» траекторию, соответствующую штатному возвращению от Луны. При подлете на высоте 5000 км возвращаемый аппарат отделился, затормозился в атмосфере и 31 октября успешно приземлился на территории Внутренней Монголии, в хошуне Сыцзыван – там же, где осуществлялись и все посадки космических кораблей «Шэньчжоу».

Сам же CE5-T1 сразу после отделения возвращаемого аппарата выполнил маневр увода, прошел над Землей и оказался на эллиптической орбите с апогеем 540 000 км. 27 ноября он вышел в район точки L_2 системы «Земля – Луна», находящейся в 65 000 км за Лунной по отношению к Земле, где имитировал работу будущего спутника-ретранслятора «Цюэцяо». 4 января 2015 г. CE5-T1 был уведен из ее окрестностей, а 11 января выполнил маневр торможения и вышел на начальную орбиту вокруг Луны. В результате двух коррекций 13 января была сформирована круговая селеноцентрическая орбита наклонением 43.7° и высотой 200 км, аналогичная основной рабочей орбите «Чанъэ-5».

В феврале и марте 2015 г. CE-5T1 провел серию маневров, имитировавших снижение посадочного аппарата

перед сходом с орбиты и встречу орбитального аппарата со взлетным аппаратом, несущим образцы лунного грунта. В апреле планировалось фотографирование предполагаемых районов забора лунного грунта с разрешением 0.97 м, но в итоге было опубликовано сообщение о том, что такая съемка была проведена в период с 30 августа по 2 сентября 2015 г. Тогда же опубликовали два снимка участка лунной поверхности северо-западные горы Рюмкера, сделанные широкоугольной и узкоугольной камерами аппарата. Конечно, это не означало, что выбран именно он – ученые рассматривали целый ряд точек на лавовых полях в северо-восточной части Океана Бурь.

Наконец, проверялась возможность навигации на окололунной орбите по сигналам земных навигационных спутников. Как оказалось, по ним можно определять местоположение лунного аппарата с ошибкой порядка 100 м по координатам и 0.05 м/с по скорости.

НУЖНО ЗИМНЕЕ СОЛНЦЕСТОЯНИЕ

Из теории многоступенчатых ракет известно, что любое увеличение массы последней ступени влечет кратное увеличение массы предыдущих. Это применимо и к «многоступенчатым» космическим комплексам, таким как «Чанъэ-5». Поэтому начальная масса всего комплекса задается массой объекта перед последним маневром, то есть перед стартом с окололунной орбиты к Земле. При заданной массе конструкции и возвращаемого аппарата единственная возможность для оптимизации – свести к минимуму массу остающегося топлива, а для этого нужен как можно меньший по величине отлетный импульс скорости.

Так как единственным удобным местом для посадки и поиска возвращаемого

мого аппарата являются степи Северного Китая, в момент старта к Земле Луна должна находиться как можно южнее относительно земного экватора. Таким образом, этот момент должен совпадать с минимумом склонения Луны.

Далее, операции по посадке и забору грунта оптимально проводить при низком утреннем Солнце, когда еще не слишком жарко, а предметы отбрасывают длинные тени. Как стало известно в сентябре 2014 г., в качестве района посадки «Чанъэ-5» был выбран северо-восточный «угол» Океана Бурь. Солнце там восходит за 2–3 дня до полнолуния, так что садиться нужно как раз в полнолуние или чуть раньше.

Два этих требования не так просто совместить, поскольку склонение Луны меняется с периодом в 27,3 сут (сидерический месяц), а лунные фазы – с циклом 29,5 сут (синодический месяц). Эта проблема хорошо известна специалистам по истории календаря, и они знают, что оптимальное сочетание условий повторяется, как правило, через 354 дня. Есть и другие баллистические соображения, которые в итоге диктуют необходимость выбора для посадки на Луну последнего полнолуния перед зимним солнцестоянием, а для отлета к Земле – следующего за ним новолуния. Между ними остается достаточно времени для забора грунта, старта с Луны, поиска взлетного аппарата и перегрузки образцов, измерений орбиты и расчета отлетного импульса.

Именно поэтому «Чанъэ-5» оказался так чувствителен к проблемам носителя CZ-5. Разработка самого лунного комплекса шла по плану. Эскизное проектирование с необходимыми исследованиями и демонстрациями завершилось к декабрю 2012 г. После защиты проект вступил в стадию изготовления опытных изделий, а в июле 2015 г. его перевели на этап полномасштабной разработки. Изделие для ста-

тических испытаний в сентябре 2015 г. отправили на Вэньчан для примерки к носителю и совместных испытаний. В декабре началось изготовление летного экземпляра.

После того, как 3 ноября 2016 г. первая CZ-5 выполнила успешный испытательный полет, руководители программы подтвердили, что полет за грунтом состоится в конце ноября 2017 г. Действительно, «посадочное» полнолуние в этом году было 3 декабря, а «отлетное» новолуние – 18 декабря.

Летный экземпляр лунного комплекса был готов к январю 2017 г. По состоянию на 1 марта планировалось доставить «Чанъэ-5» на космодром в августе, чтобы уже там провести испытания четырех компонентов по отдельности, попарно и в целом. В апреле началась финальная сборка носителя с номером Y3, а в июне было объявлено, что подготовка его на космодроме начнется в конце сентября.

Итак, уже три года назад «Чанъэ-5» находился на финишной прямой к старту, но... 2 июля 2017 г. из-за отказа одного двигателя YF-77 на центральном блоке погибла CZ-5 № Y2. И как только стал понятен масштаб проблемы, очередной старт к Луне сразу «съехал» на два года – на 5 декабря 2019 г. Но и эта дата оказалась нереальной, так как «лечение» ракеты затянулось более чем на два года, и CZ-5 реабилитировала себя лишь пуском 27 декабря 2019 г. Это позволило провести затем два важнейших межпланетных старта подряд – марсианского комплекса «Тяньвэнь-1» на четвертой ракете 23 июля и лунного «Чанъэ-5» на пятом летном носителе 24 ноября 2020 г.

К счастью, с каждым сдвигом баллистические условия старта к Земле улучшались: если в 2017 г. минимальное склонение Луны составляло -20° , то в 2019 г. оно достигло -23° , а в 2020 г. – -25° . Соответственно росли и оценки резерва топлива, которое может

остаться в баках орбитального модуля после выполнения программы.

Трехлетняя задержка с осуществлением проекта «Чанъэ-5» привела к тому, что стоявший в планах после него полет «Чанъэ-4» (嫦娥四号) состоялся раньше. «Чанъэ-4» был изготовлен как дублер «Чанъэ-3», но после первой успешной посадки получил новое назначение в рамках уже третьего этапа лунной программы. Он был запущен 7 декабря 2018 г. (см. ЗиВ, № 1, 2019), вышел на окололунную орбиту 12 декабря, а 3 января произвел успешную посадку на обратной стороне Луны, в пределах огромного ударного бассейна «Южный полюс – Айткен», а конкретно в кратере фон Карман в точке 45.46° ю. ш., 177.59° в. д.

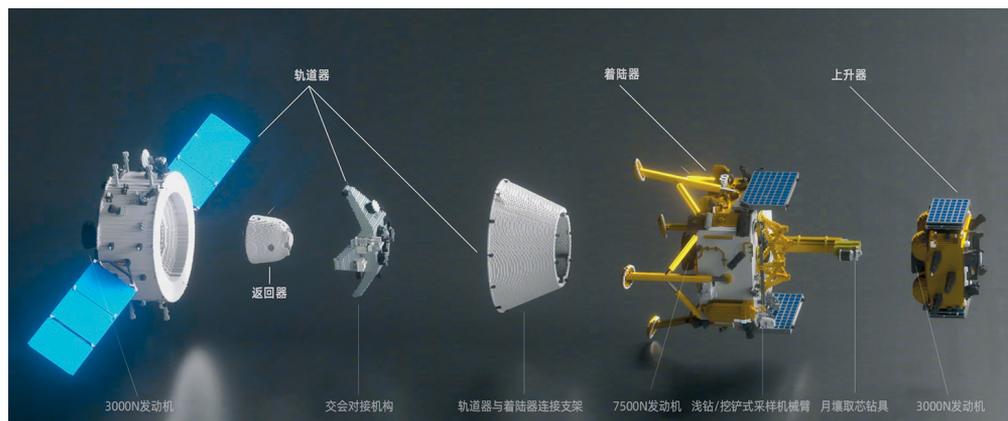
Так как Луна непроницаема для радиосигналов, для посадки и исследований на обратной стороне требовался ретранслятор. Специализированный аппарат «Цюэцяо» был запущен 20 мая 2018 г., 14 июня он вышел на орбиту вокруг точки L2 системы Земля – Луна, и с декабря 2018 г. в течение уже двух лет обеспечивает работу лэндера «Чанъэ-4» и ровера «Юйту-2» (玉兔二号) в кратере фон Карман.

ЛУННЫЙ КОМПЛЕКС

За осуществление проекта «Чанъэ-5» отвечали главный конструктор лунной программы У Вэйжэнь (吴伟仁), главный конструктор ее 3-го этапа Ху Хао (胡浩), руководитель и главный конструктор комплекса Ян Мэнфэй (杨孟飞). Орбитальный аппарат был спроектирован и изготовлен в Шанхайской исследовательской академии космической техники SAST, а остальные части комплекса – в Китайской исследовательской академии космической техники CAST в Пекине. Оба учреждения входят в состав Китайской корпорации космической науки и техники CASC.

Подробное официальное описание «Чанъэ-5» пока не опубликовано, поэтому его приходится собирать из деталей, разбросанных по многочисленным публикациям разных лет. Неизвестна даже точная массовая сводка. Насколько можно судить по баллистической схеме, орбитальный аппарат вместе с возвращаемым имели массу около 4700 кг, а посадочный вместе со взлетным – примерно 3500 кг. Масса возвращаемого аппарата была близка

Составные части комплекса «Чанъэ-5». Слева направо: орбитальный аппарат, возвращаемый аппарат, стыковочное устройство, конический переходник, посадочный аппарат, взлетный аппарат



к 320 кг, а масса взлетного перед стартом с Луны – к 800 кг.

Основной и самый тяжелый **орбитальный аппарат** обеспечивает перелет от Земли к Луне, маневрирование на окололунных орбитах и возвращение к Земле. Он выполнен в форме плоского цилиндра («шайбы») диаметром около 3.1 м. Для установки его на второй ступени носителя пришлось разработать специальную систему фиксации и отделения. С нижней стороны слегка выступают четыре сферических бака с компонентами топлива, между которыми расположен основной двигатель YF-37 тягой 3000 Н. Сверху установлен возвращаемый аппарат, а еще выше, на переходнике конической формы, – посадочный комплекс. Система электропитания использует две ориентированные панели солнечных батарей, развертываемых вдоль оси Y.

Для поиска взлетного аппарата и сближения с ним орбитер оснащен системой измерения параметров относительного движения с микроволновым радиолокатором, разработанным в 25-м институте Китайской корпорации космической науки и промышленности CASIC, и лидаром Института оптики и электроники Китайской АН в Чэнду.

Орбитер имеет три пары «лапок», которыми захватывает три штыря в верхней части взлетного аппарата после касания.

Посадочный аппарат имеет большое сходство с использованным в проекте «Чанъэ-3», но несет более массивную полезную нагрузку. Корпус лэндера выполнен в виде восьмиугольной призмы и оснащен четырьмя посадочными опорами, которые переводятся из стартового положения в рабочее уже в полете. Система электропитания использует две ориентированные панели солнечных батарей, развертываемых вдоль оси Z. Запас топлива для спуска и посадки размещен в четырех сферических баках.

Снизу вдоль осевой линии установлен ЖРД YF-36A с регулируемой тягой в пределах от 7500 до 1500 Н, сверху имеется посадочное место для взлетного аппарата. На одном из боковых ребер смонтирован кронштейн с государственным флагом КНР.

На верхней плоскости лэндера смонтированы манипулятор длиной 3.7 м для забора грунта с поверхности, созданный совместными усилиями специалистов Института системного проектирования КА в Пекине, Харбинского технологического института и Гонконгского политехнического университета, и второй манипулятор с камерой для контроля загрузки образцов в контейнер взлетного аппарата.

Буровое устройство в корпусе цилиндрической формы установлено на боковой поверхности лэндера. Мощность привода составляет 600 Вт, а развиваемый момент – до 20 Н·м. При скорости вращения рабочей части 12 175 об/мин бур погружается в грунт со скоростью до 100 мм/мин. Разработчик этого механизма – Харбинский технологический институт, изготовитель – 529-й завод CASC в Пекине.

Контейнер для лунных образцов с механизмами загрузки и герметизации создан в 510-м институте CASC.

Взлетный аппарат напоминает посадочный, но в масштабе 1:2. На восьмиугольном корпусе смонтированы две панели солнечных батарей, под ним – четыре сферических бака, между ними – двигатель тягой 3000 Н, аналогичный маршевому ЖРД орбитального аппарата. Старт взлетного аппарата обеспечивает пружинный толкатель, а его двигатель включается уже на подъеме, чтобы свести к минимуму риск включения двигателя непосредственно на лэндере.

Возвращаемый аппарат выполнен в виде «фары» (коническая конструкция со сферическим днищем с теплозащитой) и имеет высоту 1236 мм при



Весь лунный комплекс на испытаниях в безэховой камере

наибольшем диаметре 1258 мм. Контейнер с образцами загружается через люк в верхней части капсулы и закрывается поворотной-прижимной крышкой. Посадка производится на однокупольном парашюте, выводимом из контейнера на боковой поверхности изделия.

Всего на четырех компонентах комплекса «Чанъэ-5» имеется три маршевых двигателя и 74 двигателя ориентации и направленного перемещения четырех номиналов тяги (150, 120, 25 и 10 Н). Все они разработаны и изготовлены 801-м институтом Исследовательской академии ЖРД («6-я академия»). Три двигательные установки имеют суммарную массу 590 кг, в баки модулей заправлено свыше 5450 кг топлива.

Аппараты лунного комплекса более чем на 90% состоят из компонентов китайского производства.

В декабре 2013 г. сообщалось, что на «Чанъэ-5» будет установлен обширный комплект приборов, включая посадочную камеру, панорамную камеру для съемки лунной поверхности, спектрометр LMS для определения минерального состава, анализатор газовой выделенности лунной поверхности, инструмент для изучения структуры лунного грунта, измеритель профиля температуры образца. Позднее к этому списку добавили импульсный радар для изучения подповерхностных структур. К сожалению, описание приборов и информация об их разработчиках пока не опубликовано.

ЗАПУСК

После испытаний осенью 2017 г. компоненты «Чанъэ-5» перевели в режим хранения. Испытания в Пекине возобновились в марте 2020 г., когда появилась определенность со сроком запуска. Тогда же в Тяньцзине началась сборка ракеты с номером Y5.

9 июля 2020 г. контейнеры с составными частями «Чанъэ-5» были доставлены самолетом Ан-124 российской компании «Волга-Днепр» в аэропорт Мэйлань на Хайнане, а оттуда – автотранспортом на космодром. 23 июля, в день старта экспедиции «Тяньвэнь-1» к Марсу, была названа точная дата запуска к Луне: 23 ноября.

6 сентября специализированные сударакетовозы «Юаньван-21» и «Юаньван-22» вышли из порта Цзяньинь и 9 сентября ошвартовались в Тяньцзине. 11 сентября состоялась погрузка контейнеров со ступенями CZ-5. Утром 15 сентября корабли вышли в море курсом на остров Хайнань. Поскольку пришлось переждать непогоду на подходе к Гонконгу, на место они пришли 21 сентября с опозданием на двое суток. Подготовка носителя в монтажно-испытательном корпусе на Вэньчане началась 23 сентября.

17 ноября в торжественной обстановке ракета «Чанчжэн-5» (CZ-5 № Y5) была вывезена на стартовый комплекс № 101. Пуск был назначен на 24 ноября в пределах стартового окна с 04:30:12 до 05:15:07 пекинского времени, то есть 23 ноября между 20:30 и 21:15 по Гринвичу. Старт с внутренним обозначением «операция 07-W7» состоялся в заданное время, в 20:30:22 UTC, и был показан китайским телевидением в прямом эфире.

Выведение по схеме с двумя включениями двигателей второй ступени – для выхода на опорную орбиту высотой около 270 км и для набора отлетной скорости – прошло успешно. На 2184-й секунде полета, в 21:06:50, лунный комплекс отделился от носителя, на орбитальном и посадочном модулях прошло развертывание солнечных батарей. Измерения показали, что бортовые системы работают нормально, орбита близка к расчетной, высотой 200 км в перигее и около 400 000 км в апогее.

Параметры орбиты КА, по данным Космического командования США, составили:

- наклонение – 21.3° ;
- минимальная высота – 201 км;
- максимальная высота – 392 981 км.

За выведением КА наблюдали наземные станции китайского командно-измерительного комплекса, корабли «Юаньван-6» и «Юаньван-5» и спутник-ретранслятор «Тяньлянь-2» № 01. Начальную фазу полета обеспечивала также наземная станция ЕКА в Куру.

ПОСАДКА

На траектории полета к Луне было запланировано три коррекции. Состоялись первые две из них: 24 ноября в 14:06, то есть через 17 часов после начала полета, и 25 ноября в это же время. В первом случае использовался маршевый двигатель YF-37 орбитального аппарата тягой 3000 Н, который был включен на 2 секунды: помимо выдачи необходимого импульса нужно было проверить его в работе до использования в критически важном маневре торможения у Луны. Проверка прошла успешно, и для второй коррекции применили два двигателя тягой по 150 Н каждый, которые проработали 6 секунд. Третья коррекция не потребовалась.

28 ноября в 12:58:54 на высоте около 400 км над Луной был включен маршевый двигатель YF-37. Примерно через 17 минут он выключился, израсходовав около 1000 кг топлива и снизив скорость комплекса примерно на 400 м/с. «Чанъэ-5» вышел на начальную селеноцентрическую орбиту с апоцентром на высоте около 5700 км и с периодом обращения более 8 часов.

На первом витке была проведена небольшая необъявленная коррекция с целью снижения перицентра примерно до 200 км. Китайские официальные органы сообщали далеко не о всех маневрах,

предусмотренных полетным планом, но очень ценную дополнительную информацию давали радиолюбительские наблюдения. Скотт Тилли, Эдгар Кайзер и другие «слухачи» обнаружили сигналы разных передатчиков комплекса на частотах 8463.7, 8467.3, 8471.2, 8478.7 и 8486.3 МГц, а также широкополосный телевизионный сигнал на 8455 МГц. Последний даже удалось расшифровать и увидеть солнечные батареи КА, снимаемые бортовой камерой!

За сутки «Чанъэ-5» сделал три витка по своей восьмичасовой орбите. 29 ноября в 14:23 маршевый двигатель был включен еще раз и снизил скорость еще на 410 м/с. В результате была сформирована круговая орбита наклонением около 44° и высотой примерно 196 × 198 км с периодом обращения 127.3 мин и средней скоростью 1592 м/с.

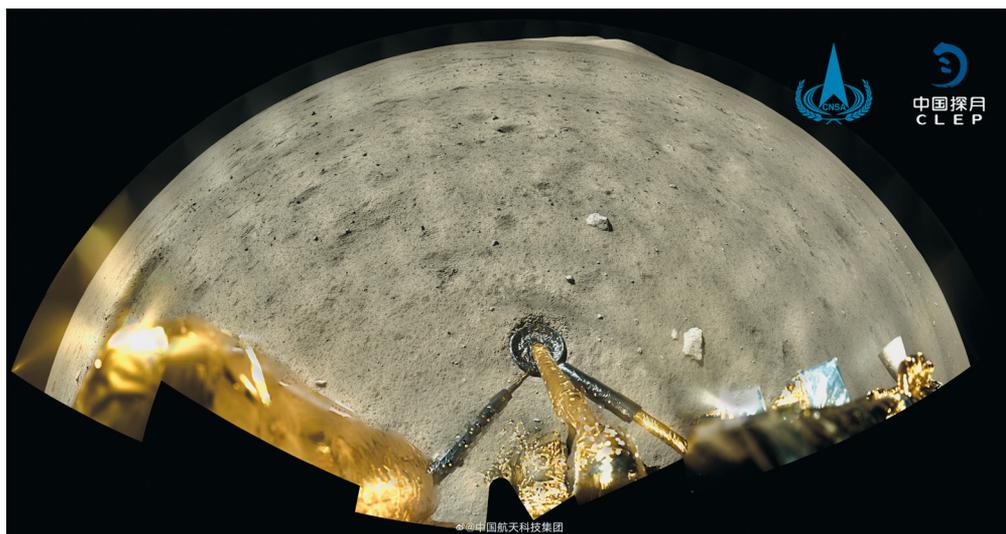
29 ноября в 20:40:15 состоялась расстыковка орбитального и посадочного комплексов. Далее полетным планом предусматривались два маневра посадочного комплекса – 30 ноября в 14:23

и в 18:22. Официальных сообщений о них не было, но опубликованные радиолюбителями доплеровские кривые позволяют заключить, что после первого была достигнута орбита 86 × 184 км, а после второго – 15.5 × 183 км с периодом 117.8 мин.

Тем временем 30 ноября в 23:59 орбитальный комплекс выполнил первый маневр фазирования, поднявшись на орбиту высотой 196 × 234 км. С каждым витком посадочный комплекс уходил вперед по отношению к орбитальному и к моменту торможения обогнал его на виток.

1 декабря в 14:57:18 был включен на торможение двигатель YF-36A посадочного аппарата. Это произошло примерно в 600 км от расчетной точки посадки (43.1° с. ш., 51.8° з. д.) вблизи перицентра орбиты, на высоте 15 587 м и при начальной скорости 1709.8 м/с. Двигатель успешно погасил орбитальную и вертикальную скорость движения и примерно через 14 минут на высоте около двух метров выключился. В 15:11:21 пекинского времени поса-

Полупанорама местности к югу от посадочного аппарата. На горизонте по центру – холм Лувиль-Омега





Развертка полупанорамы

дочный аппарат опустился на лунную поверхность.

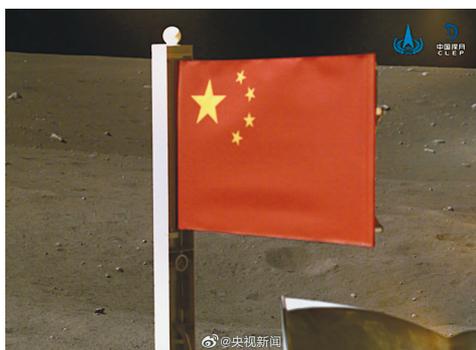
Посадка произошла в северо-восточной части Океана Бурь, примерно в 160 км к востоку от горы Рюмкера и в 10 км к северу от холма Лувиль-Омега. Координаты места посадки, объявленные первоначально, несколько раз уточнялись; последние китайские данные соответствовали точке 43.062° с. ш., 51.916° з. д.

Китайское телевидение и сетевые СМИ не показали прилунение в прямом эфире, но репортаж о нем запустили буквально через пару минут после касания. Вскоре был представлен фильм, снятый на спуске десантной камерой посадочного модуля, а также половина лунной панорамы к югу от посадочного аппарата, составленной из 120 отдельных снимков панорамной камеры. С левой стороны был замечен свежий кратер, на гладкой в целом поверхности лежали камни различного размера. На вид поверхность была моложе, чем в районах посадки «Чаньэ-3» и «Чаньэ-4».

1 декабря в 20:53 завершился первый этап взятия образцов – бурение лунного грунта и взятие колонки с глубины до 2 метров. Операция затянулась примерно на час по сравнению



Манипулятор посадочного аппарата и следы его работы



Флаг КНР над Луной

с планом, потому что грунт оказался слоистым, похожим на сланец, и довольно твердым. Развивая мощность до 1000 Вт, лунный бур благополучно углублялся, однако специалисты опасались, что твердая порода не позволит изогнуть трубу, да и время поджимало. В результате бурение остановили, не дойдя до отметки 1 метр. Гибкую трубу с грунтом аккуратно намотали на барабан внутри контейнера для образцов.

Бортовой радар для зондирования подповерхностной структуры грунта указал наиболее интересные места, и «Чанъэ-5» приступил к сбору образцов при помощи манипулятора с поверхности к югу от себя. Это был очень медленный процесс: на то, чтобы опустить манипулятор на грунт, зачерпнуть и закрыть крышечкой немного реголита, поднять «руку» и пересыпать материал в центральную часть контейнера, уходило не менее 50 минут. Спектрометр LMS использовался для определения минерального состава грунта с поверхности и залегавшего на глубине. Панорамная камера продолжала съемку и в конечном итоге передала примерно 700 кадров.

Программой предусматривалось взять 15 проб лунного материала, но после 12-го специалисты увидели, что контейнер почти полон, и остановили процесс. В результате все работы по

забору и упаковке грунта завершились 2 декабря в 14:00 – на пять с лишним часов раньше плана. Контейнер был герметически закрыт, чтобы доставить лунные образцы в вакуумной «таре» и не допустить загрязнения земным воздухом и влагой.

Тем временем орбитальный комплекс после третьего маневра фазирования, который в плане стоял на 2 декабря в 14:46, вернулся на орбиту ожидания высотой 197 км. На 21:46 намечался сброс переходника, на котором во время запуска стоял посадочный модуль, а под ним размещались возвращаемый аппарат и элементы стыковочного устройства. Никаких сообщений об этих операциях китайские СМИ не дали, хотя они были очевидным образом необходимы для стыковки.

ВЗЛЕТ И СТЫКОВКА

Старт с Луны планировался ровно через двое суток после прилунения, когда вследствие медленного вращения Луны плоскость орбиты «Чанъэ-5» вновь пройдет через место посадки. Непосредственно перед этим на посадочном аппарате был выставлен из горизонтального положения в вертикальное флагшток с государственным флагом КНР. Сам флаг имел массу всего 12 граммов, а весь блок для его хранения и вертикализации – около килограмма. Панорамная камера немедленно сделала снимки красного знамени над Луной.

Старт с Луны был произведен 3 декабря в 15:10:21. Израсходовав около 400 кг топлива, через шесть минут с небольшим, в 15:17:28, взлетный аппарат успешно вышел на окололунную орбиту высотой 15×180 км – в первый раз после «Аполлона-17» в декабре 1972 г. Орбитальный аппарат в этот момент находился практически в противоположной точке орбиты высотой примерно 196×207 км.

Как и раньше, китайские СМИ не сообщали подробностей орбитального маневрирования. Западные радиолюбители фиксировали орбитальный аппарат на орбите со средней высотой 203 км, а взлетный в ходе маневров фазирования поднимался, уменьшая угловую скорость сближения. После второго маневра, выполненного 4 декабря примерно в 08:04, его средняя высота была близка к 180 км, и он отставал от цели примерно на 14 минут. После третьего маневра (по плану в 21:46) высота достигла 191 км, а отставание сократилось до трех минут. Судя по данным радиомониторинга, 5 декабря около 12:30 взлетный аппарат сократил отставание до нуля и даже вышел немного вперед. В итоге он оказался на орбите высотой примерно 210 км на расстоянии в несколько десятков километров от орбитального комплекса.

5 декабря в 18:14 началась фаза сближения и захвата, за которую отвечал уже орбитальный аппарат, оснащенный необходимыми средствами автономного наведения. Массы двух участников процесса оценивались в 2300 и 400 кг соответственно. Контрольные точки на участке сближения находились на отметках 50 км, 5 км, 1 км и 100 м, причем на сближение от 5 км и до касания отводился весь последний виток. Специалисты в Пекинском центре управления полетом отслеживали подход и последующие операции по кадрам бортовых видеокамер. В 21:42, на две минуты позже плана, на высоте 210 км был выполнен захват взлетного аппарата за три радиальных штыря стыковочного устройства. Это была первая в истории автоматическая стыковка на окололунной орбите.



Группа спасателей у приземлившегося возвращаемого аппарата

Сразу после этого была инициирована перегрузка контейнера в возвращаемый аппарат, которая завершилась в 22:12 с отставанием от графика на 11 минут. Отклонения не имели значения для выполнения задачи экспедиции, так как до старта к Земле оставалась целая неделя.

Отделение взлетного аппарата вместе с элементами стыковочного устройства состоялось 6 декабря в 04:35 в строгом соответствии с планом. 7 декабря в 22:59 китайские операторы включили двигатель взлетного аппарата на торможение, и в 23:30 он разбился о поверхность Луны в районе 30° ю. ш., 0° в. д.

По непонятным причинам китайские информационные агентства сообщили об этом как о посадке, хотя взлетный аппарат не предназначался для этого и не имел запаса топлива, необходимого для повторного гашения орбитальной скорости. Зато обоснование для этой операции было дано вполне грамотное: не стоит оставлять на окололунной орбите космический мусор, который в будущем может помешать какой-нибудь другой лунной миссии.

ВОЗВРАЩЕНИЕ «ЧАНЪЭ-5»

Как мы помним, момент отлета к Земле был выбран вблизи зимнего новолуния, когда Луна имеет наиболее отрицательное склонение. Поэтому еще шесть суток аппарат находился в режиме ожидания на круговой орбите высотой около 210 км.

12 декабря в 01:54 был выдан первый отлетный импульс величиной около 400 м/с, который превратил орбиту «Чанъэ-5» в эллиптическую с перигеумом 230 км и апоцентром около 5730 км.

13 декабря в 01:51 вблизи перигеума аппарат включил на 22 минуты четыре двигателя тягой по 150 Н. В результате он увеличил свою скорость еще примерно на 420 м/с и покинул окололунную орбиту, направившись к Земле.

На этапе перелета к Земле состоялись две из трех запланированных коррекций – 14 декабря в 03:13 и 16 декабря в 01:15. В обоих случаях использовались два двигателя тягой по 25 Н, которые проработали 28 и 8 с соответственно.

На заключительном этапе полета над южной частью Индийского и Атлантического океанов и над Африкой с «Чанъэ-5» по договору с китайской стороной работала наземная станция ЕКА Маспаломас на Канарских островах. Сначала она отслеживала подлетную траекторию, а 17 декабря около 01:00 через нее на борт заложили последние уставки с условиями входа в атмосферу. Станция Куру работала только на прием в качестве дублера.

16 декабря в 17:13:19 на высоте около 5000 км над Южной Атлантикой прошло разделение орбитального и возвращаемого модулей. Первый сразу после этого сманеврировал, чтобы избежать попадания в земную атмосферу – у китайских

специалистов есть планы его дальнейшего использования в межпланетном полете.

Возвращаемый модуль продолжил снижение и в 17:33 на высоте 120 км к востоку от берегов Сомали вошел в атмосферу со второй космической скоростью. Частично погасив ее в ходе первого погружения над Аравийским морем, где дежурил корабль «Юаньван-3», возвращаемый модуль поднялся над краем атмосферы за счет подъемной силы, действующей на его фарообразный корпус с теплозащитой. Пройдя апогей новой баллистической траектории над Гималаями, он погрузился во второй раз над западной частью Китая и окончательно затормозился в плотных слоях атмосферы. В 17:51 на высоте 10 км была введена парашютная система.

16 декабря в 17:59 UTC возвращаемый аппарат успешно приземлился на посадочном полигоне в хошуне Сыцзыван Автономного округа Внутренняя Монголия. Точка посадки с координатами 42°20'19" с. ш., 111°26'20" в. д. находилась всего в 1.5 км от расчетной.

В ночной степи Сыцзывана была отвратительная погода – температура ниже –20 °С при сильном ветре. Тем не менее поисково-спасательный комплекс уверенно вел аппарат до касания, и уже через 20 минут после приземления люди были около него.

Впрочем, одна любопытная лиса появилась на месте событий еще раньше.

Около трех часов ночи председатель КНР Си Цзиньпин выступил с поздравлением в адрес всех участников китайской экспедиции за лунным грунтом. И есть за что – ведь лунное вещество доставлено на Землю в первый раз после 44-летнего перерыва! Напомним, что в 1969–1976 гг. это удалось сделать шести американским лунным экспедициям и трем советским автоматическим станциями типа Е8-5.

Возвращаемый аппарат «Чаньэ-5» зачехлили и вывезли с места посадки. Вечером 17 декабря китайский военный-транспортный самолет Юнь-9 поднялся с военного полигона Чжурихэ, чтобы доставить ценный груз на предприятие CAST в Пекине. Утром 19 декабря там в контролируемых условиях из возвращаемого аппарата был извлечен контейнер с лунным грунтом. Измерение показало, что внутри находятся образцы суммарной массой 1731 грамм – неудивительно, если учесть проблему с бурением. После этого руководитель Китайской национальной космической администрации Чжан Кэцзянь и президент Китайской академии наук Хоу Цзяньго подписали акт о передаче контейнера для научных исследований.

Доставленный лунный материал будет изучаться в Пекине в специализированной Лаборатории лунных образцов при Национальной астрономической обсерватории Китая. Вопрос о возможности передачи части образцов для изучения учеными за пределами Китая находится в стадии обсуждения.

Часть материала будет храниться отдельно – в городе Шаошань, на родине Мао Цзэдуна.

Между прочим в возвращаемом аппарате «Чаньэ-5» имеются и другие грузы. Пока известно, что он доставил семена растений (риса, овса, люцерны и орхидей), совершившие полет по маршруту «Земля – Луна» и обратно.

Продолжение следует!

На лунной поверхности продолжают работать китайские аппараты «Чаньэ-3» и «Чаньэ-4» и ровер «Юйту-2», преодолевший за два года 600 метров пути. На окололунной орбите трудится CE5-T1, а в точке L_2 за Луной – спутник-ретранслятор «Цюэцяо».



Станция Цзямусы системы дальней космической связи КНР

Новый аппарат «Чаньэ-7» планируется запустить в 2023 г. с посадкой в южной полярной области Луны с целью исследования местных условий и ресурсов. Помимо лунохода, «Чаньэ-7» доставит на Луну прыгающий зонд.

«Чаньэ-6» – оставшийся не у дел дублер «Чаньэ-5» – должен стартовать в 2024 г. и доставить лунные образцы либо с обратной стороны, либо из полярной области. Предусмотрена установка на «Чаньэ-6» иностранной научной аппаратуры на конкурсной основе.

Запуск «Чаньэ-8» также намечен на 2024 год. На этом аппарате планируется отработка ключевых технологий добычи и использования лунных ресурсов.

Решение о переходе к пилотируемым лунным экспедициям пока не принято. Этот вопрос будет рассмотрен после окончания сборки китайской орбитальной станции «Тяньгун» в 2022 г.

Обсерватории, институты

САО РАН ГЛАЗАМИ АСТРОНОМОВ

Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences as seen by astronomers

КУДРЯВЦЕВ Дмитрий Олегович,

кандидат физико-математических наук,

РОМАНЮК Иосиф Иванович,

доктор физико-математических наук,

СЕМЕНКО Евгений Алексеевич,

кандидат физико-математических наук,

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

DOI: 10.7868/50044394821010060

In this review we attempt to tell the reader about the present-day activities in the biggest Russian astronomical observatory, Special Astrophysical Observatory (SAO) located in the Northern Caucasus. The observatory possesses a number of instruments operating in the optical and radio wavelength bands. Hereafter we focus on the largest Russian 6-meter optical telescope that was put in operation 45 years ago.

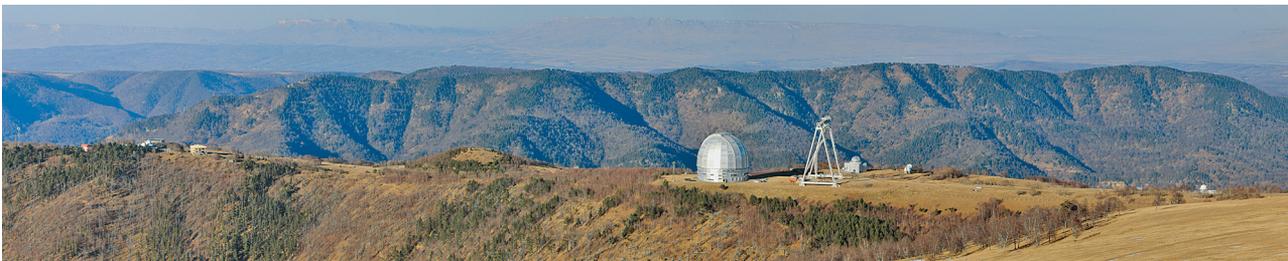
ОБСЕРВАТОРИЯ КАК ИНСТИТУТ

История астрономических наблюдений насчитывает много тысяч лет, но слово «обсерватория» для обозначения места, откуда выполняются наблюдения, вошло в русский язык лишь в XVIII веке. Одной из первых в России была создана обсерватория Петербургской академии наук, основанная в 1725 г.

Практически с момента своего появления обсерватории превратились в полноценные исследовательские центры, в которых не только наблюдали, но и анализировали полученные результаты. Конечно, в современном мире имеется огромное разнообразие обсерваторий – это и автоматизированные телескопы, и станции слежения за околоземным пространством, и космические проекты. Однако для крупных наземных инструментов ситуа-

ция сохраняется: большие телескопы часто образуют вокруг себя серьезные научно-исследовательские институты с уникальным научным оборудованием, задачами и людьми, работающими над разгадкой законов Вселенной.

Историческим фактом является, что в послевоенные годы середины XX века, в течение 15 лет СССР сделал огромный рывок в развитии науки и технологий, страна запустила искусственный спутник и вышла в космос. Академия наук – тогда АН СССР – значительно расширилась за счет новых институтов. Тогда же было принято решение создать новую астрономическую обсерваторию, оборудованную крупнейшем в мире оптическим телескопом с диаметром главного зеркала 6 м, что сделало страну лидером в области наблюдательной астрофизики, а Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (далее САО) по праву и сегодня занима-



Панорама верхней научной площадки САО РАН

ет особое место среди астрономических институтов России.

В век интернета информационное пространство заполнено подробными рассказами о работе крупных мировых обсерваторий и результатах наблюдений на больших телескопах в Чили, США и других странах. На этом фоне отечественная астрономия во многом остается в тени. Даже от подготовленной публики нередко можно услышать вопросы вроде: а 6-м телескоп еще работает?

Чтобы немного восполнить этот пробел, мы попробуем рассказать о современной научной работе крупнейшей обсерватории России в САО. В рамках небольшой обзорной статьи невозможно охватить все области деятельности обсерватории, и даже перечислить наиболее значимые научные достижения. Поэтому мы сделаем акцент на оптических телескопах САО, включая и крупнейший в России оптический телескоп с диаметром главного зеркала 6 м – Большом телескопе азимутальном или БТА.

Сданный в эксплуатацию 45 лет назад, долгое время самый большой телескоп в мире, БТА и сейчас входит в двадцатку крупнейших астрономических телескопов. Специфика работы обсерватории с крупнейшим телескопом общего пользования, а также идеи, заложенные первым директором обсерватории, Иваном Михеевичем Копыловым, во многом определили со-

временный облик нашего института. Читателям, интересующимся ранней историей САО, можем рекомендовать обратиться к литературе: это тематические сборники статей к 40-летнему и 50-летнему юбилеям САО, а также дневники И.М. Копылова.

Специальная астрофизическая обсерватория сейчас – это научно-исследовательский институт в ведомственной принадлежности Министерства науки и высшего образования. В штате обсерватории состоят более 400 сотрудников, около 100 из которых являются научными. В числе последних – два академика РАН (вице-президент РАН Ю.Ю. Балегга и Ю.Н. Парийский), 20 докторов и 60 кандидатов наук. В обсерватории работают Ученый совет и специализированный совет по защитам докторских и кандидатских диссертаций. Обсерватория издает научный журнал «Астрофизический бюллетень», в котором печатаются результаты исследований российских и зарубежных ученых. Английская версия журнала *Astrophysical Bulletin* выпускается и распространяется издательством Springer.

В обсерватории действует аспирантура, осуществляя подготовку по специальности «Астрофизика и звездная астрономия». Ежегодно в обсерватории проводятся всероссийские и международные конференции по разным направлениям астрономии. Сборники докладов таких конференций, как правило, издаются на

английском языке, индексируются в различных международных базах и широко цитируются.

Не забывает обсерватория и про популяризацию науки: сейчас ее телескопы и музей САО ежегодно посещают более 20 тыс. гостей ежегодно.

Территориально обсерватория расположена в Зеленчукском районе Карачаево-Черкесской Республики на трех научных площадках. Нижняя площадка – своеобразная штаб-квартира САО с основной инфраструктурой – расположена в поселке Нижний Архыз на высоте 1200 м над уровнем моря. На верхней площадке, расположенной на высоте около 2100 м над уровнем моря на отрогах горы Пастухова, находятся оптические телескопы. Радиотелескоп РАТАН-600 на южной окраине станицы Зеленчукской формирует третью научную площадку САО. Санкт-Петербургский филиал – одно из подразделений обсерватории – находится на территории Главной астрономической обсерватории РАН. В прошлом году этот традиционно радиоастрономический филиал пополнился отделом астроприборостроения, перешедшим из ГАО РАН.

Удаленность от крупных научных центров и некоторая изолированность потребовала значительных материальных вложений в создание, развитие и эксплуатацию хозяйственной инфраструктуры обсерватории и жилого поселка. Поэтому, в отличие от классического научного института, когда в штате научных сотрудников – большинство, в САО РАН их менее 25%. Успешная работа обсерватории зависит не только от профессионализма и активности научного персонала, но и от слаженной, четкой работы всего коллектива.

Так выглядит Специальная астрофизическая обсерватория на языке официальных документов. Далее мы более пристально рассмотрим текущее состоя-

ние основных подразделений обсерватории. Единственное исключение – радиоастрономический сектор. Радиотелескоп РАТАН-600 является настолько уникальным инструментом, что заслуживает отдельной статьи.

ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ

Телескопы оптического диапазона в Специальной астрофизической обсерватории компактно расположены на верхней научной площадке в 17 км от поселка Нижний Архыз.

Основным инструментом обсерватории является телескоп БТА производства Ленинградского оптико-механического объединения (ЛОМО). С начала 1977 г. и по сей день БТА активно используется в наблюдениях. За это время на телескопе были получены сотни тысяч спектров и изображений галактик, звезд и других объектов. По эффективной собирающей площади своего 6-м главного зеркала БТА сейчас замыкает второй десяток в списке наиболее крупных современных телескопов.

В свое время идея создания БТА была поддержана не всеми астрономами и многие были настроены скептически. Сомнения вызвала возможность постройки телескопа на альтимутальной монтировке, плохие погодные условия в месте установки, дороговизна проекта. Однако, опыт и результаты эксплуатации телескопа подтвердили правильность сделанного выбора. Без БТА в настоящее время Россия обладала бы лишь несколькими телескопами 2-м класса, тогда как в мире уже строятся телескопы-гиганты с зеркалами диаметром 30 м.

Об обсерватории и ее 6-м телескопе существует много расхожих мифов и домыслов. Например, часто говорится об ужасном климате в САО, но посмотрим на многолетние статистические наблю-

дения за погодными условиями. Рабочий процесс на телескопе возможен в случае, если скорость ветра не превышает 15 м/с, а также если разница температур главного зеркала и атмосферы не превышает 10 градусов. В среднем за год по этим причинам теряется от 10 до 15 ночей наблюдательного времени. Статистика наблюдательно-

го времени за последние 20 лет говорит о том, что среднее число наблюдательных часов составляет 1650 в год. На широте САО (+43°) это составляет примерно 45% времени от теоретически возможного. Графически распределение наблюдательного времени показано на рисунке. По количеству часов наблюдений САО имеет те же характеристики, что и другие обсерватории Северного Кавказа.

Особенности рельефа верхней научной площадки в сочетании с климатом, конструкцией телескопа и его башни создают такие условия, когда среднее качество изображения (seeing) составляет около 1,5". Это тоже значительно лучше, чем считают многие, интересующиеся качеством наблюдательного материала, полученного на телескопах САО. При этом важно отметить, что эти значения получаются из реальных наблюдений на 6-метровом телескопе. А это значит, что все эффекты, вроде неравномерной термостабилизации элементов телескопа, микроклимат башни телескопа и качество исполнения механических узлов уже учтены. Отсюда становятся очевидными перспективные направления работ по улучшению характеристик БТА.

За десятилетия своей работы основной телескоп прошел несколько стадий технической модернизации. Среди наиболее серьезных: полная замена системы управления телескопом, переход на новые приводы, обновление навесной

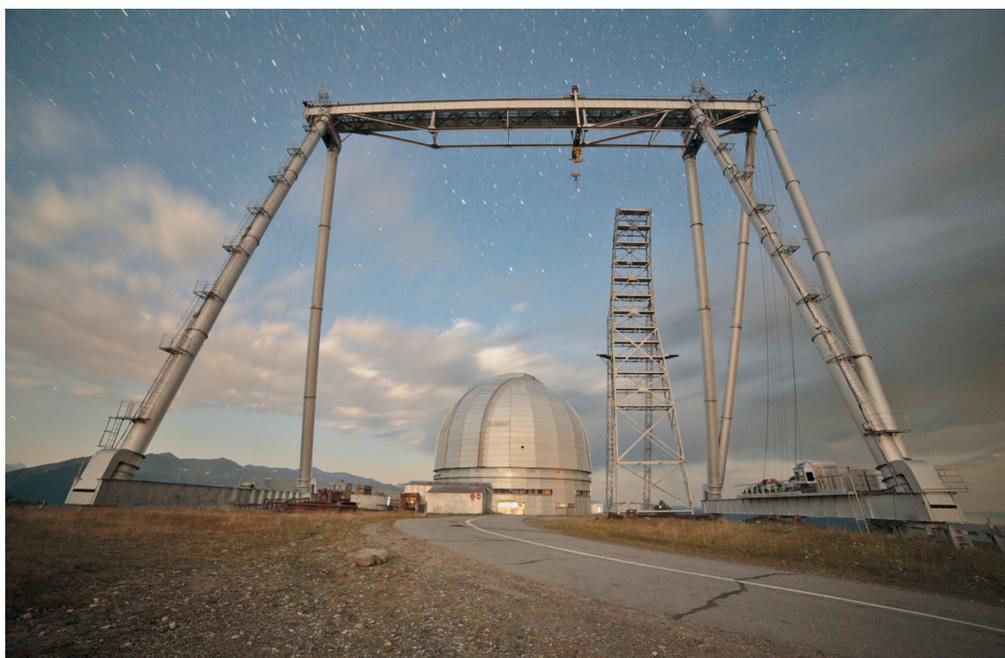


Количество реального наблюдательного времени на 6-м телескопе БТА за 1993–2017 гг. по данным службы эксплуатации комплекса БТА

аппаратуры и даже попытка замены главного зеркала. Для сглаживания эффектов термостабилизационной инерции 42-тонного стеклянного главного зеркала в подкупольном пространстве были установлены кондиционеры.

Надо признать, не все работы завершились успешно. Например, система охлаждения из-за недостатка финансирования не была закончена. Еще сложнее ситуация с восстановлением поверхности запасного 6-м зеркала. Попытка, предпринятая на Лыткаринском заводе, успехом не увенчалась. Здесь мы не будем обсуждать причины, но время простоя телескопа в 2018–2019 гг. было потрачено не зря. После существенных вложений была сильно модернизирована установка для напыления алюминия на главное зеркало БТА. Основное рабочее зеркало с новым качественным слоем алюминия осенью 2019 г. было возвращено на телескоп. Предпринятые меры по улучшению и обновлению позволили существенно улучшить эффективность собирания света.

Многолетний опыт эксплуатации БТА показал, что советская промышленность сумела создать надежный



БТА вечером. Два крана необходимы при замене и обслуживании крупногабаритных деталей

инструмент. Крупных поломок механики, которые привели бы к длительной остановке телескопа вообще – не было за все время эксплуатации. Более мелкие неисправности узлов телескопа или башни встречаются редко, простои по этой причине не превышают суток. Чаще встречаются поломки приемной аппаратуры. Современные приборы представляют собой сложные электронные системы, требующие постоянного ухода и модернизации, а условия их эксплуатации в САО очень суровые: высокогорье, низкие температуры, влажность и пр. Износ оборудования в таких условиях значительно выше, чем в обычной лаборатории. В условиях ограниченного финансирования часто приходится искать нестандартные решения.

Телескоп БТА оснащен большим комплексом аппаратуры. Он включает в себя спектрографы высокого и низкого разрешения для получения спектров звезд

и галактик, интерферометр Фабри – Перо, приборы для спектрополяриметрии, спекл-интерферометр, быстрый фотометр и др. За редким исключением все эти приборы созданы или модернизированы сотрудниками САО. Описание действующих можно найти на сайте обсерватории в разделе «Телескопы»¹.

Практически все наблюдения на БТА выполняются в режиме удаленного доступа, когда астрономы работают с телескопом и его аппаратурой дистанционно из лабораторного корпуса обсерватории в поселке Нижний Архыз. На верхней научной площадке непосредственно у телескопа находится лишь дежурная смена, состоящая из инженера-оператора, механика и электрика. Такой стиль работы характерен для всех современных крупных обсерваторий, и в комнате удаленных наблюдений САО не будет ощущаться принципиальной разницы с тем,

¹ www.sao.ru

что можно увидеть в аналогичных помещениях 10-м телескопа GTC в Испании или его меньших собратьев в Чили.

Как и в других крупных обсерваториях, наблюдательное время телескопа БТА распределяется специальным программным комитетом (Национальный комитет по тематике российских телескопов – НКРТ), в состав которого входят ведущие астрономы России, представители различных научных учреждений. Заявки на наблюдательное время могут подавать как российские, так и зарубежные ученые. Наблюдения по одобренным программам ведутся на безвозмездной основе. Основные наблюдения на БТА – спектроскопические. Запрашиваемое количество ночей для наблюдений регулярно в 2–3 раза превышает реально имеющееся. Если бы в России имелся телескоп 4-м класса, то многие заявки, требующие длительных рядов наблюдений, могли бы быть перенесены на него. В этом случае, больше времени можно было бы выделить на БТА для выполнения программ с высоким приоритетом. Но в настоящее время по ряду требований к данным только БТА может обеспечить отечественных астрономов данными мирового уровня, поэтому сужение поля работы 6-м телескопа до отдельных направлений, безусловно, нанесет вред нашей науке. Практика показывает, что астрономы САО получают около 40% наблюдательного времени на телескопе, а остальные 60% – иногородние и иностранные ученые.

Кроме БТА, на верхней научной площадке размещены и другие оптические телескопы. Самый крупный из них – производства фирмы Carl Zeiss (Йена), с 1-м главным зеркалом – был введен в эксплуатацию в конце 1980-х гг. Изначально Цейсс-1000 рассматривался как телескоп поддержки для программ на БТА, но быстро нашел свою нишу в исследовательской работе. Наблюдательное время на нем в основном распределяется на конкурсной основе.



Вид на БТА с балкона телескопа Цейсс-1000

Как и БТА, 1-м телескоп тоже постоянно модернизируется. Длительное время Цейсс-1000 имел оборудование только для спектроскопии и фотометрии, но в последние годы для него были разработаны новые приборы, которые расширили спектр решаемых задач, добавив, например, поляриметрию. Роль испытательного полигона для нового астрономического оборудования Цейсс-1000 тоже не утратил. Усилиями инженеров и ученых обсерватории на телескопе была полностью переделана система управления, в результате чего сейчас нет необходимости наблюдателям подниматься для ночной работы на верхнюю научную площадку. Наблюдать с Цейсс-1000 сейчас можно практически по всем программам из комфортного помещения лабораторного корпуса.

Старейшим инструментом САО является еще одно изделие фирмы Carl



Малые оптические телескопы на верхней научной площадке

Zeiss – телескоп с главным зеркалом диаметром 60 см. На этом телескопе работа в САО началась в 1973 г. Как и везде в мире, столь малые телескопы занимают свою нишу в фотометрических обзорах с целью мониторинга долгопериодических процессов в звездах и галактиках. Не менее популярной является задача поиска тел, опасно сближающихся с Землей.

Тема фотометрических исследований экзопланет, белых карликов и транзиентных источников является основной для семейства из четырех роботизированных телескопов с зеркалами диаметром 50 см. Особенность нового проекта САО заключается в полной роботизации телескопов, когда вся работа выполняется без вмешательства человека в течение ночи. Одновременное использование нескольких

телескопов, наблюдающих один объект в разных фотометрических полосах, призвано повысить эффективность использования наблюдательного времени. По состоянию на момент написания статьи на одном телескопе уже проведены научные наблюдения в полуавтоматическом режиме. Остальные три телескопа закуплены и находятся в стадии наладки или создания для них инфраструктуры.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТОРОНА АСТРОНОМИИ

Давно ушло в прошлое то время, когда астрономы глазами рассматривали в телескоп небесные тела. Уже почти 150 лет как в астрономии началась фотографическая эра, которая закончи-

лась в основном к концу 1980-х годов. Сейчас для регистрации света от небесных объектов используются сверхчувствительные полупроводниковые приемники. Наиболее распространенный тип приемников – приборы с зарядовой связью или ПЗС-матрицы. Сейчас, спустя почти три десятилетия использования в астрономии, полупроводниковые матрицы можно встретить в цифровых фотоаппаратах, видеокамерах и даже телефонах. Хотя принцип работы этих устройств может быть одинаковым, требования к качеству астрономических приемников несравненно выше. А значит, без высоких технологий наблюдательная астрономия невозможна.

Разработка приемных устройств, пригодных для использования в астрономических наблюдениях, под силу лишь небольшой группе лабораторий в мире. Единственная такая лаборатория в России работает в CAO – лаборатория перспективных разработок. ПЗС-системы, созданные специалистами этой лаборатории можно встретить на многих телескопах России и даже за рубежом. Ими же оснащены и приборы, установленные на телескопах CAO.

Ни для кого не секрет, что ни в СССР, ни в современной России – не было собственного производства высококачественных и доступных ПЗС-чипов. Наши инженеры на основе зарубежных чипов умеют делать аппаратуру мирового уровня с современной электронной оснасткой. Важно отметить и высокий уровень кооперации с другими фирмами и лабораториями страны. Без их участия не удалось бы наладить производство современного астрономического приемного оборудования.

На момент начала эксплуатации 6-м телескоп был оснащен навесным оборудованием, созданным советской промышленностью. Со временем возникла

острая необходимость в обновлении. В последующем вся новая оснастка телескопа была выполнена усилиями сотрудников обсерватории. Единственный прибор, созданный вместе с БТА и работающий до сих пор после глубокой модернизации, – это Основной звездный спектрограф.

Над созданием приборов нового поколения для обсерватории работали ранее и трудятся сейчас многие сотрудники из конструкторского бюро, оптических и механических мастерских CAO РАН. За счет наличия этих структурных подразделений у астрономов есть возможность быстро отремонтировать приборы, вышедшие из строя, а так же разработать и испытать макеты новых устройств.

Любой рассказ о технологической стороне астрономии будет неполным без упоминания информационных технологий. В жизни CAO высокие технологии играли исключительно важную роль с момента создания института. Достаточно лишь того факта, что без применения вычислительной техники в режиме реального времени (очень редкая ситуация в 1970-е годы в СССР) для управления всей 650-тонной подвижной частью телескопа, проект БТА не имел шансов на реализацию. Использование инновационных приемников на 6-м телескопе также требовало соответствующего уровня технологической обработки полученного материала. С этой задачей справлялся вычислительный центр, оснащенный современной на тот момент ЭВМ.

С началом 1990-х годов астрономы и инженеры CAO были первыми в стране, кто внедрял в астрономии системы на основе операционной системы Linux. Нельзя не упомянуть и о роли обсерватории в переносе на компьютеры системы обработки данных ESO-MIDAS, разработанной в Южной европейской обсерватории и длительное время

остававшейся одной из двух наиболее распространенных систем для работы с астрономическими данными. Немало было сделано сотрудниками отдела информатики обсерватории для внедрения сетевых технологий в научную жизнь всего юга России.

Со временем отдел информатики был преобразован в лабораторию, но вклад коллектива лаборатории в работу САО не уменьшился. Силами инженеров-информатиков была разработана и внедрена принципиально новая схема управления двумя основными оптическими телескопами обсерватории. Обработка, хранение и представление доступа к архивам наблюдательных данных также является авторской разработкой сотрудников САО. Завершают комплекс информационного сопровождения наблюдений системы мониторинга погодных условий и система работы с заявками на наблюдательное время наших телескопов.

Мы отметили здесь только работы сотрудников лаборатории информатики, которые кажутся наиболее важными с точки зрения астрономов-наблюдателей, хотя многие не менее важные вещи остались за кадром. В этом отношении лаборатория информатики САО заслуживает отдельной статьи.

БУКОВО – НИЖНИЙ АРХЫЗ

Нижний Архыз – небольшой поселок астрономов в Зеленчукском районе Карачаево-Черкесии. Его значение в обеспечении работы САО огромно.

Известно, что первый директор САО – И.М. Копылов – отстаивал позицию, что ученые должны жить и работать в большом городе и лишь на время наблюдений приезжать к инструментам (работа вахтовым методом). Однако возобладали точка зрения, что астрономы должны жить непосредст-

Панорама поселка Нижний Архыз



венно у телескопов, в результате чего на карте появился небольшой поселок, который местные жители знают не иначе, как Буково.

Сейчас, по прошествии десятилетий, приходит осознание того, насколько мнение первого директора опередило свое время. Практически все большие обсерватории имеют штаб-квартиры в городах с небольшими базами возле телескопов. Жизнь в изолированном горном поселке оказалась преимуществом только в случае эпидемии COVID-19, когда на непродолжительное время БТА оказался одним из немногих крупных работающих телескопов. К счастью, такие обстоятельства складываются не часто.

Инфраструктура Нижнего Архыза состоит из зданий обсерватории (лабораторный корпус, здание лаборатории информатики, общежитие, детский сад, хозяйственные постройки), жилых домов и школы. В середине 2000-х годов поселок был газифицирован, а в последние годы в дома жителей Нижнего Архыза пришел высокоскоростной интернет.

Близость поселка к курортным местам Кавказа, чистота и ухоженность улиц и домов в сочетании с хорошей экологией превратили его в желанное место для покупки квартир жителями Москвы, Краснодара, Ставрополя и других городов. Удивительно, но квартиры Нижнего Архыза по стоимости приближаются к аналогичному жилью, например в Санкт-Петербурге. А в целом, как и раньше, жизнеобеспечение поселка полностью зависит от существования обсерватории.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ. КАДРОВЫЙ ВОПРОС

Аспирантура САО выпускает ежегодно 2–3 молодых специалистов, которые после защиты диссертации в основном остаются в обсерватории. За послед-

ние 10 лет в обсерватории защищено 4 докторских и 19 кандидатских диссертаций. За это время из САО уволилось 2 сотрудника с ученой степенью. Особой проблемы с молодыми астрономами в обсерватории нет, однако отмечается резкий недостаток кадров в возрасте 40–50 лет, которые должны были бы быть научными лидерами в своих научных направлениях. Эти люди были потеряны для обсерватории в 90-е годы. Многие бывшие сотрудники САО работают в зарубежных институтах, часть покинула астрономию. Но такая ситуация характерна для всей российской науки.

Сложнее обстоит дело с инженерными кадрами. Специалисты высокой квалификации должны получать соответствующее вознаграждение, которое трудно обеспечить в бюджетном учреждении. Различные научные Фонды выделяют средства только на научные исследования. Зарплата не менее 200% от средней по региону относится только к научным работникам. В результате, реальные доходы научных сотрудников и инженеров внутри одного коллектива становятся недопустимо различными, что вызывает не располагающее к эффективной совместной работе напряжение в коллективе.

Сейчас как никогда становится ясным масштаб отставания России от других стран мира в оснащении астрономическими приборами. За почти 50 лет после завершения строительства БТА, в России не сумели создать ни одного нового большого телескопа мирового класса. Давно ведутся разговоры о создании отечественного 4-м телескопа, но с учетом всех перипетий в отечественной науке и политике надежды на него почти не осталось. А ведь при должном уровне оснастки хороший и современный телескоп 3–4-м класса мог бы стать надежным дополнением к БТА.



Вид на башню БТА днем

Тревогу астрономов-наблюдателей вызывает доступ ученых к новым зарубежным технологиям. В условиях маргинализации отечественной науки и техники есть серьезный риск получить консервацию или даже откат в уровне технического обеспечения телескопов. Это касается как приемников, оптических элементов, так и информационных технологий обработки наблюдательного материала.

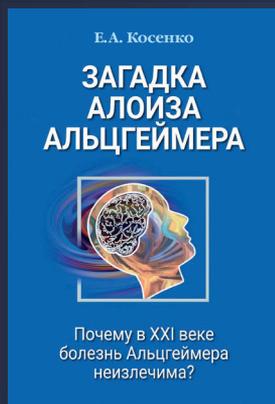
Именно по этой причине мы считаем необходимым и дальше развивать механические и оптические мастерские, а также лабораторию перспективных разработок САО.

Важно помнить, что астрономы-наблюдатели – это не обслуживающий персонал низкой квалификации, способный лишь следовать инструкциям. Практически все астрономы, работающие на телескопах САО, имеют ученые

степени докторов и кандидатов наук с навыками и пониманием принципов работы современной аппаратуры, не доступными большинству ученых, не задействованных в реальных наблюдениях. А такой труд должен достойно оплачиваться.

Подытоживая, можно сказать, что в обсерватории накопилось много важных проблем, но есть и перспективы. Коллектив САО, несмотря на все сложности в политической и экономической жизни страны, сумел не только сохранить работу основных инструментов обсерватории, но ценой больших усилий модернизировать их и создавать новые. Наблюдения телескопах САО идут в соответствии с программой наблюдений, как и десятилетия тому назад, и лишь непогода и снижение финансирования способны заставить нас закрыть купола телескопов.

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



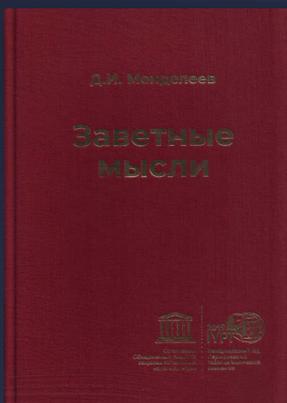
Косенко Е.А.

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.



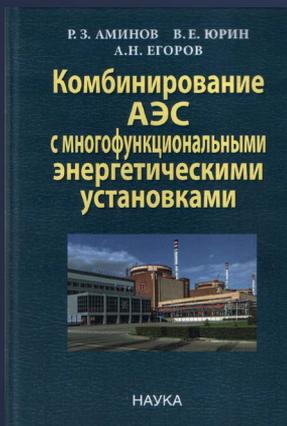
Менделеев Д.И.

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

In memoriam

Рафаил Львович АПТЕКАРЬ (27.09.1936–29.12.2020)



29 декабря 2020 г. из жизни ушел Рафаил Львович Аптекар, заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, признанный в мире специалист в области космических исследований и внеатмосферной астрономии.

Он пришел в ФТИ на должность старшего лаборанта в 1959 г. после окончания с отличием физического факультета Ленинградского университета.

С начала 1960-х годов он принимал активное участие в пионерских работах по исследованию околоземного космического пространства, развернутых в ФТИ под руководством Б.П. Константинова, М.М. Бредова и Е.П. Мазеца. Кандидатская диссертация Рафаила Львовича была посвящена наблюдениям искусственного радиационного пояса Земли. Исследования по проблеме так называемой «пылевой оболочки» Земли получили продолжение в осуществленном в 1986 г. эксперименте по прямому исследованию пылевого облака кометы Галлея в рамках космической миссии ВЕГА. В начале 1970-х годов в работах с участием Рафаила Львовича было получено первое независимое подтверждение регистрации космических гамма-всплесков – уникальных по энергетике событий, исследование которых приближает нас к пониманию эволюции Вселенной с ранних стадий ее существования. На рубеже 1970–1980-х годов в экспериментах «Конус» на межпланетных станциях серии «Венера» были открыты «мягкие гамма-репитеры» – удивительные галактические объекты, характеризующиеся сверхсильными магнитными полями.

Исследования астрофизических явлений с экстремальными характеристиками продолжились серией из почти

десять космических экспериментов, подготовленных ФТИ. Научный, технический и организационный вклад Рафаила Львовича в эти работы трудно переоценить. С 1994 г. в рамках программы международного космического сотрудничества успешно осуществляется эксперимент «Конус-ВИНД». Рафаил Львович долгое время был заместителем научного руководителя эксперимента, а с 2013 г., после кончины Е.П. Мазеца, был со-руководителем проекта с российской стороны. В № 2 2020 г. нашего журнала опубликована статья Рафаила Львовича, посвященная гамма-всплескам и эксперименту «Конус-ВИНД».

Четкая организация работ, совершенно необходимая при постановке космических экспериментов, оригинальные технические решения, самоотверженность и редкая работоспособность Р.Л. Аптекаря являлись залогом безотказной работы аппаратуры в условиях длительного космического полета и получения уникальных научных данных.

Результаты исследований с участием Рафаила Львовича представлены в более чем 100 научных работах, опубликованных в ведущих мировых изданиях. Его научная деятельность отмечена рядом научных премий и государственных наград.

Память о Рафаиле Львовиче Аптекаре, человеке огромной работоспособности и большого личного мужества, навсегда останется с теми, кто его знал.

ТРИ ЗВЕЗДЫ ГЕРОЯ: ЗНАНИЯ И СТРАСТИ

Несколько страниц из жизни великого ученого нашей Родины М.В. Келдыша

ГУБАРЕВ Владимир Степанович,

писатель, драматург, журналист

DOI: 10.7868/50044394821010072

Этот очерк я писал более полувека назад – с того самого дня, когда познакомился с академиком Мстиславом Всеволодовичем Келдышем (1911–1978), ученым в области прикладной математики и механики, организатором отечественной науки, идеологом космической программы (ЗиВ, 1981, № 1; 1991, № 3; 2011, № 1). Встреч с ним было много, так как космическая эпоха только начиналась, и лучше всего о ней мог рассказать только он, а моя работа корреспондента «Комсомольской правды» и «Правды» в то время требовала, чтобы эта тема стала повседневной на страницах газеты. Позже добавились генетика, атомная наука и техника, «оборонка», развитие нашей Академии наук по республикам и так далее. Я возглавил отделы науки этих газет, а М.В. Келдыш был избран президентом Академии наук СССР (1961–1975). Создавалась Великая Наука нашей Родины и, бесспорно, одну из главных ролей в этом процессе играл именно он. Как же можно было умолчать об этом!? Потом случилось так, что мы оба были спасены одним и тем же хирургом – поистине «неисповедимы пути Господни»...

Я постоянно обращаюсь к образу этого великого ученого страны, благо появляются новые документы и свидетельства о нем, о том, что он сделал для нашей Родины. И не перестаю поражаться его прозорливости, любви к Отчизне, тому объему Добра, что он принес людям. Иногда даже, кажется, что подобное невозможно, но потом понимаешь – гениям доступно все, в том числе и то, кажется нам невозможным.

Он был трижды Героем Социалистического Труда. Мне кажется, что это были своеобразные вехи его жизни.

ЗВЕЗДА ПЕРВАЯ: АТОМ

Еще до войны проходили очередные выборы в Академию наук СССР. С.А. Чаплыгин¹ предложил от ЦАГИ выдвинуть одного из молодых ученых в члены-корреспонденты. «А почему не Келдыша?» – спросили у него. Чаплыгин ответил кратко: «Уж кто-то, а Келдыш в особой поддержке не нуждается – сам пробьется».

¹ Сергей Алексеевич Чаплыгин (1869–1942) – ученый в области механики и математики, один из основоположников аэромеханики и аэродинамики, директор Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ, 1928–1931), академик АН СССР, Герой Социалистического Труда.

В 1946 г. М.В. Келдыш был избран действительным членом Академии наук СССР. Ему исполнилось 35 лет. О том, что Келдыш будет работать только с физиками или только с авиаконструкторами – мечтали и те, и другие. Как только И.В. Курчатов² и его команда приступили к работе по атомной бомбе, сразу же поступило предложение

² Игорь Васильевич Курчатов (1903–1960) – ученый в области физики ядра, «отец» атомной бомбы, глава «Атомного проекта», главный научный руководитель атомной проблемы в СССР, один из основоположников использования ядерной энергии в мирных целях, основатель и первый директор Института атомной энергии (1943–1960), академик АН СССР, трижды Герой Социалистического Труда.

ние о привлечении к ним и молодого профессора. Рассказывает академик И.М. Виноградов³:

«Вскоре после войны пришли ко мне Ю.Б. Харитон⁴ и другие физики. Просили порекомендовать математика, который мог бы поставить расчеты по атомной тематике. Я им порекомендовал взять Келдыша, – он в любом приложении математики способен разобраться лучше всякого. Келдыш им понравился. Прикладной математикой у нас в институте всегда много занимались, особенно много делали во время войны. Вот Келдыш и организовал к осени 1946 г. расчетное бюро, сначала из старых сотрудников, а потом туда пришло много молодежи».

Но «битва за Келдыша» еще только начиналась!



Академик М.В. Келдыш.
Середина 1940-х гг.
АРАН. Ф. 1729, Оп. 1, Д. 44, Л. 2



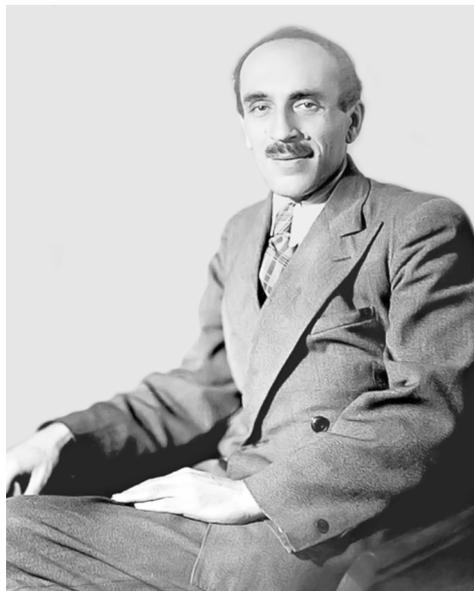
Член-корреспондент
АН СССР Ю.Б. Харитон.
Конец 1940-х гг.

30 апреля 1946 г. Институт химической физики АН СССР во главе с Н.Н. Семёновым⁵ включается в «Атомный проект». То, чего добивался Николай Николаевич, осуществляется: он убежден, что только его Институт способен решить ядерную проблему в СССР. Полной информации у него нет, академик

³ Иван Матвеевич Виноградов (1891–1983) – ученый в области математики, директор Математического института им. В.А. Стеклова (1934–1941, 1944–1983), академик АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда.

⁴ Юлий Борисович Харитон (1904–1996) – ученый физик-теоретик и физикохимик, один из руководителей проекта создания атомной бомбы, главный конструктор и научный руководитель КБ-11 (Арзамас-16, ныне – Российский федеральный ядерный центр) в Сарове (1946–1992), академик АН СССР, трижды Герой Социалистического Труда.

⁵ Николай Николаевич Семёнов (1896–1986) – физикохимик, создатель теории цепных реакций, один из основоположников химической физики, организатор и директор Института химической физики (ныне носит имя ученого; 1931–1986), вице-президент АН СССР (1963–1971), лауреат Нобелевской премии, дважды Герой Социалистического Труда.



Академик Н.Н. Семёнов. 1940-е гг.

Семёнов не подозревает, что он лишь одно звено в той цепи, которую уже создали Л.П. Берия⁶ и И.В. Сталин...

Академик Семёнов обращается к Берии: «...в Постановлении Совета Министров от 30 апреля нет указания о переводе в наш институт из ЦАГИ члена-корреспондента Академии наук проф. Келдыша и проф. Седова. Это обстоятельство ставит меня в крайне тяжелое положение, т. к. именно Келдыш должен был обеспечить наиболее ответственное из заданий Лаборатории № 2, связанное с решением ряда

задач, необходимых для конструирования основного объекта...» В данном письме чрезвычайно любопытна оценка, данная Семёновым Келдышу:

«Обращаю Ваше внимание на следующие обстоятельства:

1) По отзывам всех руководящих математиков нашей страны, профессор Келдыш является самым талантливым математиком молодого поколения (ему 34 года), к тому же имеющий опыт технических расчетов...

Наша математика является самой сильной в мире. Эту силу мы должны использовать – это наш козырь. Проф. Келдыш – сильнейший математик, находящийся в самом творческом возрасте и активно желающий сосредоточить



Первый руководитель атомной отрасли, народный комиссар боеприпасов СССР, генерал-полковник инженерно-артиллерийской службы Б.Л. Ванников. 1950 г. Фото: архив госкорпорации «Росатом»

все свои силы на новой проблеме. Мне кажется, что этому его желанию препятствовать нельзя. Я придаю огромное значение привлечению его к новой проблеме. Как только он овладеет новой областью, создастся возможность втягивания в проблему всех основных математических сил...»

Берия отвечает за «Атомную проблему»: казалось бы, он должен немедленно откликнуться на предложение Семёнова и перевести Келдыша в его институт. Но Берия отвечает и за развитие авиации, а министр авиационной промышленнос-

ти М.В. Хруничев не соглашается «отдать» Келдыша. Б.Л. Ванников⁷ информирует Берия:

«Тов. Хруничев соглашается на работу тт. Келдыша и Седова в лаборатории академика Семёнова лишь по совместительству, т.е. по 3 дня в неделю, с тем, чтобы 3 дня они работали в ЦАГИ.

Тов. Семёнов настаивает на том, чтобы профессор Келдыш и профессор Седов, как необходимые условия для возможности работы Специального сектора Института химической физики, работали в этой лаборатории 5 дней и лишь один день в ЦАГИ.

Считаю возможным ограничиться тем, чтобы тт. Келдыш и Седов рабо-

⁶ Лаврентий Павлович Берия (1899–1953) – государственный и партийный деятель, генеральный комиссар госбезопасности, председатель Специального комитета работ по использованию атомной энергии (1945–1953), маршал Советского Союза, Герой Социалистического Труда.

⁷ Борис Львович Ванников (1897–1962) – государственный деятель, один из организаторов и руководителей производства ядерного оружия, начальник 1-го Главного управления при Совете Министров СССР (1945–1953), генерал-полковник инженерно-технической службы, трижды Герой Социалистического Труда.

тали у академика Семёнова 4 дня в неделю и в ЦАГИ – 2 дня в неделю, что и прошу утвердить».

В этой истории любопытен сам факт борьбы за математиков. И ученому, и министру ясно, что без них нельзя решать проблемы, связанные с новой техникой. Сегодня мы только и слышим громкие слова о «высоких технологиях», но почему никто из оракулов не вспоминает о математиках. Впрочем, они упоминаются лишь в связи с «утечкой мозгов» на Запад, где наших математиков ценят несравненно выше, чем на родине. Резолюция Берии тоже весьма поучительна: «Тов. Ванникову и тов. Хруничеву. Прошу дать совместные предложения». Берия требовал, чтобы его подчиненные умели находить общие решения, а не перекладывать свои заботы на начальство.

В 1952 г. Сталин часто хворал, и каждый раз после очередной болезни интерес к «Атомному проекту» у него падал. Если раньше он ревниво следил за тем, чтобы под каждым документом, будь то строительство нового цеха или бытовая помощь наиболее важным фигурам «Атомного проекта», стояла его подпись, то теперь он полностью доверял это Берии, однако Лаврентий Павлович старался все-таки чаще спрашивать Сталина о тех или иных атомных проблемах, но однажды тот отрезал: «Сам решай, не маленький!», и с той поры Берия по пустякам не беспокоил дряхлеющего вождя. Было очевидно, что успешные испытания «своей» бомбы успокоили Сталина, да и мировая общественность признала существование второй ядерной державы. В общем, Сталин добился того, что считал необходимым для равновесия в мире, а потому все свои оставшиеся силы теперь он направил на восстановление страны после войны. Впрочем, о ходе работ над водородной бомбой он знал. Берия заверил его, что к середине 1953 г. она будет испытана ...



Академики И.В. Курчатова и Ю.Б. Харитон – создатели ядерного щита страны. 1950-е гг.

Сталин терпеливо ждал, а Берии приходилось решать множество новых проблем, которые возникали постоянно. В частности, из «Атомного проекта» старались забрать ученых и специалистов, которые занимали в нем ключевые посты. В Академии наук и в министерствах почему-то посчитали, что бомба взорвана, а, следовательно, они там не нужны. Пришло тревожное письмо от А.П. Завенягина⁸, в нем, в частности, он говорил о том, что предполагается назначить М.В. Келдыша академиком-секретарем Отделения технических наук АН СССР, а потому предлагается освободить его от работ по заданиям Первого главного управления. Завенягин напоминает Берии, что:

⁸ Авраамий Павлович Завенягин (1901–1956) – организатор промышленности, инженер-металлург, куратор советской металлургии и «Атомного проекта», генерал-лейтенант МВД, дважды Герой Социалистического Труда.



Одноступенчатая термоядерная авиабомба РДС-бс, разработанная под руководством А.Д. Сахарова и Ю.Б. Харитона, испытана 12 августа 1953 г. на Семипалатинском полигоне (сбрасывалась с самолета Ту-16). Заявленная мощность 500 кт, при испытаниях была получена мощность 400 кт, выделение энергии на долю синтеза пришлось 15–20%. Музей ядерного оружия в Сарове

«...а) товарищ Келдыш М.В. возглавляет математическое расчетное бюро, занятое расчетами изделий РДС-бТ;

б) кроме того, т. Келдыш М.В. Постановлением Совета Министров СССР от 9 мая 1951 г. за № 1552–774оп утвержден председателем секции № 7 Научно-технического совета ПГУ и возглавляет научное руководство работой по созданию конструкций быстродействующих вычислительных машин и разработке методов работы на машинах;

в) т. Келдыш М.В. руководит организацией вычислительного центра Первого главного управления (в помещении бывш. ФИАН⁹), в котором будут установлены мощная вычислительная машина «Стрела» и другие вычислительные машины.

Большая важность и большой объем работ для Первого главного управления, проводимых т. Келдышем М.В., не позволяют освободить т. Келдыша М.В. от работ Первого главного управления...»

В своей резолюции на этом письме Л.П. Берия отдает распоряжение руководителям Академии наук СССР найти другого кандидата. Только через несколько лет Мстислав Всеволодович станет сначала одним из руководителей Академии наук, а затем и ее Президентом. Но что следует из этого письма, которое ранее никогда не публиковалось? Наконец-то, появляется

возможность оценивать роль академика Келдыша в «Атомном проекте СССР». Об его участии лишь упоминается, а на самом деле именно академику Келдышу принадлежит решающая роль в расчетах как атомной, так и водородной бомбы. По мере того, как рассекречиваются документы военно-промышленного комплекса СССР, это становится все более очевидным. В архивах, к счастью, сохранился уникальный документ. Он рассказывает об участии ученого в испытаниях первой водородной бомбы. Это «Записка» академика М.В. Келдыша с пометкой «Исполнено от руки в 1экз. 16.VIII.53 г.»:

«Во время испытания я находился на возвышенности вблизи ОКП¹⁰. Первую вспышку наблюдал через очки. Вместе с яркой вспышкой ощущался в течение нескольких секунд на лице жар от облучения. Через несколько секунд я снял очки, однако свет был еще столь сильным, что пришлось снова надеть очки. После вспышки был виден расширяющийся и поднимающийся кверху огненный шар. Через несколько секунд я снял фильтры от очков и продолжал наблюдать. Огненный шар понемногу обратился в желтое облако, подпертое ножкой, образованной подсасываемой шаром

⁹ Физический институт им. П.Н. Лебедева.

¹⁰ Общий командный пункт управления ядерных испытаний атомной бомбы на Семипалатинском полигоне в Казахстане.

*Огненное облако атомного взрыва
6 ноября 1955 г. термоядерной
авиабомбы РСД-27 мощностью 250 кт.
Фото: архив госкорпорации «Росатом»*

струей, смешанной с пылью. В некоторый момент была ясно видна отделяющаяся от шара ударная волна. Приход ударной волны к месту наблюдения ощущался по довольно сильному звуку.

Грибообразное облако быстро двигалось вверх и увеличивало свои размеры. Размеры облака росли столь быстро, что казалось, что оно движется к месту наблюдения, хотя оно относилось ветром в противоположную сторону. Во время развития облака было заметно вращение подсасываемой струи в тороидальное вращение облака. Через некоторое время после взрыва облако снизу покрылось туманом от сконденсировавшейся на нем атмосферной влаги. Этот слой тумана был быстро втянут тороидальным вращением внутрь облака и затем, отставая от движения облака, образовал развивающийся колокол над ножкой облака. Этот колокол держался несколько минут и потом разрушился. Когда облако поднялось довольно высоко, было замечено выпадение из него вниз взвешенных частиц. Достигнув высоты свыше 10 км, облако начало размываться и отделяться от ножки, которая тоже размывалась. Еще до этого момента было заметно искривление ножки, вызванное переменной силы ветра на высоте.

На земле большая площадь около центра взрыва была продолжительное время покрыта пылевым облаком. Через некоторое время стали наблюдать дымы от пожаров».

За участие в создании термоядерного оружия в 1956 г. академику М.В. Келдышу было присвоено звание Героя Социалистического Труда. Вторую Звезду Героя он получит через пять лет...



ЗВЕЗДА ВТОРАЯ: КОСМОС

Несколько страниц из биографии первого искусственного спутника Земли (ПС-1; ЗиВ, 1991, № 5; 2002, № 5; 2007, № 5), на мой взгляд, представляют особый интерес. Не потому, что они важнее или весомее других, вовсе не в том причина. Скорее у них «личный оттенок», так как благодаря этим историям мне стало понятнее, почему Спутник объединил столь разных ученых и конструкторов, политиков и военных. Их судьбы стали частью тех «бип-бип-бип», которые разносилось над планетой в октябре 1957 г. Когда кинохроника показывает полет первого спутника, в этих звуках для меня сразу же вспоминаются великие соотечественниками, с которыми жизнь дала счастье мне видиться и говорить. Да и что греха таить, горжусь тем, что впервые мне удалось рассказать об этих страницах нашей космической истории.

А начинать, пожалуй, имеет смысл с тюльпанов...

Для каждого из нас, кто причастен хотя бы немного к космическому подвигу нашего народа, есть «свой» Байконур. Он представляется по-разному, особенно в те дни, когда отмечаются юбилеи. Казалось бы, следовало скрупулезно подсчитать количество запусков ракет (их уже несколько тысяч), число космонавтов, которые отпра-



Ракета-носитель «Союз» на стартовой площадке космодрома Байконур. 1968 г. Фото: архив госкорпорации «Роскосмос»

лялись отсюда на околоземные орбиты (их уже многие десятки), другие памятные события, к примеру, приезды сюда руководителей разных государств – президентов и премьеров (их тоже уже десятки) и т. д. и т. п.

Однако мне вспоминается совсем иное. И в первую очередь тюльпаны. Я впервые увидел их в пятый или шестой мой приезд на космодром. До весны 1968 г. Байконур встречал только поздней осенью, зимой и летом – так складывалось расписание пусков. А потому эта голая степь, пейзаж которой слегка оживляли только корпуса для сборки ракет да стартовые комплексы, была весьма негостеприимна: безжалостная жара летом, пронизывающий холод зимой и постоянные ветры, которые выдували из тебя даже крохотные остатки романтики. Здесь была суровая реальность, и, что греха таить, только служебная нужда и чувство товарищества вынуждали тебя отправляться в этот далекий и суровый край. Космонавтика рождалась из самоотверженного труда рабочих, которые в военной и гражданской форме противостояли стихии, и каждому из них следовало бы

давать звезды Героев, потому что их труд без преувеличения был поистине героическим.

12 февраля 1955 г. было принято решение о строительстве космодрома. Естественно, оно было очень секретным, и эта тайна хранилась до 4 октября 1957 г. настолько тщательно, что о ней не знали даже те, кто работал в ОКБ-1¹¹ С.П. Королёва (ЗиВ, 1982, № 2; 1997, № 1; 2007, № 1).

А мы, московские студенты, догадывались о том, что в этих степях строится что-то необычное. В 1955–1957-х гг. довелось мне в составе первых студенческих отрядов «поднимать целину». На стене медаль «За освоение целинных земель» висит как память о том времени. Однажды отправились мы на грузовике в магазин, что находился в поселке километров за сто от нас. Слух дошел, что там «Малиновое вино» в продаже появилось. В степи сто километров – рядом, и мы отправились в путь напрямик, дороги ведь там сами прокладывали... И каково же было наше удивление, когда нас остановил военный патруль. Пришлось возвращаться.

Через десяток лет я узнал, что задержали нас на границе Байконура. Его строительство «прикрывалось» целиной, считалось, что военные эшелоны, отправлявшиеся в Казахстан, едут осваивать новые земли. Впрочем,

¹¹ Ныне – Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. академика С.П. Королёва.

армейским строителям путь был близок: они только что завершили создание Семипалатинского ядерного полигона, а теперь их перебрасывали на новый полигон – ракетный. О космосе речи еще не шло...

Что же вспоминается о тех днях?

Летом 1955 г. в кабинете академика М.В. Келдыша собрались видные ученые. Первым выступил Михаил Клавдиевич Тихонравов (ЗиВ, 1980, № 5; 1991, № 6; 2000, № 4; 2015, № 3)¹². Он произнес слово «спутник», но особого впечатления на присутствующих оно не произвело. Его восприняли так, будто речь идет о новом научном приборе. Тем более что Тихонравов начал подробно рассказывать об основных конструктивных идеях, о «начинке» этого аппарата, об агрегатах, необходимых для нормальной работы спутника, о том, что научную аппаратуру, помещаемую на объекте, следует стыковать с телеметрией... По реакции присутствующих Тихонравов вдруг понял, что термин «телеметрия» следует пояснить, и он подробно и терпеливо начал объяснять, каким образом информация поступает со спутника на Землю и как она должна расшифровываться. Как это обычно случалось с ним, Тихонравов увлекся, и его сообщение уже стало мало походить на научный доклад, а скорее на фантазирование – по крайней мере, так многим показалось.

«Приземлил» все происходящее академик Иоффе, который припоздал на совещание – он приехал из Ленинграда. Он сразу же обратил внимание на очень конкретные вещи.

– Холодильные установки для столь нежных объектов слишком громозд-



М.К. Тихонравов и С.П. Королёв в Колонном зале Дома союзов после торжественного собрания, посвященного 100-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. 17 сентября 1957 г.

ки, – сказал он, – А вот солнечные батареи – это интересно! Наверное, следует подключить к их созданию ленинградцев и ФИАН.

Келдыш тут же набрал номер телефона Б.М. Вула¹³ из ФИАН. Коротко ввел того в суть дела. Будущий академик среагировал моментально:

– Подключим физиков, которые этим занимаются. Идея, действительно, очень интересная и перспективная...

¹² М.К. Тихонравов (1900–1974) – один из основоположников космонавтики, конструктор ракетно-космической техники, сподвижник и друг С.П. Королёва, доктор технических наук, профессор, Герой Социалистического Труда.

¹³ Бенцион Моисеевич Вул (1903–1985) – ученый-физик, создатель первых отечественных полупроводниковых диодов, транзисторов, солнечных батарей, академик АН СССР, Герой Социалистического Труда.



Академики С.П. Королёв, И.В. Курчатов и М.В. Келдыш. 1956 г.

Келдыш сообщил мнение Вула всем участникам совещания, а потом добавил: «Нам следует работать энергично и нестандартно...»

Уже на третьем искусственном спутнике Земли были установлены солнечные батареи, чье рождение началось с разговора по телефону Келдыша и Вула...

Совещание продолжается. Стенограмма его не велась. В том не было необходимости, потому что на этот раз Келдыш ждал от коллег по Академии не каких-то конкретных решений и предложений (хотя и они высказывались), – ему надо было определить масштабы будущей программы освоения космоса, главные направления исследований. Впрочем, жаль, что не было стенограммы. Участники совещания вспоминают, что идеи многих экспериментов родились именно на этом совещании, – через несколько лет они были реализованы на спутниках Земли, а некоторые

ученые «переквалифицировались» – они ушли из «земных» отраслей в «космические».

Последним выступил на совещании М.В. Келдыш:

– Итоги подводить не буду, – сказал он. – Я не ошибусь, если отмечу: мы пришли к общему выводу, что в развитии исследований со спутников Земли могут внести вклад многие институты, а, следовательно, наша задача – заинтересовать их, а также отдельных ученых в наших программах. Я надеюсь на содействие всех присутствующих.

После совещания Келдыш задержал своих сотрудников:

– Завтра утром необходимо разослать письма академикам и членам-корреспондентам. Мы должны изучить их предложения, а также пригласить всех, кто необходим для создания магнитометра и прибора для изучения космических лучей. – Неожиданно Мстислав Всеволодович улыбнулся. –

В общем, дорогие товарищи, нам придется поработать без отдыха...

– И как долго? – поинтересовался кто-то.

– Для начала годика полтора-два... А потом, наверное, всю жизнь, потому что слишком большое дело начинаем, и трудно сейчас предвидеть все последствия...

В тот же вечер Келдыш и Королёв встретились в Академии наук, чтобы наметить совместную работу на ближайшие месяц – два. Договорились, что осенью можно будет входить в ЦК партии и правительство с конкретными предложениями по созданию научной аппаратуры для спутников Земли. В этом документе уже должны быть конкретные организации и фамилии ученых, которые разрабатывают нужные приборы.

Через 15 лет, когда уже не стало С.П. Королёва, я попросил президента Академии наук СССР М.В. Келдыша рассказать о тех событиях лета 1955 г., когда начала формироваться научная программа исследования космоса.

– Шла нормальная работа, – ответил он, – ну а итоги ее известны...

Келдыш не любил говорить о себе, и только изредка – на космодроме или в Центре дальней космической связи, когда выпадало несколько свободных минут, он вспоминал о прошлом. Однажды мне посчастливилось услышать рассказ о «прологе к спутнику», как он сам выразился. Одну фразу я запомнил на всю жизнь: «Это было прекрасное время, потому что мы были молоды, и даже космос не страшил нас...» В его словах слышалась грусть, и непривычно было видеть Келдыша таким...

Летом 1955 г. многие ученые страны получили письмо. «Как можно использовать космос?» – вопрос некоторых поставил в тупик. И поэтому ответы пришли разные: «Фантастикой не увлекаюсь...», «Думаю, что это

произойдет через несколько десятилетий, и наши дети и внуки смогут сказать точнее...», «Давайте научимся сначала летать в стратосфере...». Но большинство ответов было иными: «Можно провести уникальные эксперименты в разных областях астрономии...», «Бесспорный интерес представит изучение всевозможных частиц и излучений...». «Если в любой отрасли знания открывается возможности проникнуть в новую, действенную область исследований, то это надо обязательно сделать, так как история науки учит, что проникновение в новые области, как правило, и ведет к открытию тех важнейших явлений природы, которые наиболее значительно расширяют пути развития человеческой культуры», – написал академик П.Л. Капица¹⁴.

И хотя ответы были очень пестрыми, а некоторые идеи и предложения выглядели невероятно сложными и почти неосуществимыми, тем не менее, каждый из них помог выработать четкую программу работ в космосе.

В ноябре из Академии наук в ЦК КПСС и Совет Министров СССР ушло письмо, в котором была изложена четкая программа научных исследований в космосе. В январе 1956 г. появилась «Специальная комиссия по объекту «Д», ее возглавил М.В. Келдыш, заместителями были назначены С.П. Королёв и М.К. Тихонравов, ученым секретарем Г.А. Скуридин.

¹⁴ Пётр Леонидович Капица (1894–1984) – ученый в области физики низких температур и сверхсильных магнитных полей, основатель и директор Института физических проблем (ныне носит имя ученого; 1934–1984), один из основателей Московского физико-технического института, входил в состав Специального комитета работ по использованию атомной энергии, лауреат Нобелевской премии, дважды Герой Социалистического Труда.



«Объект Д» – третий советский искусственный спутник Земли: сборка на Заводе экспериментального машиностроения ОКБ-1 (слева) и полет на орбите (рисунок)

«Объект Д» – должен был быть первым искусственным спутником Земли, но стал третьим – тяжелой космической лабораторией, запущенной 15 мая 1958 г., выполнил исследования околоземного космоса в течение месяца.

После полета Юрия Гагарина я начал работать над книгой-интервью с крупнейшими учеными страны. Я спрашивал у них: «Какое влияние на развитие вашей отрасли науки окажет выход человека в космос?» К некоторым из ученых порекомендовал мне обратиться М.В. Келдыш. В частности, среди названных им фамилий были те, кто принимал участие в легендарном уже совещании, где создавалась научная программа для первых спутников Земли. И естественно, ученые с удовольствием вспоминали о первых своих шагах в исследовании дальнего и ближнего космоса. Но больше всего меня поразила их увлеченность будущим: теперь уже свою жизнь они навсегда связали с космосом. Книга «Человек. Земля. Вселенная» после своего выхода пользовалась большой популярностью: космос тогда интересовал всех. Это было прекрасное, а потому неповторимое время!

Я долго искал образ, который смог бы выразить отношение Келдыша к науке. И объяснить, почему он стал слу-

жить именно ей. Однажды он сказал о научном открытии и чувствах, которые испытывает человек, сделавший его: «Это напоминает мне Грига. Он шел полем и услышал, как простая деревенская девушка поет песню на его мелодию. И он понял, что его музыка стала частью ее души... Его творение вошло в народную душу... Вот такая радость овладевает и исследователем, когда он видит, что его открытие преобразует жизнь». Келдыш знал и любил музыку, увлекался живописью (нет, не писал сам, а собирал репродукции и фотографии картин), бывал в театрах, хорошо знал литературу.

С Сергеем Павловичем Королёвым они были не только соратниками, но и близкими друзьями. Келдышу и Королёву обязана наша Родина тем, что мы запустили первый искусственный спутник Земли и первого человека в космос. Не будь этих двух людей, без сомнения, мы так и остались бы вторыми.

Впрочем, как это и случилось, когда 14 января 1966 г. одного из них не стало... Из воспоминаний Н.Л. Тимофеевой:

«За несколько дней до операции, Сергей Павлович приехал в Академию. Он был грустный и просидел у президента очень долго. Когда вышел, не-

С.П. Королёв, космонавт
Г.С. Титов и М.В. Келдыш
в Академии наук СССР.
11 августа 1965 г. ИГМ
им. М.В. Келдыша, Архив РАН



много посидел с нами и сказал, что ему предстоит операция. Чувствовалось, что это его очень тревожит. Через несколько дней он позвонил по телефону Мстиславу Всеволодовичу, но тот отсутствовал. Сергей Павлович попросил передать ему привет и сказать, что он уезжает в больницу, машина уже ждет. Потом позвонил академик В.П. Мишин (ЗиВ, 2002, № 3)¹⁵, находившийся в «Кремлевке» в день операции С.П. Королёва, и тихо-тихо сказал: «С.П. умер». Это было страшно, в это не хотелось верить! Ведь только что он разговаривал с нами по телефону... Я написала записку Мстиславу Всеволодовичу, который проводил заседание в конференц-зале. Записку посмотрел и отложил. Я просто остолбенела: что это он? Продолжает вести заседание! Вдруг он опять взял записку, прочитал и просто рухнул на стул... Встал, остановил докладчика и прочел записку вслух. Все замерли. В зале было тихо, тихо. То, что они слышали, казалось неправдоподобным!»

Наверное, только М.В. Келдыш понимал в эти тяжкие дни, что судьба отечественной космонавтики теперь станет иной.

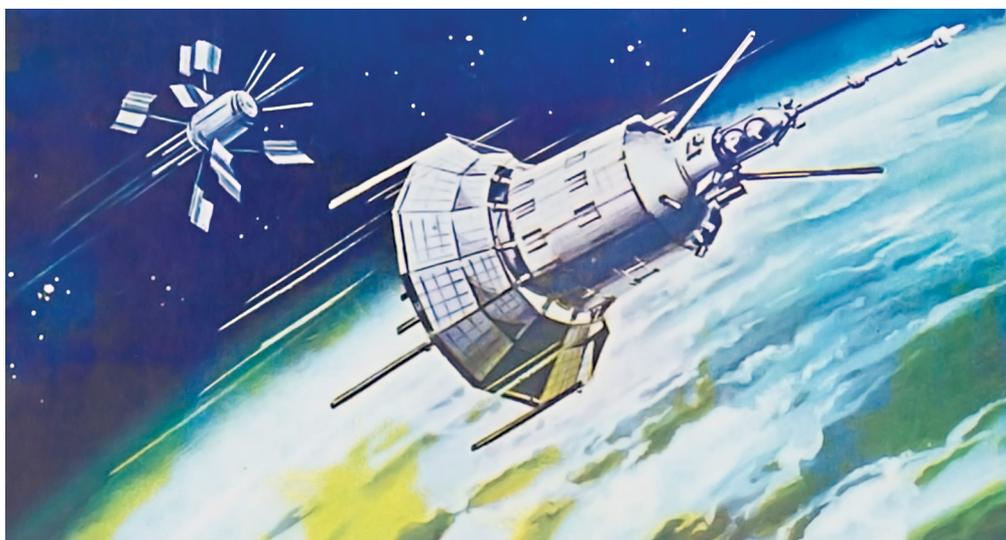
¹⁵ Василий Павлович Мишин (1917–2001) – конструктор ракетно-космической техники, заместитель главного конструктора и соратник С.П. Королёва, руководитель ОКБ-1 (1966–1974; ныне – РКК «Энергия» им. С.П. Королёва), академик АН СССР, Герой Социалистического Труда.

...Мне удастся взять большое интервью у президента АН СССР. В нем впервые Мстислав Всеволодович рассказал о том, что было «за семью печатями». И в то же время он четко представил то будущее, которое открывает нам космонавтика и наука о космосе. Вот фрагмент интервью:

«... – За последнее время в нашей стране были запущены спутники и ракеты, с помощью которых проводились различные физические эксперименты в космосе. Как вы оцениваете результаты этих исследований?»

– 4 октября 1957 года советская наука и техника открыли путь в космос. Вышел на орбиту первый в мире искусственный спутник Земли. Начался исторический этап – планомерное исследование космического пространства. Новой важной вехой на этом пути явились полеты советских ракет в сторону Луны, при помощи которых было произведено фотографирование обратной стороны Луны и доказано отсутствие у нее существенного магнитного поля.

Спутники Земли и автоматические межпланетные станции прочно вошли в арсенал технических средств для исследования космического пространства, а также планет Солнечной системы. Все



«Электронны» исследуют космос. Художник А.К. Соколов

это привело к появлению новой науки о космосе – космической физики.

В настоящее время получены важные сведения о структуре верхних слоев атмосферы, о зависимости плотности и давления атмосферы от деятельности Солнца. Была открыта так называемая «ионизированная геокорона», простирающаяся на расстояние до 20 тысяч километров. В межпланетном пространстве впервые экспериментально зарегистрированы потоки корпускул, выбрасываемых Солнцем, получены данные о структуре магнитного поля Земли на расстоянии нескольких земных радиусов, построена планетарная карта распределения интенсивности космического излучения на высотах 220–300 км и обнаружена область аномально высокой интенсивности излучений в районе Бразильской магнитной аномалии, и многое другое.

Одним из наиболее важных достижений в изучении околоземного космического пространства является открытие радиационных поясов Земли. Они оказались очень сложным образованием, как по своей природе, так и по своему строе-

нию. До настоящего времени неизвестен механизм их возникновения¹⁶. Целый комплекс сложных физических процессов, которым они обязаны своим существованием, требуют постановки новых опытов, особенностью которых является проведение одновременных измерений в различных точках околоземного космического пространства.

Такая постановка задачи потребовала создания специальной космической системы, состоящей из нескольких спутников, выводимых на существенно

¹⁶ Существует теория механизма их образования: А.М. Гальпер «Радиационный пояс Земли» // СОЖ, № 6, 1999, С. 75–81; С.Н. Кузнецов, Б.Ю. Юшков «О границе неадиабатического движения заряженных частиц в поле магнитного диполя» // Физика плазмы, Т. 28, № 4, 2002, С. 375–383; M.D. Zinkina The “Meteor-3M” Satellite № 1 Observations of Electron Precipitation Events to Outer Terrestrial Atmosphere for 2002–2005 // The 40th COSPAR Scientific Assembly 2–10 August 2014, Program Book, P. 233; Ю.И. Логачёв «Радиационные пояса Земли: открытие и первые исследования» // Природа, № 12, 2017.

разные орбиты. Космическая система «Электрон» является первой такой системой.

– Слова «спутники Земли», «космические ракеты» – все чаще звучат в нашей жизни. С каждым днем их становится все больше. Что они дадут науке, нашей стране?

– Исследования на спутниках и космических ракетах открывают самые большие перспективы в изучении околоземного пространства, планет солнечной системы и далеких глубин Вселенной. Создание спутников – астрономических обсерваторий позволит получить новые сведения о планетах, Солнце, звездах и туманностях, откроет новые возможности в астрофизике. Космические ракеты доставят автоматические научные станции на Луну и ближайшие планеты Солнечной системы и принесут новые сведения об их строении, физических свойствах. Открывается возможность изучения форм жизни в новых мирах.

Уже сейчас применение спутников открывает большие перспективы для народного хозяйства. По-иному будут решаться задачи прогноза погоды, состояния ионосферы, службы Солнца. Создание спутников-ретрансляторов и спутников связи приведет к коренному улучшению радио- и телевизионных передач на всем земном шаре. Это будут только первые шаги в этом направлении...

– А роль пилотируемого космоса?

– 12 апреля 1961 года на орбиту был выведен корабль «Восток», пилотируемый первым в мире летчиком-космонавтом Юрием Алексеевичем Гагариным. Продолжением подвига Ю.А. Гагарина явился суточный полет летчика-космонавта Г.С. Титова. П.Р. Попович и А.Г. Николаев, а затем В.Ф. Быковский и В.В. Терешкова-Николаева на космических кораблях «Восток» совершили первые в мире групповые полеты.

Космический корабль «Восход» существенно отличается от серии кораблей-спутников «Восток». Впервые космонавты совершали полеты без скафандров и без системы катапультирования. Для этого было необходимо обеспечить прежде всего герметичность корабля, ибо малейшее ее нарушение повлекло бы за собой гибель экипажа. Посадка корабля требовала надежности работы всех систем в момент приземления. Была также обеспечена возможность посадки корабля на воду и приняты все необходимые меры по его непотопляемости. Для обеспечения надежности спуска корабля с орбиты была установлена вторая резервная тормозная установка.

Первый в мире коллективный полет космонавтов на корабле «Восход» открывает новую страницу в истории космонавтики. Значение этого полета чрезвычайно велико. Впервые ученые и врач могли лично проводить наблюдения и научные измерения непосредственно на борту корабля. Особенно это будет важно при дальнейших космических полетах, скажем, к Луне и планетам...

– Мстислав Всеволодович, а как вы оцениваете полет космического корабля «Восход-2», который пилотировали Павел Беляев и Алексей Леонов?

– Осуществление проведенного эксперимента по выходу человека в космос – одно из самых замечательных свершений на пути освоения космоса. Это событие знаменует собой начало качественно нового этапа в исследовании Вселенной. Теперь открываются новые грандиозные перспективы создания орбитальных станций, стыковки космических кораблей на орбите, проведения астрономических и геофизических исследований в космосе. В недалеком будущем на орбите вокруг Земли можно будет создать космический научно-исследовательский



Г.Н. Бабакин и М.В. Келдыш. Конец 1960-х гг.

институт, в котором смогут работать ученые самых различных специальностей. Результаты, полученные при полете космического корабля «Восход-2», являются важнейшим шагом на пути осуществления полетов к Луне и другим небесным телам...»

Приведу эпизод из истории космонавтики.

Крохотный зал Центра дальней космической связи под Евпаторией. Большая комната, перегороденная пополам диваном. С той стороны пульта управления, за которыми сидят операторы, тощая фигура Георгия Николаевича Бабакина – главного конструктора автоматических межпланетных станций (ЗиВ, 2004, № 6)¹⁷, мечущаяся между пультами, и академик Келдыш, отдыхающий на диване. С этой стороны – вся остальная публика: члены Госкомиссии, журналисты. Для Келдыша это была бессонная ночь, он вылетел из Москвы уже за полночь, а на рассвете (Венера – Утренняя звезда!) уже был в Центре дальней космической

связи. Мне показалось, что Мстислав Всеволодович заснул... Оператор сообщает данные о ходе полета аппарата в атмосфере Венеры – температура, давление, высота над поверхностью... Бабакин мечется вдоль пультов... Келдыш сидит с закрытыми глазами... Напряжение страшное: все-таки впервые станция пытается осуществить посадку на поверхность чужой планеты... Наконец, приходит последнее сообщение, связь прерывается... «Сели!» – радостно кричит Бабакин. Зал взрывается аплодисментами... Келдыш открывает глаза, говорит: «Не будем торопиться. Мне кажется, до поверхности еще далеко – там совсем иные условия, чем мы представляем...» Но ликует не только этот зал, но и «Москва», где принимали данные о полете «Венеры», и голос Келдыша не услышан. Ему так и не удалось доказать «наверху», что торопиться не следует. Официальное Сообщение ТАСС объявило «об очередной победе в космосе – посадке на планету Венера...» Через пару недель в кабинете главного конструктора Г.Н. Бабакина шло совещание по итогам полета автоматической станции. Было уже ясно, что реальное принято за желаемое, аппарат раздавлен во время спуска – давления на Венере совсем иные, чем представляли астрономы... Бабакин снял трубку «кремлевки» и набрал номер Келдыша. Он доложил о выводах их комиссии. В ответ услышал: «Я ни секунды в этом не сомневался... Порадовались немного, а теперь пора за работу – я верю, что вы посадите аппарат на поверхность!» И это вскоре случилось...

У меня в кабинете висит фотография межпланетной станции «Венера» с автографами Келдыша и Бабакина. Помню, они расписывались на ней с удовольствием...

Продолжение следует

¹⁷ Г.Н. Бабакин (1914–1971) – ученый в области механики и процессов управления, конструктор межконтинентальной крылатой ракеты «Буря» и зенитно-ракетных комплексов, главный конструктор КБ им. С.А. Лавочкина (1965–1971), создатель АМС «Луна-9» – «Луна-17», «Венера-4» – «Венера-8», «Марс-2» – «Марс-7», член-корреспондент АН СССР, Герой Социалистического Труда.

ПИОНЕРЫ РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ.

Документы личных фондов К.Э. Циолковского в Архиве РАН

СЕЛИВАНОВА Ольга Владимировна,

кандидат исторических наук,

Архив РАН

DOI: 10.7868/50044394821010084

*«Сначала неизбежно идут: мысль, фантазия,
сказка. За ними шествует научный расчет,
и уже в конце концов исполнение венчает мысль»*

К.Э. Циолковский

Архив Российской академии наук, основанный в 1728 г., является одним из старейших архивохранилищ наследия деятелей науки и техники. В состав личных фондов ученых входят, прежде всего, научные материалы: рукописи изданных и неизданных научных трудов, конспекты, чертежи, графики, рисунки, учебники и лекционные курсы, подготовительные материалы к научным трудам. Следующая группа – это биографические материалы, официальные (дипломы, паспорта, удостоверения, свидетельства, справки, автобиографии) и неофициальные (дневники, воспоминания); документы, сформировавшиеся в результате служебной и общественной деятельности ученых; фотографии; личная переписка. Документальное наследие ученых



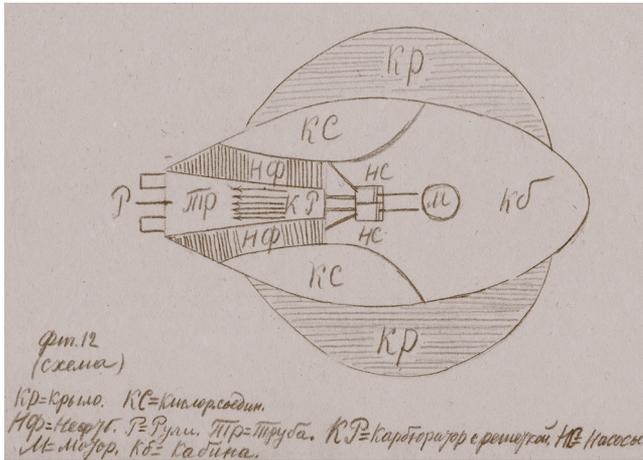
К.Э. Циолковский – учитель
Калужского епархиального
женского училища.
1908/1909 учебный год. АРАН.
Ф. 555. Оп. 2. Д. 120. Л. 2

отражает различные стороны их жизни и деятельности, предысторию научных открытий, показывает их творческую лабораторию, служа весомым дополнением к официальной академической документации.

История освоения космоса также нашла отражение в Архиве РАН (АРАН), одним из крупнейших архивохранилищ документов для изучения истории и предыстории космонавтики и личного вклада ученых и конструкторов в освоение

космоса. Для исследователей открыт читальный зал Архива РАН, а для просмотра описей фондов и предварительного заказа дел можно воспользоваться базой данных АРАН¹.

¹ <http://isaran.ru/?q=ru/funds&str=%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82>



Чертеж к статье К.Э. Циолковского «Дирижабль, стратоплан, и звездолет, как три ступени величайших советских достижений, как апофеоз индустрии». 1932 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 1. Д. 203. Л. 36

В первую часть обзора включены документы основоположников космонавтики Константина Эдуардовича Циолковского (1857–1935; ЗиВ, 1972, № 5; 1979, № 6; 1982, № 5; 1988, № 1; 2007, № 5; 2015, № 4; 2017, № 1), АРАН, фонд 555 (1862–1988 гг., 2467 единиц хранения) и Фридриха Артуровича Цандера (1887–1933; ЗиВ, 1988, № 1; 1998, № 1; 2007, № 6; 2012, № 6), АРАН, фонд 573 (1866–1977 гг., 464 единицы хранения).

На первом месте, конечно, стоит фонд К.Э. Циолковского. Несмотря на то, что Циолковский не получил систематического образования (помешала глухота с десятилетнего возраста) и всю жизнь занимался самообразованием, он считается основоположником теоретической космонавтики и научного космизма. Энциклопедист, изобретатель ракетодинамики, аэродинамики, теории самолета и дирижабля, писатель-фантаст, педагог, популяризатор науки – все это нашло отражение в документах личного фонда К.Э. Циолковского. Постановлением Президиума

ЦИК и СНК СССР «Об увековечении памяти К.Э. Циолковского» (1935) было решено большую часть архива ученого передать из Калуги в Москву, а Воздушному Гражданскому Флоту предложено издать труды ученого. В 1949 г. документы были переданы в Архив АН СССР.

Среди научных материалов, объединенных в описи № 1, рукописи трудов ученого, например,

«Аэростат и аэроплан» (1905–1908), «Не может погаснуть жизнь» (1921), «Космический корабль» (1924–1926), «Завоевание солнечной системы. [Научная фантазия]» (1928), «Возможно ли посещение планет» (1930), «Дирижабль, стратоплан, и звездолет, как три ступени величайших советских достижений, как апофеоз индустрии» (1932–1933), «Основы построения газовых моторов и летательных приборов» (1934–1935). В эту опись включены доклады и лекции, чертежи и рисунки («Скорый трамвайный вагон [для целей звездоплавания]», «Межпланетные путешествия»), формулы, таблицы и вычисления (например, относящиеся к вопросу о межпланетных сообщениях [«Вопрос о вечном блаженстве»], «Атмосфера – ракета – труба», «Восходящее ускоренное движение ракетоплана»). В сохранившейся и в автографе, и в машинописи работе «Свободное пространство» 1883 г. К.Э. Циолковский впервые описал космический корабль, а в статье 1895 г. «Грезы о Земле и небе и эффекты всемирного тяготения» высказал возможность создания искусственного спутника Земли.

К.Э. Циолковский увлекался и философскими исканиями, развивая так называемое учение монизма («панпсихизма»), признающего единое начало

при всем разнообразии объектов, единство мира. В его архиве сохранились работы на религиозные и философские темы: «Монизм вселенной», «Новая этика. [Из монизма]», «Теорема жизни. [Как дополнение и пояснение к монизму]», «Мои идеи монизма в 1924 г.». Возможно, под влиянием революционных событий 1917 г. ученый опубликовал ряд произведений утопического характера, изображая общество, при создании которого науке отводилась важнейшая роль: «Идеальный строй жизни», «Общественный строй», «Миражи будущего общественного устройства». Отложились в АРАН и его научно-фантастические произведения: «Свободное пространство» (1883, статья опубликована в 1954 г.), «На Луне» (1893), «Грезы о Земле и небе и эффекты всемирного тяготения» (1895), фрагмент научно-популярной повести «В двухтысячном году [К ракете]» (1913), впоследствии развернутой в книге «Вне Земли» (1916–1920), «На Весте. [Условия жизни в иных мирах]» (1930).

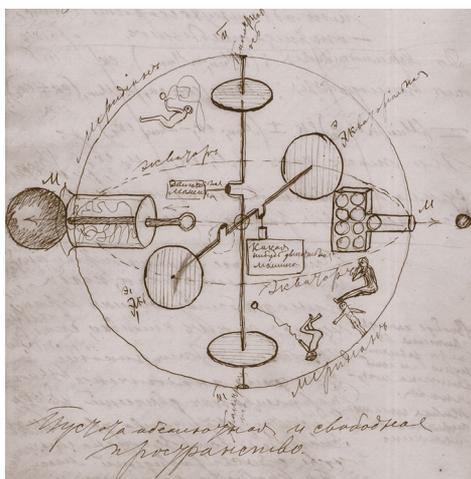


Рисунок к статье К.Э. Циолковского «Свободное пространство». 1883 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 1. Д. 31. Л. 104

К.Э. Циолковский был одним из основоположников ракетодинамики – теории реактивного движения. В его фонде сохранились на эту тему несколько работ по теоретическим основам

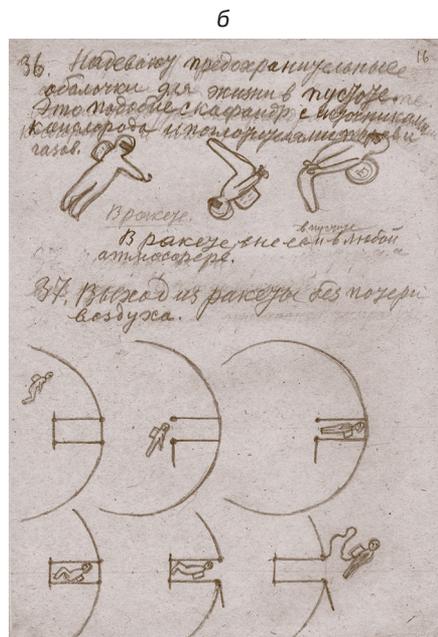
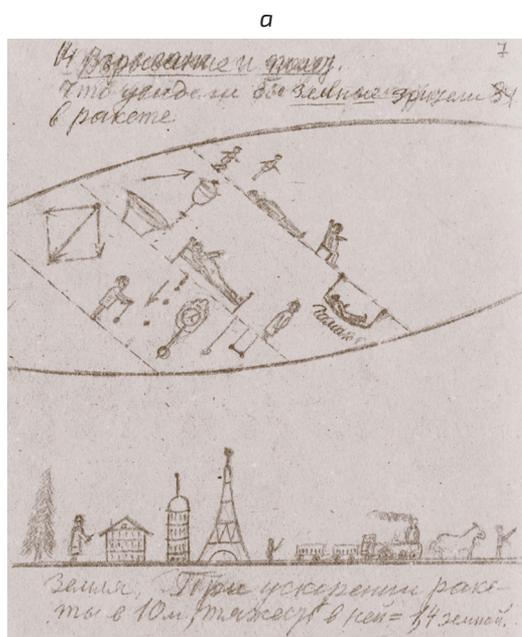
Одна из таблиц К.Э. Циолковского, относящихся к движению ракеты. 1935 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 1. Д. 120. Л. 2

Время. Относительное движение ракеты под влиянием ускорения в 110 м/сек. в 1 сек. Относ. масс. = 11. Абс. ускор. = 100 м.

Время в сек.	1	2	3	4	5	6	7	8
Скор. в м/сек.	100	200	300	400	500	600	700	800
Расст. от таб. Зем. в м/сек.	50	200	450	800	1250	1800	2450	3200
Масса ракеты	0,9	0,8			0,9		0,8	0,72
Время в секундах	9	70	15	20	25	30	40	50
Скор. в м/сек.	900	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000
Расст. от Зем. в м/сек.	4050	5000	11250	20000	37500	45000	80000	125000
Масса ракеты	0,63	0,5	0,26	0,062	0,019	0,0019	0,00019	0,000019
Время в секундах	60	70	80	90	100	15	20	25
Скор. в м/сек.	6000	7000	8000	9000	10000	15000	20000	25000
Полный м/сек.	180000	245000	320000	405000	500000	1125000	2000000	3750000
Масса ракеты	0,0000049				0,0000021			

Закрывается — по Берсеру. Скор (500 м/сек) в 10⁶ раз больше & 10⁶ раз меньше
 как она в 10⁶ раз больше от скорости света в 10⁶ раз больше, а 10⁶ раз
 в 1 сек. при скорости передвижения удаленности от поверхности Земли в 10⁶ раз больше
 (Математика) м/сек. в 10⁶ раз больше

www.isaran.ru | АРАН. Ф. 555. Оп. 1. Д. 120.



Рисунки к статье К.Э. Циолковского «Альбом космических путешествий». 1933 г.:
а – Взрывание и полет. Что увидели бы земные зрители в ракете; б – Выход из ракеты
без потери воздуха (выход космонавта в открытый космос). АРАН. Ф. 555, Оп. 1. Д. 84. Л. 7, 16

космонавтики. Прежде всего это фундаментальный труд «Исследование мировых пространств реактивными приборами» с таблицами и формулами, в которой ученый первым предложил использовать ракету для межпланетных полетов и исследования космоса, а также дал описание конструкции ракеты и ракетного двигателя на жидком топливе, обосновал необходимость создания ракеты обтекаемой формы и впервые опубликовал формулу движения ракеты, сейчас известную как формула Циолковского (1903, 1911–1912, 1914, 1926). По этой же тематике сохранились работы «Космическая ракета: опытная подготовка» (1927) и «Космические ракетные поезда (с биографией К.Э. Циолковского С.В. Бессонова)» (1929).

Работы ученого по проблемам, связанным с осуществлением космиче-

ского полета и реализацией программы заселения внеземного пространства, в 1930–1935 гг., впервые в его творчестве, стали доминировать над его занятиями другими вопросами. Эти исследования разворачивались на фоне интенсивной работы К.Э. Циолковского над так называемым «Альбомом космических путешествий», который он создавал в 1933 г. для съемочной группы научно-фантастического кинофильма «Космический рейс» (режиссер В.Н. Журавлёв) о полете людей в космос². Сценарий фильма был напи-

² По сюжету действие фильма происходит в 1946 г., академик Павел Иванович Седых создает космический ракетоплан «Иосиф Сталин» и, несмотря на несколько предшествовавших неудачных опытов полетов, отправляется на нем на Луну со спутниками Мариной и юным изобретателем Андреем Орловым.

сан при участии и научном консультировании Циолковского. В ходе работы он сделал для съемочной группы серию поясняющих иллюстраций, в том числе 30 чертежей ракетоплана, а также подготовил множество замечаний и уточнений по сценарию с учетом научных знаний и законов природы, в т. ч. невесомости. Эти рисунки (например, земная ракета с вложенной в нее космической, подъем ракеты в гору, старт ракеты в горах, жизнь на борту стартующей ракеты с точки зрения земного наблюдателя и космонавтов, ощущения космонавтов в невесомости, наведение порядка и прием пищи на борту, предохранительные оболочки для жизни в пустоте, выход из ракеты без потери воздуха, игры на привязи без потери воздуха) были объединены в «Альбом космических путешествий», изданный в 1947 г. Содержание «Альбома» повторяло многие труды ученого прежних лет, но по форме это было концентрированное и образное выражение его программы межпланетных путешествий и расселения людей за пределами Земли в процессе освоения космоса. «Альбом космических путешествий» может по праву считаться одним из наиболее популярных трудов К.Э. Циолковского по космонавтике последних лет его жизни.

Отдельной описью (№ 1А) собраны документы по дирижаблю (или аэростату), разработке которого К.Э. Циолковский посвятил значительную часть жизни, увлекшись этой идеей еще

Путешественники прилуняются на обратной стороне Луны, затем перебираются на видимую сторону и подают сигнал (слова СССР), который успешно принимают с помощью телескопов на Земле. Заканчивается фильм возвращением путешественников на Землю. «Космический рейс» был снят киностудией «Мосфильм» в 1935 г. (премьера состоялась 21 января 1936 г.).



К.Э. Циолковский. 1925 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 2. Д. 125. Л. 5

в 28 лет: это таблицы расчетов, рисунки, предварительный проект, геометрический расчет оболочки, чертежи оболочки, форм поперечного сечения в месте крепления, оперения и общих видов к техническому проекту корабля ДЦ-12 и др.

Среди биографических документов (опись № 2) отложились не только материалы, освещающие различные стороны жизненного пути ученого, но и документы о Доме-музее К.Э. Циолковского в Калуге за различные годы, материалы родственников, Комиссии по разбору и изданию трудов К.Э. Циолковского. Так, интересны автобиографии К.Э. Циолковского, записки «Из моей жизни»; сохранились анкеты, документы об избрании членом различных обществ, поздравления, приглашения на заседания, библиографические заметки, тетради с записями посетителей, переписка по хозяйственным вопросам, записные книжки, послужной



К.Э. Циолковский среди моделей своего дирижабля. 1913 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 2. Д. 124. Л. 2

список, завещание, описание получения академического пайка («История академического пайка») в 1922 г., письмо К.Э. Циолковского в Осоавиахим³ с благодарностью за присланный велосипед, статьи, воспоминания об ученом его знакомых, акт о разрушениях в Доме-музее К.Э. Циолковского, произведенных немецкими фашистами, отчет инженера Б.Н. Воробьева⁴ о мерах по восстановлению музея и др. Сохрани-

³ Общество содействия обороне, авиационному и химическому строительству (Осоавиахим) – советская общественно-политическая оборонная организация, существовавшая в 1927–1948 гг.

⁴ Борис Никитович Воробьев (1882–1965) – историк техники, кандидат технических наук, редактор журналов «Вестник воздухоплавания» и «Мотор». Один из главных биографов К.Э. Циолковского, знакомый с ним с 1914 г., он немало сделал для сохранения архивного наследия ученого.

лось большое количество фотографий К.Э. Циолковского: фотопортреты, фотографии во время работы, среди моделей своего дирижабля, в мастерской, во время велосипедных прогулок и в загородном саду, в «светелке» (так ученый называл свой рабочий кабинет), во время беседы с журналистами, с юными авиамоделистами, в кругу детей подросткового санатория «Сосновый бор» в Калуге, с родными.

В опись № 3 вошли документы, касающиеся деятельности К.Э. Циолковского: переписка с различными обществами, организациями по публикации трудов, вопросам постройки дирижабля (например, с промышленными и торговыми организациями о поставке металлов, с Главным управлением Военно-воздушного флота, с Ассоциацией натуралистов-самоучек (АССНАТ)); протоколы различных заседаний, стенограммы совещаний в ВСНХ СССР о возможности и целесообразности построения дирижабля; письмо К.Б. Фритше – президента Корпорации металлических воздушных кораблей (США) К.Э. Циолковскому; переписка ученого с Московской кинофабрикой о постановке научно-фантастического фильма «Космический рейс»; описание изобретения «Гигиенические коньки», не нарушающие кровообращения; переписка с Комитетом по делам изобретений ВСНХ СССР о выдаче патента; материалы по различным съездам, конференциям.

Несмотря на то, что многие современники считали ученого чудаком и не понимали его идей, все же находилось и немало последователей, интересовавшихся его трудами, о чем свидетельствует обширная переписка (опись № 4, 1019 дел). Помимо профессоров различных училищ и институтов, учителей, студентов, школьников, инженеров, среди его корреспондентов были такие исследователи



К.Э. Циолковский в кругу детей подросткового санатория «Сосновый бор» в Калуге. 1927 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 2. Д. 146. Л. 3

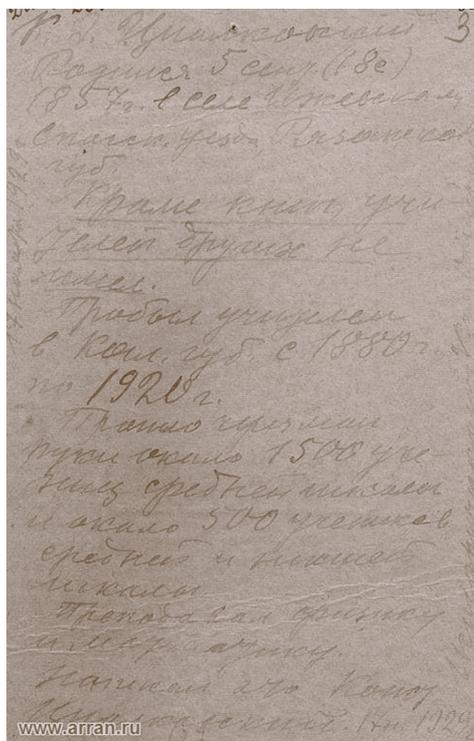


Кадр кинофильма «Космический рейс». Режиссер В.Н. Журавлёв, консультант К.Э. Циолковский. 1936 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 2. Д. 157а. Л. 25



К.Э. Циолковский. 1927 г.

На обороте фотографии – биографические сведения, сделанные рукой Циолковского 17 ноября 1929 г. АРАН. Ф. 555. Оп. 2. Д. 127. Л. 3



и популяризаторы науки, как Г.Ф. Бураго, Л. Вилли, Я.И. Линцбах, Г.Э. Лангемак, Г. Оберт, Н.А. Рынин, В.В. Рюмин, В.А. Сытин, К.К. Федяевский, И.П. Фортиков, Ф.А. Цандер, А.Л. Чижевский и др. Сохранились, например, письма от 15-летнего В.П. Глушко, будущего двигателя и одного из преемников С.П. Королёва. Интересна подборка писем К.Э. Циолковскому от очевидцев падения болида в 1934 г.⁵

В опись № 5 вошли труды других лиц, преимущественно о К.Э. Циолковском и его трудах (рукописи

и машинописные варианты). Опись № 6 содержит печатные издания трудов других лиц, часть из них собрана самим К.Э. Циолковским (на многих имеются дарственные надписи), труды Я.И. Перельмана, Н.А. Рынина, подборка журналов «Вестник знания», «Известия русского общества любителей мироведения», «La vie universelle. Bulletin trimestriel de l'Association Internationale Biocosmique», «Die Rakete» и др., в том числе дореволюционных (например, «Воздухоплавание», 1883–1884).

Опись № 6А содержит печатные варианты трудов К.Э. Циолковского, начиная со статьи 1890 г. «Устройство летательного аппарата насекомых и птиц и способы их полета» и до исследования «Жизнь в межзвездной сфере», изданного посмертно, в 1964 г. Сюда же вошли работы ученого с дарственными надписями, собранные

⁵ Сам К.Э. Циолковский не наблюдал это явление и обратился к читателям газеты «Известия» с заметкой «Кто видел болид?». В Архиве РАН сохранилось более 200 писем с ответами, зарисовками и описаниями, на основе которых ученый подготовил статью «О болиде 14 мая 1934 г., виденном в Московской области».

В.В. Асоновым, копии титульных листов печатных изданий трудов К.Э. Циолковского и работ, включенных в Каталог Библиотеки Конгресса США, библиография его трудов.

В последнюю, седьмую опись вошли документы о подготовке к изданию трудов К.Э. Циолковского. Это машинописные копии его работ, заключения, замечания и отзывы о его трудах, переписка Комиссии Аэрофлота по изданию трудов К.Э. Циолковского с учеными о рецензировании его работ (с профес-

сором Н.А. Гладковым и членом-корреспондентом АН СССР А.И. Опариным – по биологии; с профессором Б.М. Земским – по аэродинамике; с профессором Н.А. Рыниным – по реактивным летательным аппаратам и межпланетным путешествиям; с профессором В.А. Семёновым – по дирижаблестроению; с инженером М.К. Тихонравовым – по реактивным летательным аппаратам).

Продолжение следует



naukapublishers.ru

ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожаный 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

реклама

EARTH & UNIVERSE

1 (337), 2021

January–February

TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Konstantin A. POSTNOV, Anatoly M. CHEREPASHCHUK Black Holes, Singularities, and the Galaxy Center	5
Mikhail I. PANASYUK Fast And Very Energetic	23
Artem A. SYSOEV, Dmitry I. IUDIN Phenomena of Atmospheric Electricity	46
XXI CENTURY COSMONAUTICS	
Igor A. LISSOV Moon Princess Sends Her Gifts	59
OBSERVATORIES, INSTITUTES	
Dmitry O. KUDRYAVTSEV, Iosif I. ROMANUK, Evgeny A. SEMENKO Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences as Seen by Astronomers	74
IN MEMORIAM	
Rafail L. Aptekar (27.09.1936–29.12.2020)	85
PEOPLE OF SCIENCE	
Vladimir S. GUBAREV Three Stars of a Hero: Knowledge and Passions	86
HISTORY OF SCIENCE	
Olga V. SELIVANOVA Rocket Pioneers. Documents from Private Collection of Konstantin Tsiolkovsky, Archive of the Russian Academy of Sciences	101
Table of Content and Selected Abstracts	110

Front page: Red sprite lightning over Kununurra, Western Australia.
Image Credit & Copyright: Ben Broady

EARTH & UNIVERSE

1 (337), 2021

January–February

Black Holes, Singularities, and the Galactic Center

Konstantin A. POSTNOV, Anatoly M. CHEREPASHCHUK

Sternberg Astronomical Institute, M. V. Lomonosov Moscow State University

DOI: 10.7868/S0044394821010011

This is the second year in a row when the most prestigious scientific Nobel prize is awarded for theoretical research in the field of gravity and cosmology and high quality astronomical observations. In 2019, J. Peebles won the prize for the achievements in physical cosmology, and astronomers M. Mayor and D. Queloz were awarded the prize for the discovery of the extrasolar planet near a solar-type star. In 2020, half of the Nobel Prize in physics went to the mathematician Roger Penrose “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”. The second half was awarded to the astronomers Andrea Ghez and Reinhard Genzel – “for the discovery of a supermassive compact object at the center of our Galaxy”. In this article we review the historical development of cosmological studies and the importance of the discoveries that resulted in the Nobel Prize awards.

Fast And Very Energetic

Mikhail I. PANASYUK

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University

DOI: 10.7868/S0044394821010023

Transient energetic events, which are covered in the paper, include Terrestrial Gamma-Flashes (TGFs), several types of Transient Luminous Events (TLEs), Fast Thunderstorm Ground Enhancements (FTGEs). They emerge in the lower as well as in the upper layers of the atmosphere, up to mesospheric heights (about tens of kilometres) as transitory fluxes of electrons, gamma-photons, and neutrons and optical-rays bursts, from ultraviolet to infrared. One of the possible models explaining them includes avalanches of sub-relativistic and relativistic electrons as a key element. They might be generated as a result of fast changes of the electric fields in the atmosphere during thunderstorms (‘down-up’ model). However, one can suggest that electrons of lower energies might precipitate from Earth radiation belts into the atmosphere (‘up-down’ model respectively). Electron avalanches from below together with the electron beams coming from above can explain the whole set of phenomena with large energy release in the lower and upper atmosphere. It is possible that all of them exist on a similar timescale. We suggest that similar mechanism can explain the emergence of transient gamma-ray avalanches under the thunderclouds (FTGEs). We provide experimental arguments in support of these models, discuss several problems and further directions for experimental research.

Phenomena of Atmospheric Electricity

Artem A. SYSOEV^{1, 2}, Dmitry I. IUDIN^{1, 2, 3}

¹ *Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences*

² *Privolzhsky Research Medical University*

³ *National Research University Higher School of Economics*

DOI: 10.7868/S0044394821010035

We present the basics of atmospheric electricity and, in particular, the diversity of the forms, which lightning can take, along with the main questions, research methods, and the importance of this field of science. We discuss briefly possible reasons, underlying the existence of many types of atmospheric discharges.

Индекс 70336

Земля и Вселенная, 1/2021

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/

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 18.12.2020 г. Подписано к печати 16.02.2021 г.
Дата выхода в свет 28.02.2021 г. Формат 70 × 100¹/₁₆
Цифровая печать Усл.печ.л. 9.75 Уч.-изд.л. 10.0 Бум.л. 3.75
Тираж 1000 экз. Зак. 46 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

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



- 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

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



- ◆ Удобное месторасположение
- ◆ Тиражи от 20 экземпляров

- 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

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



ЕЩЕ БОЛЬШЕ КНИГ И БОЛЬШЕ СКИДОК

ДО 80%

акция распространяется в сети магазинов "Академкнига"
и в интернет-магазине naukabooks.ru

условия акций на сайте naukabooks.ru