

**ЗЕМЛЯ** №6 (354)  
НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ, 2023

астрономия  
геофизика  
космонавтика

**И  
ВСЕЛЕННАЯ**

ISSN 0044-3948



**Наблюдение Солнца  
с близких расстояний  
Космическая погода  
и железные дороги  
Космос как природная  
плазменная лаборатория**

ТАНЦУЮЩИЕ СИЯНИЯ

ЗАРЯЖЕННАЯ ПЫЛЬ НА ЛУНЕ

ТЕМНОЕ И СПОКОЙНОЕ НЕБО



# НАУКА

— 1727 —

## ПОДПИШИТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»

печатные и электронные версии

### В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ NAUKABOOKS.RU

- ⇒ Зайдите на сайт.
- ⇒ Выберите журнал.
- ⇒ Укажите контактные данные получателя.
- ⇒ Оплатите заказ онлайн.

Отдельные номера журналов можно купить  
в магазине «Академкнига» по адресу:  
г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.



### ПО E-MAIL И ТЕЛЕФОНУ

[journals@naukapublishers.ru](mailto:journals@naukapublishers.ru) или +7(495) 276-77-35

Сообщите, на какие журналы вы хотите подписаться, а также  
свои контактные данные. Менеджер поможет оформить подписку.

### ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА



Почта России [podpiska.pochta.ru](http://podpiska.pochta.ru)  
Урал-Пресс [ural-press.ru](http://ural-press.ru)  
Пресса России [pressa-rf.ru](http://pressa-rf.ru)  
ПрессИнформ [presskiosk.ru](http://presskiosk.ru)  
Ивис [ivis.ru](http://ivis.ru) НЭБ [elibrary.ru](http://elibrary.ru)

На странице журнала  
размещена информация  
о его стоимости и условиях  
доставки

Обязательно проверьте,  
что правильно указали  
контактные данные  
получателя

# ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№6 (354)

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ, 2023

ISSN 0044-3948

астрономия  
геофизика  
космонавтика

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   |
| ЗЕЛЕНЬ Л.М., КУЗНЕЦОВ В.Д. Наблюдение Солнца с близких расстояний  | 7   |
| ПИЛИПЕНКО В.А., ГВИШИАНИ А.Д., СОЛОВЬЁВ А.А., РОЗЕНБЕРГ И.Н. Космическая погода и железные дороги  | 22  |
| ПУЛИНЕЦ С.А., ВЕДЕШИН Л.А. Космос как природная плазменная лаборатория   | 35  |
| САХАРОВ Я.А. Танцующие сияния  | 54  |
| СЕЛЕМИР В.Д., ТРЕНЬКИН А.А. Магнитосфера Земли в лаборатории: экспериментальное и расчетное моделирование электромагнитных процессов и их влияния на наземную инфраструктуру | 60  |
| МОРОЗОВА Т.И. Заряженная пыль на Луне  | 76  |
| <b>Гипотезы, дискуссии, предложения</b>  |     |
| ОЖЕРЕДОВ В.А. По стопам Чижевского: влияние солнечной активности на агрессивность коммуникации в Интернете   | 82  |
| ШУСТОВ Б.М. Темное и спокойное небо  | 90  |
| <b>Литературный космос</b>   |     |
| СИНЕЛЬНИКОВ М.И. Стихи   | 101 |
| Премия им. А.Р. Беляева журналу «Земля и Вселенная»  | 102 |
| <b>In memoriam</b>   |     |
| Михаил Яковлевич МАРОВ (28.07.1933–30.11.2023)   | 105 |
| Александр Леонидович ГОЛОВАНОВ (25.05.1958–18.12.2023)   | 107 |
| Указатель статей и заметок, опубликованных в 2023 году   | 109 |
| Table of Content   | 111 |

**На обложке:** Териберка,  
Мурманская обл.  
Фото: Стребелев Анатолий,  
Aurora Association Russia

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. ЗЕЛЕНЬИЙ,  
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,  
член-корр. РАН  
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,  
член-корр. РАН  
К.А. ПОСТНОВ,  
доктор физ.-мат. наук  
М.В. РОДКИН,  
научный директор  
Московского планетария  
Ф.Б. РУБЛЕВА,  
член-корр. РАН  
А.Л. СОБИСЕВИЧ,  
член-корр. РАН  
О.Н. СОЛОМИНА,  
академик В.А. СОЛОВЬЕВ,  
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  
RAS Corr. Member 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  
RAS Corr. Member 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!

Перед Вами шестой, последний за длинный и нелегкий 2023 год, номер журнала «Земля и Вселенная». Год для нашей космической науки был сложным: как мы уже писали, неудачей закончилась долгожданная экспедиция на южный полюс Луны – «Луна-25». Что ж, отпереживав положенное и разобравшись в причинах нештатной работы тормозной системы, мы продолжили работу – готовятся новые экспедиции «Луна-26», «Луна-27». К сожалению, в сложившейся обстановке их запусков придется подождать несколько лет. Мы будем информировать читателей журнала о ходе этой работы.

К сожалению, эта неудача имела и другие печальные последствия. 4 декабря 2023 г. мы проводили в последний путь выдающегося отечественного ученого, друга и младшего соратника М.В. Келдыша, прекрасного лектора и популяризатора, моего старшего товарища академика Михаила Яковлевича Марова (1933–2023). Михаил Яковлевич очень много сил вложил в планетные исследования, и гибель «Луны-25» воспринял гораздо более остро, чем многие из нас. Он прожил долгую, прекрасную, насыщенную научным поиском жизнь и для многих – и меня в том числе – всегда будет оставаться примером подлинного ученого и гражданина.

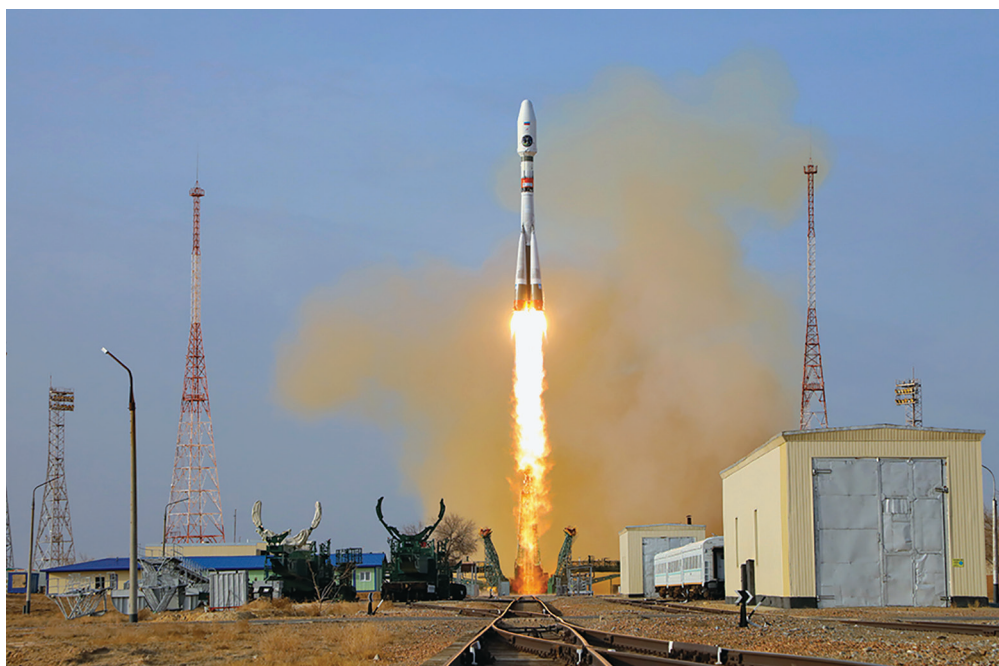
Однако в конце года было и радостное событие – успешный запуск 16 декабря отечественного космического аппарата «Арктика-М» № 2 с космодрома Байконур. Уже первый аппарат этой серии – детище АО «НПО Лавочкина» и НИЦ «Планета» позволил получить блестящие результаты («первый блин» оказался не комом), о которых мы подробно писали в № 3, 2023. Желаем коллегам успешной работы по введению нового космического аппарата в отечественную систему мониторинга арктической зоны и, конечно, будем ждать новых статей о их работе.



За две недели до этого, 30 ноября, в Москве в Гостином дворе на книжной ярмарке «Non/fiction» состоялась презентация нашего журнала (вместе с еще двумя научно-популярными журналами издательства «Наука»). Для меня это был первый опыт выступления в таком престижном историческом месте вблизи Кремля. Кажется, мне и моим коллегам из «Природы» и «Энергии» удалось заинтересовать посетителей. Несмотря на множество книжных соблазнов вокруг, наша аудитория долго не расходилась и задавала всякие, иногда даже каверзные вопросы.

Мое выступление называлось «Империя Солнца». Тема была выбрана не случайно – именно Солнцу и космической погоде посвящен этот заключительный номер журнала. Мы постарались затронуть здесь все основные аспекты солнечно-земных связей – от их влияния на различные технические системы и вплоть до странных, не до конца понятных воздействий на человека.

Мы много писали в нашем журнале о выдающемся отечественном ученом и визионере А.Л. Чижевском, заслуженно рассматривая его идеи, высказанные еще до начала космической



*Старт ракеты-носителя «Союз-2.16» с разгонным блоком «Фрегат» и космическим аппаратом «Арктика-М» № 21 6 декабря 2023 г. с Байконура. Фото Космического центра «Южный» (ЦЭНКИ)*

эры, как фактическое предсказание существования неизвестной тогда системы плазменных токов и магнитных полей, связывающих Солнце и Землю. Его труды, однако, в силу разных причин, стали известны широкому читателю довольно поздно.

В момент, когда писались эти строки, пришла трагическая весть – поле серьезной болезни скончался Александр Леонидович Голованов (25.05.1958–18.12.2023) – человек, бесконечно много сделавший для популяризации и введения в научный оборот книг, статей, писем А.Л. Чижевского. Совсем недавно, в № 5, 2023 журнала «Знание-сила», посвященном процессам на Солнце, мы с ним опубликовали довольно объемистую статью о Чижевском «Разглядевший незримое»... Александр Леонидович был переполнен планами издания медицинских работ Чижевского. Короткий некролог в конце номера, который вы держите в руках, посвящен памяти этого замечательного человека.

Вернемся в космос, к итогам года. 20 ноября этого года исполнилось 25 лет с начала работы Международной Космической Станции – выведения на орбиту первого элемента МКС, функционально-грузового блока «Заря», в 1998 г. Российская пилотируемая космонавтика базируется на функционировании российского сегмента МКС. Проект МКС фактически обеспечил сохранение уникальных компетенций, созданных в советский период от «Востока» до «Мира».

С 13 по 23 ноября на нескольких площадках (ЦПК им. Ю.А. Гагарина, ИКИ РАН, Центр «Авиация и космонавтика» в павильоне «Космос» на ВДНХ) проходила масштабная конференция-выставка «Наука на МКС». Наряду с вопросами обеспечения присутствия человека в космосе, международной интеграции, и, не побоимся этого слова, космической коммерции, проведение научных исследований является одним из наиболее важных направлений

использования пилотируемых космических комплексов.

На конференции прозвучало почти полторы сотни научных докладов. Большой интерес вызвала выставка макетов космических экспериментов, проводимых на МКС. Обсуждалось и будущее: завтрашний день отечественной науки на пилотируемых комплексах связан с созданием новой Российской Орбитальной Станции (РОС) на высокоширотной орбите.

Всем этим работам, представленным на конференции, мы обязательно посвятим несколько публикаций ЗиВ в наступающем году.

В церемонии открытия конференции приняли участие генеральный директор ГК «Роскосмос» Ю.И. Борисов, Генеральный конструктор пилотируемых комплексов В.И. Соловьев, Исполнительный директор ГК «Роскосмос» А.В. Блошенко. Думаю, читателям будет интересно увидеть несколько фотографий, передающих живую атмосферу выступлений и обсуждений, проходивших в эти дни, на международной космической встрече ученых и специалистов.

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

*Глава ГК «Роскосмос»  
Юрий Борисов,  
научный руководитель  
ИКИ РАН академик  
Лев Зелёный  
и научный сотрудник  
ИКИ РАН  
Александр Трохимовский  
обсуждают задачи  
мониторинга парниковых  
газов из космоса.  
Фото: Т. Жаркова, ИКИ РАН*



*Выступает генеральный  
директор ГК «Роскосмос»  
Юрий Борисов.  
Открытие  
Третьей международной  
конференции  
«Наука на МКС»  
20.11.2023 в ИКИ РАН.  
Фото: Т. Жаркова, ИКИ РАН*



Выступает академик Петр Витязь, начальник управления аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук (НАН) Беларуси, заместитель руководителя Агентства по космическим исследованиям НАН Беларуси.  
Фото: Т. Жаркова, ИКИ РАН



Академик Олег Орлов, директор Государственного научного центра Институт медико-биологических проблем Российской академии наук.  
Фото: Т. Жаркова, ИКИ РАН

Олег Артемьев, герой России, инструктор-космонавт-испытатель 1 класса отряда космонавтов ГК «Роскосмос» на выставке «Наука на МКС» в ИКИ РАН с сотрудниками ГНЦ ИМБП РАН.  
Фото: Т. Жаркова, ИКИ РАН



Круглый стол «Перспективы мировой пилотируемой космонавтики» в ИКИ РАН 20.11.2023.  
Участуют: Олег Артемьев; академик Виктор Баранов (ГНЦ РФ ИМБП РАН); Петр Витязь; Лев Зелёный; д.т.н. Алексей Романов (АО «ЦНИИмаш», входит в ГК «Роскосмос»); Владимир Дубинин (ЦПК им. Ю. Гагарина).  
Фото: Т. Жаркова, ИКИ РАН



# НАБЛЮДЕНИЕ СОЛНЦА С БЛИЗКИХ РАССТОЯНИЙ



**ЗЕЛЁНЫЙ Лев Матвеевич,**

*академик РАН*

*Институт космических исследований РАН*



**КУЗНЕЦОВ Владимир Дмитриевич,**

*доктор физико-математических наук*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
имени Н.В. Пушкова РАН*



DOI: 10.7868/50044394823060014

**И**сследования Солнца и его активности имеют фундаментальное значение для астрофизики и для обеспечения жизни на Земле. Из всех астрофизических объектов только Солнце мы можем детально наблюдать и использовать эти наблюдения как основу для изучения далеких звезд и понимания тех физических процессов, которые происходят в далеком космосе. Солнечная активность является основным источником космической погоды в околоземном космическом пространстве, оказывая воздействие на различные сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе. Такие спорадические явления, как вспышки, выбросы

массы, высокоскоростные потоки солнечного ветра, способны вызвать сильные геомагнитные возмущения, заметное повышение потоков корпускулярной радиации, ультрафиолетового и рентгеновского излучения, что проявляется в их воздействии на технические системы на Земле (энергосистемы и протяженные линии электропередач, и т. д.) и в космосе (электроника спутников, аномальное торможение низкоорбитальных спутников, нарушение спутниковой связи, навигации и т. д.).

Космические исследования Солнца дают важную информацию о происходящих на нем процессах. За последние десятилетия наиболее значимые

\* Фото Л.М. Зелёного: Т. Жаркова, ИКИ РАН.

достижения в изучении Солнца в значительной мере были связаны с дистанционными наблюдениями солнечной атмосферы и локальными измерениями в солнечном ветре на космических аппаратах. Реализуемая сегодня современная концепция космических исследований Солнца, призванная обеспечить получение новых данных для решения целого ряда научных проблем физики Солнца, включает спектроскопические наблюдения солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением, наблюдения приполярных областей Солнца из внеэклиптических и других выгодных положений, локальные измерения вблизи Солнца (см. рис. 1).

Решение целого ряда научных и прикладных проблем физики Солнца и космической погоды требует наблю-

дений солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением (менее 1") с близких расстояний и локальных измерений непосредственно вблизи Солнца на гелиоцентрических орбитах. К таким проблемам относится изучение триггерных механизмов солнечных вспышек и выбросов массы – наиболее геоэффективных явлений на Солнце и самых мощных взрывных явлений в Солнечной системе (рис. 2).

Какие свойства магнитных конфигураций активных областей, изменений магнитного поля и движений плазмы приводят к этим явлениям и можно ли их описать теоретически и смоделировать с тем, чтобы использовать для прогнозирования вспышек и выбросов массы как наиболее мощных источников космической погоды? Сегодня опытные прогнозисты по виду

Рис. 1. Современная стратегия солнечных космических миссий



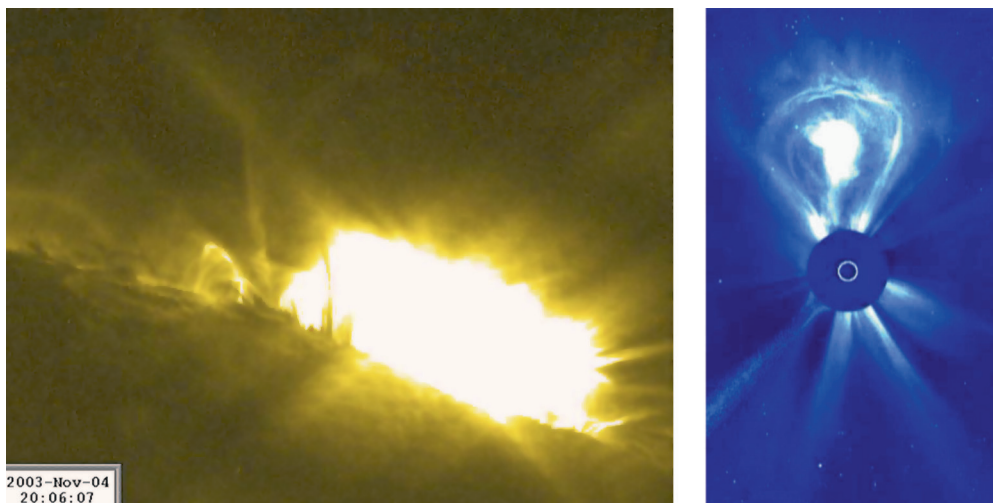


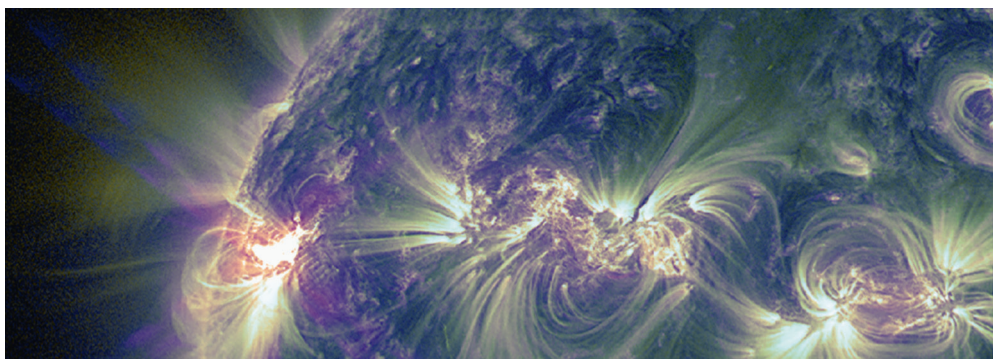
Рис. 2. Вспышки и выбросы массы – наиболее геоэффективные и самые мощные взрывные явления в Солнечной системе. (Изображения НАСА, КА TRACE и SOHO)

конфигураций магнитных полей в активных областях могут с большой долей уверенности сказать, будет ли данная активная область давать вспышки и выбросы массы, однако, предсказать время возникновения этих явлений с достаточной точностью не удастся, а для целого ряда ситуаций, например при работе космонавтов в открытом космосе, такая информация необходима для обеспечения их радиационной безопасности. Знание

тонкой структуры и мелкомасштабной динамики магнитных полей в активных областях Солнца (рис. 3) могут дать ключевую информацию в вопросе о триггерных механизмах вспышечных и эруптивных явлений в солнечной атмосфере.

Наблюдения солнечной атмосферы со сверхвысоким пространственным разрешением позволит также детально изучить процессы ускорения частиц в солнечных вспышках, их выход

Рис. 3. Тонкая структура и динамика магнитных полей в активных областях Солнца (по данным спутника SDO, НАСА)



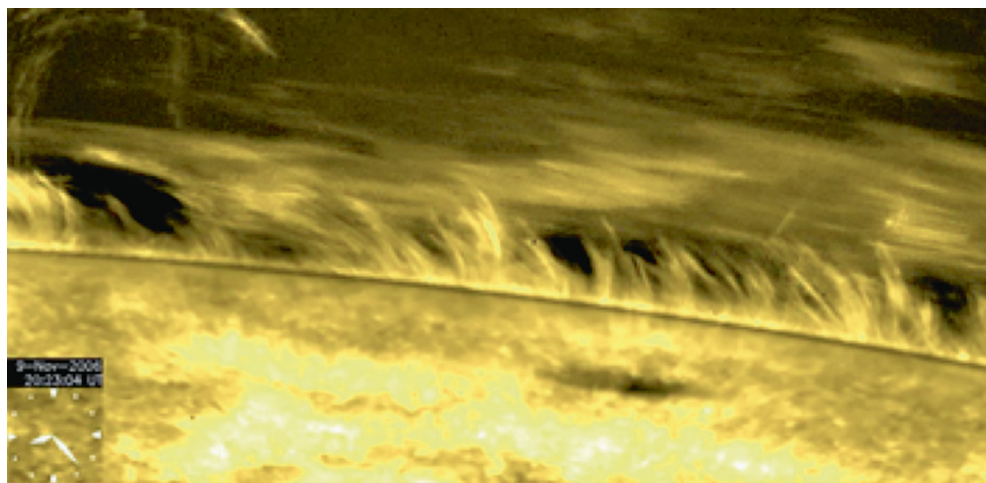


Рис. 4. Спикулы как возможные источники солнечного ветра в солнечной атмосфере. (Изображение спутника Hinode)

из солнечной атмосферы в гелиосферу, формирование радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве, а также генерацию ускоренными частицами ультрафиолетового и рентгеновского излучений, воздействие которых на атмосферу и ионосферу Земли вызывает нарушение ионосферной радиосвязи, приводит к аномалиям в работе спутниковой аппаратуры. Во время солнечных вспышек в солнечной атмосфере рождаются нейтроны, время распада которых на протон, электрон и электронное нейтрино зависит от энергии нейтрона, и только очень высокоэнергичные нейтроны, которых в большинстве солнечных вспышек мало, могут долетать до орбиты Земли и быть измеренными детекторами космических аппаратов. Измерения вблизи Солнца позволяют изучить популяцию нейтронов здесь и использовать их как дополнительный диагностический параметр ускорительных и ядерных процессов в солнечных вспышках. Наблюдения с близких расстояний позволят также регистрировать в солнечной атмосфере относительно слабые вспышечные

явления (микро- и нановспышки), играющие, по-видимому, весьма существенную роль в нагреве солнечной короны. По наблюдениям с орбиты Земли число таких явлений растет с уменьшением их энерговыделения и обрывается при некотором значении из-за их слабой светимости, которую возможно будет регистрировать с близких расстояний, и таким образом определить общую энергетику этих явлений и ее вклад в нагрев солнечной короны.

Непрерывно истекающий из солнечной атмосферы солнечный ветер обтекает магнитосферу Земли, вызывая ее возмущения и магнитные бури. Потoki солнечного ветра сильно модулируются солнечной активностью и условиями в его источниках на Солнце, природа которых неизвестна. Наблюдения и теоретические модели дают предположение о том, что такими источниками, например, могут быть спикулы (второго типа) в солнечной хромосфере (рис. 4), а также границы ячеек хромосферной грануляции (рис. 5).

Наблюдения солнечной атмосферы со сверхвысоким пространственным разрешением призваны дать ответ на

Рис. 5. Границы хромосферных ячеек как возможные источники солнечного ветра в солнечной атмосфере (модель Аксфорда и Маккензи)

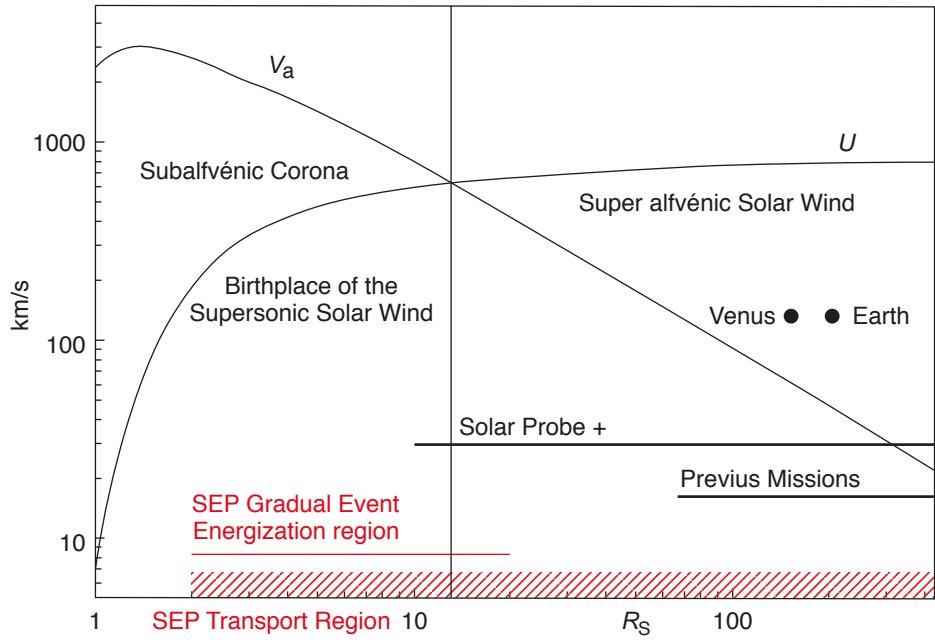
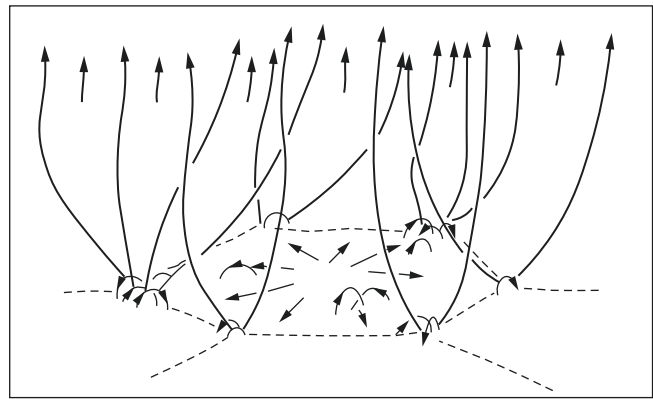


Рис. 6. Модельный радиальный профиль скорости солнечного ветра ( $U$ ) и альвеновской скорости ( $V_a$ ). Расстояние от Солнца по горизонтальной оси показано в логарифмическом масштабе в радиусах Солнца. Вертикальная линия разделяет субальвеновскую область ( $U < V_a$ ) (область источника) солнечного ветра от области сверхзвукового, сверхальвеновского ( $U > V_a$ ) течения солнечного ветра. (Адаптировано из рисунка НАСА)

этот фундаментальный вопрос физики Солнца, имеющий также астрофизическое значение и важный в практическом плане контроля космической погоды. Локальные измерения характеристик солнечного ветра вблизи Солнца

необходимы для понимания механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, радиальный профиль скорости которого имеет рост при удалении от Солнца (рис. 6). Измерения функции распределения частиц плазмы и характеристик плазменных

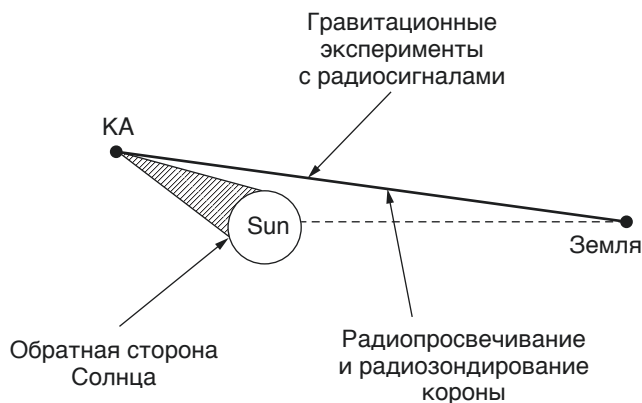


Рис. 7. Наблюдения обратной, не видимой с Земли, стороны Солнца и сопутствующие эксперименты по просвечиванию солнечной короны

колебаний и волн позволит определить характер их взаимодействия и детализировать механизмы ускорения солнечного ветра, что даст физически обоснованные методы прогнозирования потоков солнечного ветра для задач космической погоды.

Гелиоцентричность орбит при сближении космических аппаратов с Солнцем дает возможность наблюдать обратную, не видимую с Земли сторону Солнца, что позволяет заблаговременно предсказывать появление на видимой стороне Солнца активных областей и степень их вспышечной активности, проводить сопутствующие эксперименты по просвечиванию солнечной короны радиосигналами и диагностировать ее состояние и параметры идущих от Солнца корональных выбросов массы (рис. 7).

Сегодня на пути к сближению с Солнцем находятся два космических аппарата – космический аппарат НАСА Солнечный Зонд Паркера (*Parker Solar Probe*) (рис. 8) и космический аппарат Европейского космического агентства (ЕКА) и НАСА Солнечный Орбитер (*Solar Orbiter*) (рис. 9), запущенные соответственно в 2018 и 2019 годах. Для сближения с Солнцем используются многократные маневры у планеты Венера, которые позволяют за счет ее гравитационного поля сократить время

перелета на рабочие орбиты вокруг Солнца и минимизировать энергетические затраты. Сближение с Солнцем сопровождается увеличением тепловых потоков, воздействующих на космические аппараты, для защиты от которых они оснащены теплозащитными экранами.

Космическим аппаратом Солнечный зонд Паркера, который находится на стадии сближения с Солнцем до расстояния примерно в 9 солнечных радиусов в 2025 году, проводятся измерения электромагнитных полей, ионов и энергичных частиц солнечного ветра, что дает ключевую информацию для понимания отождествления потоков энергии, которые нагревают солнечную корону до миллиона градусов и обеспечивают наблюдаемое на этих расстояниях ускорение солнечного ветра. Комплекс научной аппаратуры космического аппарата включает такие приборы, как широкоугольный телескоп для получения трехмерных изображений, короны, солнечного ветра и ударных волн, масс-спектрометр для определения ионного состава солнечной атмосферы, анализатор электронов и ионов солнечного ветра, анализатор энергичных частиц, магнитометр с анализатором плазменных волн и пылевым детектором. На основе измерений в непосредственной близости от Солнца

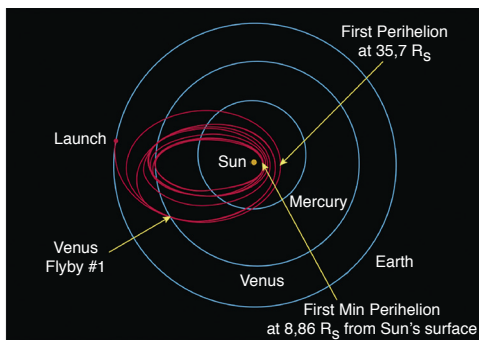
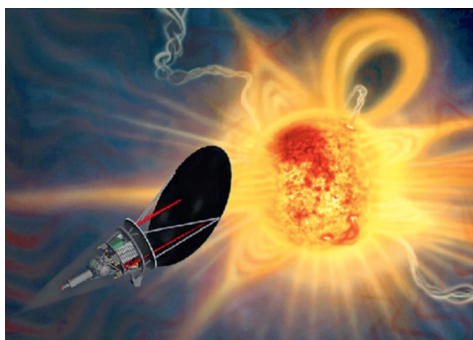


Рис. 8. Слева – космический аппарат Солнечный Зонд Паркера (Parker Solar Probe) с теплозащитным экраном приблизится к Солнца на расстояние в 9,86 солнечных радиусов (около 6 млн км). Справа – орбита сближения КА Parker Solar Probe с Солнцем. (Изображение НАСА)

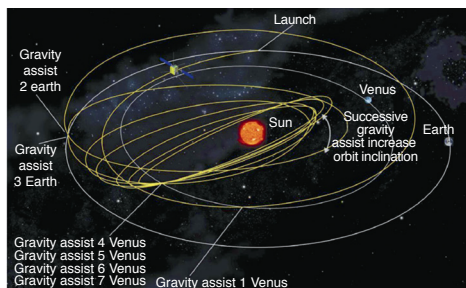
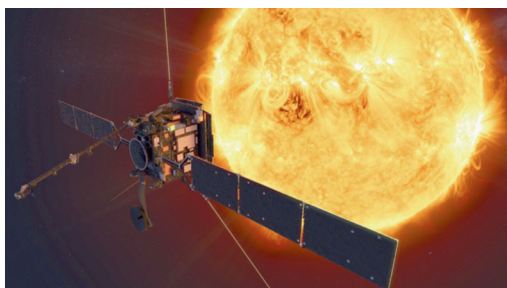


Рис. 9. Слева – космический аппарат Солнечный Орбитер (Solar Orbiter) с теплозащитным экраном приблизится к Солнца на расстояние в 60 солнечных радиусов (42 млн км). Справа – орбита сближения космического аппарата Solar Orbiter с Солнцем с максимальным наклоном к плоскости эклиптики до 32°. (Изображение ЕКА – Европейского космического агентства)

изучается структура и динамика магнитных полей в источниках быстрого (скорости около 800 км/сек) и медленного (скорости около 400 км/сек) солнечного ветра, изучаются основные механизмы ускорения и переноса энергичных частиц в солнечной атмосфере и короне, а также исследуются свойства пылевой плазмы в околосолнечном пространстве и изучается ее влияние на генерацию солнечного ветра и энергичных частиц.

Солнечный зонд Паркера стал самым близким к Солнцу и самым быстрым из всех космических аппаратов

в истории. Согласно графику полета до завершения миссии в июне 2025 года он совершит 24 сближения с Солнцем по гелиоцентрической орбите с периодом примерно в 88 дней, достигая скорости в 724 км/час. Измерения, выполненные Солнечным зондом Паркера, уже дали целый ряд важных и интересных результатов в рамках запланированной научной программы. Первый снимок изнутри солнечной короны дал четкое изображение двух корональных стримеров, образованных магнитным полем, вытягиваемым из солнечной атмосферы солнечным ветром (рис. 10).

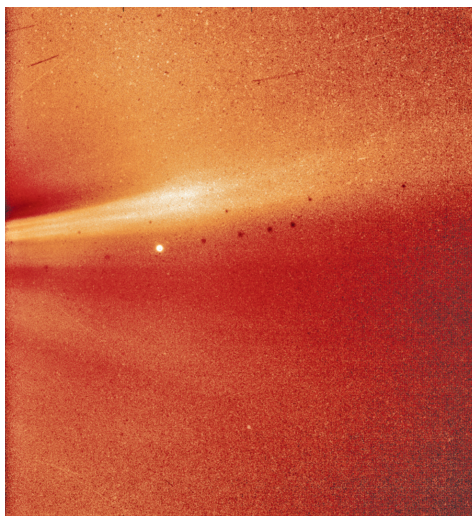


Рис. 10. Первый снимок Солнечного зонда Паркера изнутри солнечной короны – два корональных стримера на расстоянии чуть больше 27 миллионов километров от Солнца. (Снимок НАСА)

Такие стримеры создают каналы для истекающего из атмосферы солнечного ветра, ускоряющегося до сверхзвуковой скорости и пересекающего критическую альвеновскую поверхность, которую условно считают границей между короной Солнца и свободно истекающим потоком солнечного ветра (рис. 6). Эта граница располагается на меняющихся расстояниях (примерно вблизи 18.8 радиусов Солнца) от поверхности Солнца, она несферическая и разделяет области, где солнечный ветер имеет радиальную скорость меньше и больше альвеновской.

В ходе сближения с Солнцем, когда расстояние от аппарата до центра Солнца менялось в диапазоне 19.7–18.4 радиуса Солнца зондом Паркера были зарегистрированы три события проникновения его в область

ниже альвеновской поверхности, которые стали первыми в истории. Измерения показали, что область короны ниже этой границы характеризовалась альвеновским числом Маха 0.78 и магнитной энергией, превышающей как кинетическую, так и тепловую энергию заряженных частиц, а сама магнитная конфигурация в этой области представляла собой быстро расширяющиеся с высотой магнитные силовые линии над нижележащим магнитным полем в виде псевдо-стримера (рис. 11), ограничивающим магнитное пересоединение и связанное с ним выделение энергии в своем основании, как объяснение субальвеновской скорости потока солнечного ветра.

Измеренный спектр турбулентности в субальвеновской области наряду с инерционной частью с показателем  $-3/2$  показал излом в низкочас-

Рис. 11. Трехмерная модель линий магнитного поля в короне, по данным Солнечного зонда Паркера. Зеленый цвет соответствует скорости солнечного ветра ниже альвеновской, фиолетовый – выше альвеновской (рисунок из статьи J.C. Kasper et al. *Physical Review Letters* 127, 255101 (2021))

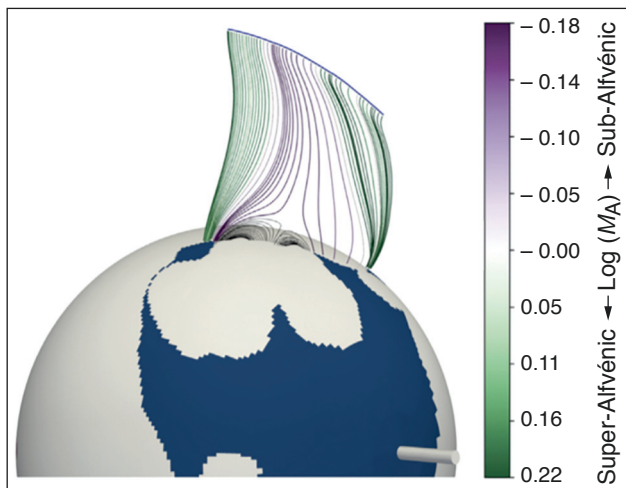
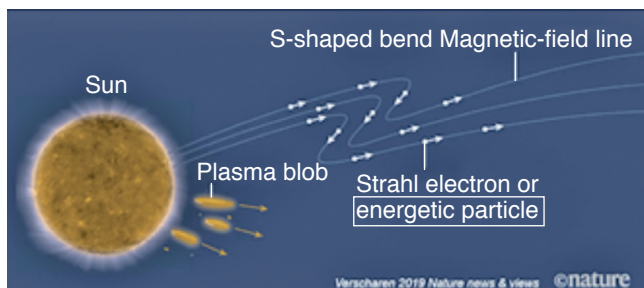




Рис. 12. Наблюдаемая зондом Паркера S-образная форма силовых линий магнитного поля («switchbacks»). (Адаптировано из доклада R. Bandyopadhyay et al. PSP Scholars Meeting, 27–28.04.2021)



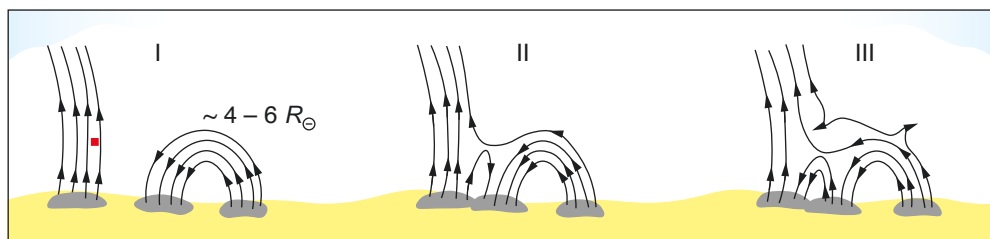
тотной части ( $2 \cdot 10^{-3}$  Гц), связанный с внешним масштабом турбулентности, и небольшое повышение в высокочастотной части спектра ( $\sim 8$  Гц), связанное с масштабом ионно-циклотронных волн. Такие волны, наряду с другими плазменными процессами в субальвеновской области, к числу которых относятся многократно наблюдаемые зондом Паркера явления инверсии магнитного поля (получившие название «обратное переключение», англ. «switchbacks», см. рис. 12), рассматриваются в качестве возможных механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра.

Эти явления S-образной формы силовых линий магнитного поля рассматриваются как нелинейные альвеновские волны, порождаемые глобальной циркуляцией открытых магнитных трубок в основании короны (рис. 13) или переходом между структурированным потоком плазмы и иницированием

турбулентного каскада, наблюдаемого во внутренней гелиосфере. Изучение поведения энергичных частиц с энергией 80–200 кэВ в области S-образных областей магнитного поля дало ограничение на радиус кривизны изгибов S-формы  $< 4000$  км.

Сближаясь с Солнцем, зонд Паркера впервые пересек край одной из магнитных петель в основании выброса коронального вещества на расстоянии всего 14 солнечных радиусов (расстояние от Солнца до Земли 1 а.е. = 150 млн км, примерно 210 солнечных радиусов), на котором структура выброса еще мало изменилась из-за его взаимодействия с межпланетной средой. Измерения показали заметное отличие параметров плазмы в выбросе от параметров солнечного ветра – почти полное отсутствие в пересеченной части выброса тяжелых и легких ионов (от водорода до железа) низкой энергии, которые обычно присутствуют в окружающей плазме

Рис. 13. Магнитное пересоединение в основании короны как источник образования явлений S-образной формы силовых линий магнитного поля. (Адаптировано из доклада H. Liang et al. PSP Scholars Meeting, 27–28.04.2021)



солнечного ветра и в головной части выброса. Такое отличие параметров может быть связано с быстрым расширением магнитной петли в основании выброса при его инжекции в корону и охлаждением сверхтепловых ионов.

Измерения зондом Паркера во внутренней гелиосфере показали наличие в ней ионных пучков, температурной анизотропии плазмы и кинетических плазменных волн, которые рассматриваются в качестве кинетических механизмов нагрева и ускорения солнечного ветра и формирования спектра его турбулентности, они также дали лучшее понимание радиальной эволюции турбулентности в солнечном ветре и переноса энергичных частиц во внутренней гелиосфере.

Космический аппарат Солнечный Орбитер каждые полгода совершает сближения с Солнцем, наблюдая его с близких расстояний. В течение семи лет своей научной программы он совершит 22 сближения с Солнцем, меняя наклонение своей орбиты к плоскости эклиптики (до  $32^\circ$ ) при пролете вблизи Венеры и достигнув в результате сближения в 42 млн км от Солнца, что в четыре раза меньше расстояния от Земли до Солнца.

Идущие от Солнца возмущения при измерениях на космических аппаратах вблизи орбиты Земли замазываются турбулентным состоянием солнечного ветра и не несут в себе достаточной информации об их источниках на Солнце. На рис. 14 по данным спутника STEREO показано, как мелкомасштабные структуры в солнечной короне, вытягиваемые солнечным ветром от их источников на солнечной поверхности в виде отдельных диагональных линий, двигаются от Солнца с разными скоростями (наклон линий), увеличивая видимое угловое расстояние со временем. Происходит их столкновение и слияние, которое перемещает идущие от Солнца возмущения и структуры, приводя к их исчезновению и потере информации об их первоначальном происхождении на Солнце. Линия на рис. 14 показывает положение Солнечного Орбитера на расстоянии 0,28 а.е. от Солнца (видимое угловое расстояние от Солнца  $15.6^\circ$ ), где возможны измерения не размытых мелкомасштабных структур солнечного ветра, непосредственно связанных с их источниками на поверхности Солнца.

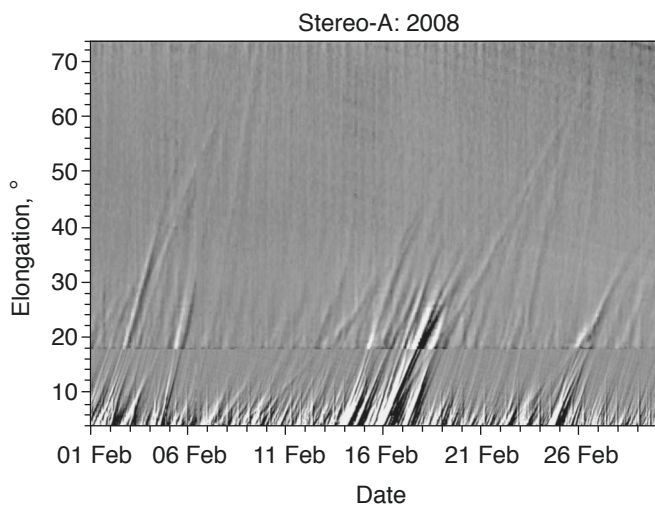


Рис. 14. Столкновение, слияние и исчезновение мелкомасштабных структур в солнечном ветре, приводящее к потере информации об их происхождении на Солнце. Линия показывает положение Солнечного Орбитера на расстоянии 0,28 а.е. от Солнца (видимое угловое расстояние от Солнца  $15.6^\circ$ ). (С любезного разрешения J. Davies, Rutherford Appleton Laboratory, UK). (Изображение ЕКА)

Комплекс научной аппаратуры Солнечного Орбитера включает самые современные приборы дистанционных наблюдений солнечной атмосферы (телескопы в разных диапазонах спектра, спектрометры, коронаграф, гелиосферный телескоп) и приборы для локальных измерений частиц и электромагнитных полей (анализаторы плазмы солнечного ветра и энергичных частиц, магнитометр и анализатор радио и плазменных волн). Одновременные локальные измерения вблизи Солнца и дистанционные наблюдения его атмосферы позволяют изучать тонкую структуру солнечной атмосферы и связь явлений в гелиосфере и явлений на Солнце, что дает лучшее понимание солнечно-земных связей и условий формирования космической погоды в гелиосфере и околоземном космическом пространстве.

Уже первые снимки, полученные 15 июня 2020 года телескопом жесткого рентгеновского излучения с расстояния в 77 млн км от Солнца, позволили получить самое детальное изображение полного диска Солнца и его короны (рис. 15), и выявить многочисленные небольшие вспышки, которые получили название «солнечные костры» (рис. 16).

Такие «костерки» (или микро-, нано- и пиковспышки в несколько миллионов раз менее интенсивные, чем обычные вспышки на Солнце, они не видимы с орбиты Земли, и наблюдаются Солнечным Орбитером по всему диску Солнца. Температура плазмы в «костерках» достигает значений 1–1.6 млн градусов и более, что наряду с их многочисленностью делает их вероятным механизмом нагрева солнечной короны, температура которой 1–2 млн градусов. Продвижение наблюдений таких явлений в область малых масштабов позволит оценить число и частоту их возникновения, общий их вклад

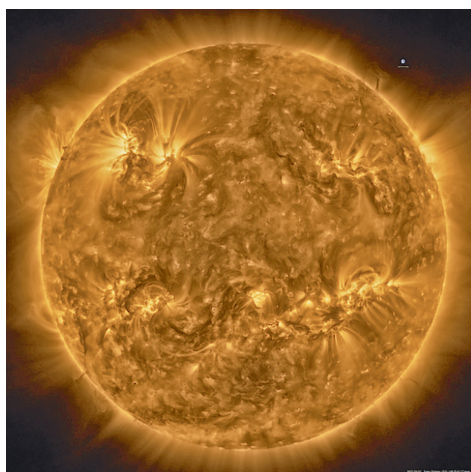


Рис. 15. Детальное изображение полного диска Солнца и его короны, полученное Солнечным Орбитером. (Изображение ЕКА, НАСА).

в энергетику солнечной короны по всему мелкомасштабному спектру и ответить на вопрос, являются ли они основным механизмом нагрева солнечной короны. Природа «костерков» связана с магнитным пересоединением мелких магнитных петель, которые непрерывно всплывают на поверхность Солнца из-под фотосферы, как правило, в скрученном виде, и взаимодействуют между собой и с вышележащими магнитными полями, образуя нулевые точки магнитного поля и приводя к преобразованию магнитной энергии в нагрев плазмы и к ее ускорению в виде наблюдаемых мелких выбросов («джетов»). Процессы энерговыделения в «костерках» характеризуются малыми масштабами (400–4000 км) и малой длительностью (десятки и сотни секунд). Более детальное наблюдение позволило увидеть мелкомасштабные явления магнитного пересоединения в течение длительного времени (часы), когда нагрев солнечной плазмы достигает 10 млн градусов. Такие явления стационарного магнитного пере-

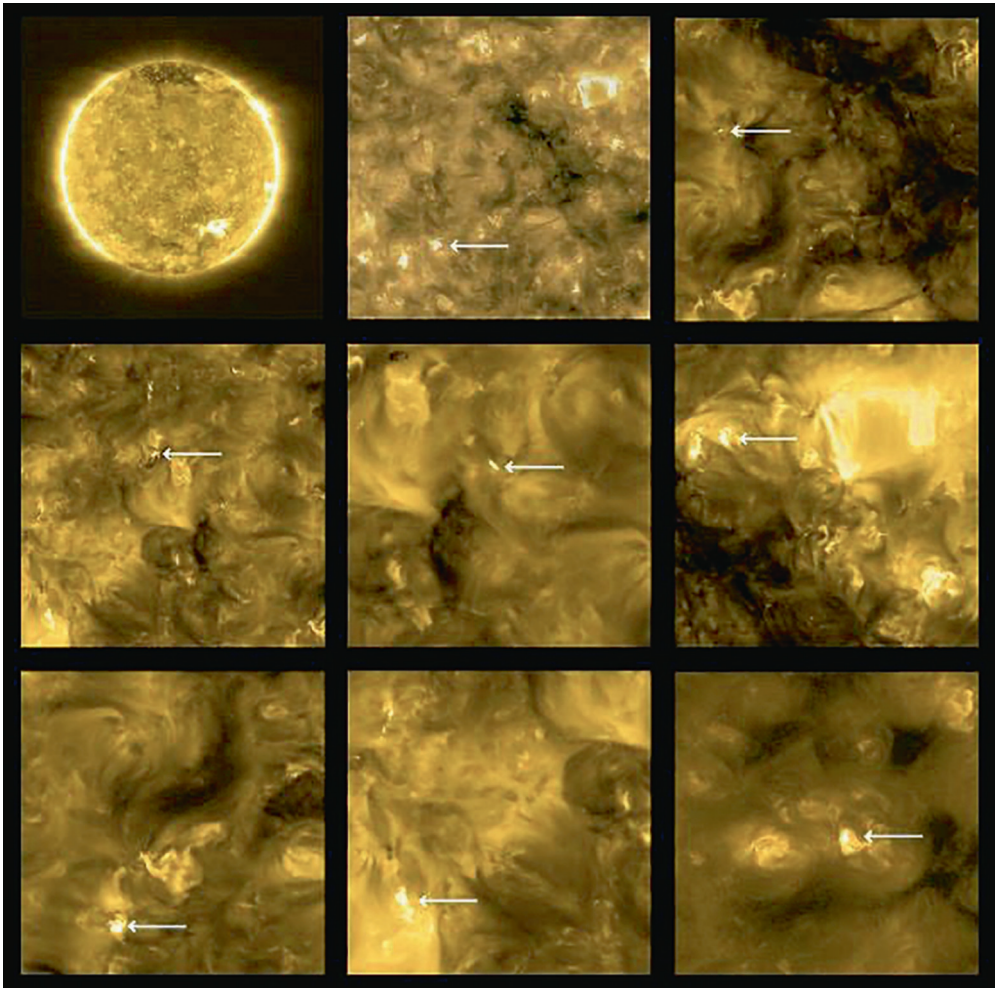


Рис. 16. «Солнечные костры» на снимках указаны стрелками.  
 (Источник: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Solar\\_Orbiter/Solar\\_Orbiter\\_s\\_first\\_images\\_reveal\\_campfires\\_on\\_the\\_Sun](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Solar_Orbiter_s_first_images_reveal_campfires_on_the_Sun)). (См. также видеоролик [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=5&v=ixEq4cbinqA&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=5&v=ixEq4cbinqA&feature=emb_logo).)  
 © Solar Orbiter/EUI Team (ESA & NASA); CSL, IAS, MPS, PMOD/WRC, ROB, UCL/MSSL

соединения сопровождаются оттоком плазмы из области нулевых точек магнитного поля со скоростью в десятки км/сек (80 км/сек), а также могут переходить в режим взрывного выделения энергии на характерных временах в несколько минут по аналогии со взрывной фазой больших вспышек.

За счет многократных гравитационных маневров у Венеры Солнечный

Орбитер постепенно наклоняет плоскость орбиты к плоскости эклиптики, чтобы в 2025–2029 годах получить возможность впервые более детально наблюдать полярные области Солнца, в частности, получать магнитограммы и изучать структуру и динамику магнитного поля в этих областях, связанную с солнечным циклом. Наблюдения приполярных областей южного

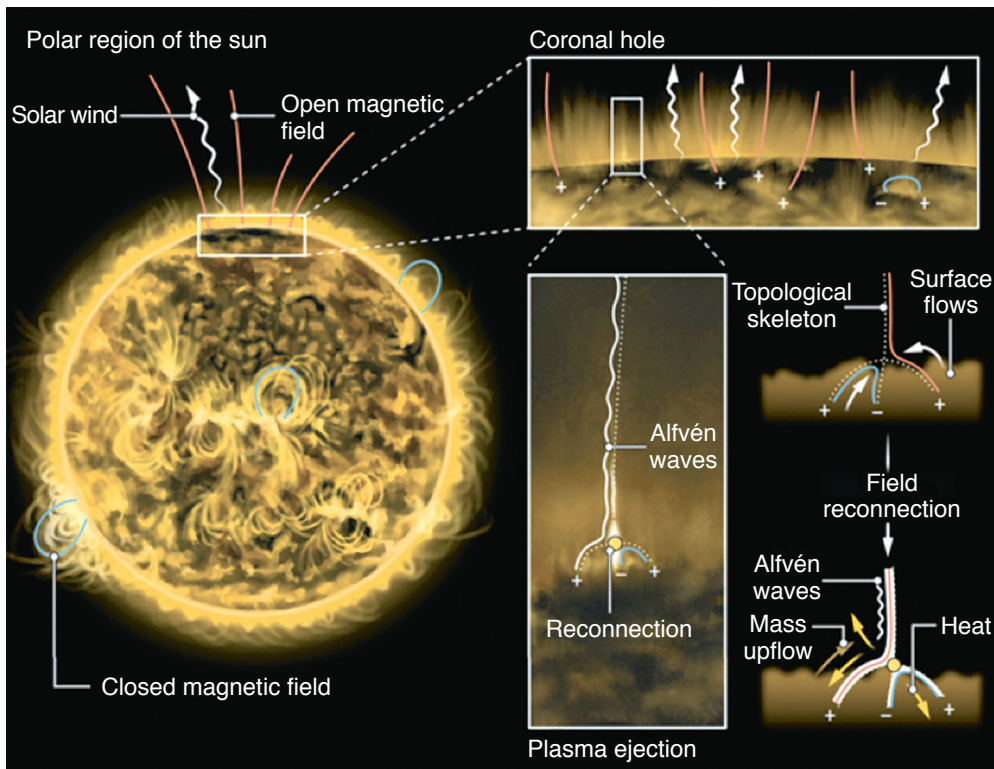


Рис. 17. Магнитное пересоединение в области корональной дыры, обеспечивающее нагрев плазмы и ее истечение в солнечный ветер. (Источник: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.ade5801>)

полюса (см. рис. 17) обнаружили множество небольших (20–400 км) «джетов» (пико-вспышек) в пределах корональной дыры на Солнце, живущих несколько десятков секунд, которые также могут быть связаны с процессами магнитного пересоединения, нагревающими плазму до высоких температур и поставляющими ее из джеподобных структур вдоль открытых силовых линий корональной дыры в солнечный ветер, поддерживая его энергетику и массовый баланс (рис. 18).

Наблюдения Солнца с близких расстояний на КА Солнечный зонд Паркера и Солнечный Орбитер продолжают, впереди сближение с Солнцем до самых близких расстояний, во время

которых ожидается получение новых результатов в разгадке тайн Солнца и его активности. Наблюдения вблизи Солнца кооперируются с наземными наблюдениями и с наблюдениями на других космических аппаратах (SDO – Solar Dynamic Observatory и др.). Измерения свойств турбулентности солнечного ветра зондом Паркера и Солнечным Орбитером на расстояниях 0.1–1 а.е. дало веское доказательство радиальной ее эволюции, а именно, происходит эволюция плазмы солнечного ветра от сверххальвеновской турбулентности и состояния слаборазвитой турбулентности около Солнца к полностью развитой и промежуточной турбулентности на расстоянии 1 а.е.



Рис. 18. Слабое излучение из области корональной дыры в виде вуали, демонстрирующее истечение плазмы наружу по всей корональной дыре. (Снимок Солнечный Орбитер)

В российском проекте Интергелиозонд два космических аппарата будут запускаться на наклонные в разные стороны относительно плоскости эклиптики гелиоцентрические орбиты с разделением при их вращении вокруг Солнца на четверть периода, чем обеспечивается непрерывность как эклиптических, так и внеэклиптических наблюдений и измерений (рис. 19). Наклонение орбит и сближение с Солнцем до расстояний в 60 солнечных радиусов обеспечивается за счет многократных гравитационных маневров у Венеры и с возможным использованием электрореактивной двигательной установки.

Научный комплекс космического аппарата Интергелиозонд включает приборы дистанционных наблюдений солнечной атмосферы (телескопы, магнитограф, спектрометры, коронограф, гелиосферный телескоп), а также приборы для локальных измерений (анализаторы плазмы солнечного ветра, энергичных частиц, магнитного поля, радиоизлучения и плазменных волн), в составе которого приборы для изучения солнечных вспышек, их излучения и ускоренных частиц. Наряду с обширной программой по изучению тонкой структуры и динамики солнечной атмосферы, триггерных механизмов и признаков вспышек и выбросов

Рис. 19. Слева – два космических аппарата в проекте Интергелиозонд приблизятся к Солнцу на расстояние в 60 солнечных радиусов. Справа – один из вариантов орбиты сближения космического аппарата Интергелиозонд с Солнцем с использованием электрореактивной двигательной установки (ЭРДУ) и многократных гравитационных маневров у Венеры с одновременным наклоном орбиты к плоскости эклиптики до 27°



массы, областей истечения и механизмов ускорения солнечного ветра, связи явлений на поверхности Солнца и в гелиосфере, будут проводиться непрерывные наблюдения магнитных полей в приполярных областях Солнца для изучения природы 11-летнего солнечного цикла, меняющего свою амплитуду и длительность от цикла к циклу. Измерения на пространственно разнесенных космических аппаратах позволят лучше понять условия генерации и распространения ускоренных частиц в гелиосфере, важные для формирования радиационной обстановки околоземном космическом пространстве, а также воздействие вспышек и выбросов массы на гелиосферу и космическую погоду.

Таким образом, результаты уже выполненных наблюдений вблизи Солнца

космическими аппаратами Солнечный Орбитер и Солнечный зонд Паркера дали новые результаты, призванные дать ответы на нерешенные проблемы физики Солнца, важные для фундаментальной астрофизики и для целого ряда практических задач космической погоды, оказывающей все возрастающее воздействие на различные сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе. Действующие и планируемые космические миссии для наблюдений вблизи Солнца позволят сделать очередной важный шаг на пути к лучшему пониманию того, как устроено и как работает Солнце, как могут быть устроены далекие звезды и как нам минимизировать те риски, которые дает космическая погода, порождаемая солнечной активностью.



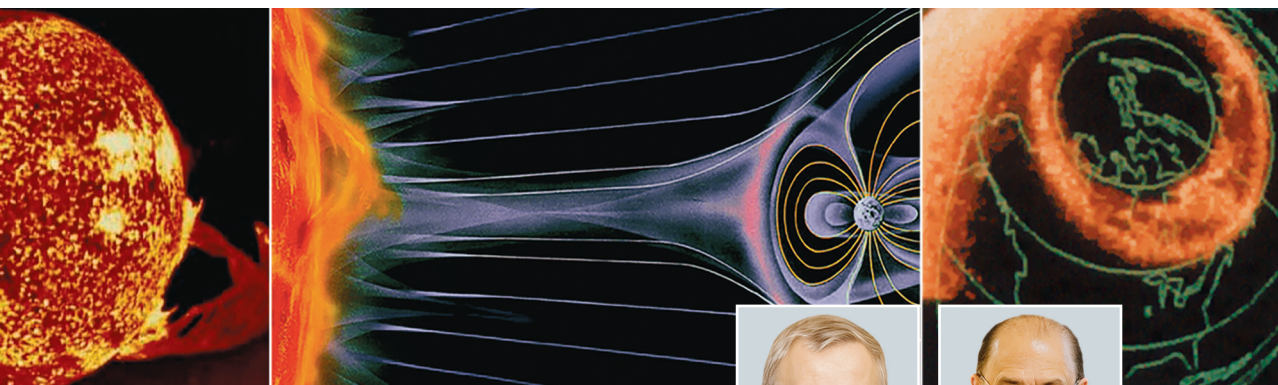
## А вы отправили обязательный экземпляр?

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

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

Реклама

# КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ



**ПИЛИПЕНКО Вячеслав Анатольевич,**  
доктор физико-математических наук

**ГВИШИАНИ Алексей Джерменович,**  
академик

**СОЛОВЬЁВ Анатолий Александрович,**  
член-корреспондент РАН  
Геофизический центр РАН,  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**РОЗЕНБЕРГ Игорь Наумович,**  
член-корреспондент РАН  
Российский университет транспорта (МИИТ)



DOI: 10.7868/50044394823060026

**Д**олжны ли железнодорожники об-  
ращать внимание на возмуще-  
ния космической погоды<sup>1</sup> – магнитные

<sup>1</sup> Космическая погода – наиболее практически важные аспекты науки о солнечно-земных связях, все возможные взаимодействия гелио- и геофизических явлений: *Ермолаев Ю.И.* «Буря мглою небо кроет...». Влияние «космической погоды» на человека и технику // Земля и Вселенная. 2004. № 5; *Тарасов Н.Т.* Солнечная активность, космическая погода и землетрясения // Земля и Вселенная. 2022. № 1.

бури и солнечные вспышки? Анализ имеющейся информации показывает, что возмущения космической погоды могут повлиять на железнодорожную инфраструктуру как из-за прямого, так и косвенного воздействия на компоненты системы. Одним из основных факторов являются геоиндуцированные токи в заземленных протяженных конструкциях, возбуждаемые при возмущениях геомагнитного поля. Связанные с ними теллурические электри-



ческие поля и токи<sup>2</sup> могут вызывать нарушения электроснабжения и сбои в функционировании рельсовых цепей железнодорожной автоматики, особенно на северных участках РЖД. Косвенное воздействие возможно через нарушения стабильной подачи электроэнергии, нарушения в системах связи и в появлении ошибок местоопределения в навигационных спутниковых системах. Не исключено влияние гелиобиологических факторов на железнодорожных машинистов и операторов. Рассмотрим основные факторы космической погоды, которые могли бы представлять угрозу для транспортных и энергетических систем.

---

## ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТРАНСПОРТ

---

Анализ имеющейся в технической литературе информации показывает, что экстремальные возмущения космической погоды могут повлиять на железнодорожную инфраструктуру как из-за прямого, так и косвенного воздействия на компоненты системы. Исследования «космической погоды», т. е. состояния электромагнитных полей, плазмы и потоков частиц в околоземном космическом пространстве выходят за рамки чисто академического интереса по мере возрастания количества проблем, связанных с нарушениями нормального функционирования спутниковых и наземных технологических систем. К ним относятся сбои спутниковой электроники, отключения пода-

чи электроэнергии, пропадание коротковолновой радиосвязи, деградация сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, нарушения в работе транспортных систем, и др. Наибольшее воздействие космическая погода оказывает на технологические системы, расположенные на высоких широтах при магнитных бурях и суббурях. Слабые геомагнитные бури случаются примерно 1700 раз в течение 11-летнего солнечного цикла, а экстремальные геомагнитные бури происходят в среднем 4 раза в течение цикла. Несмотря на относительную редкость экстремальных магнитных бурь, приносимый ими экономических ущерб ставит их в число одних из самых опасных природных катастроф.

Известны многочисленные примеры катастрофических последствий космической погоды, имевшие место по всему миру. Полностью избежать негативных последствий от ее резких изменений невозможно, но необходимо знать и учитывать ее воздействие на технологические системы, что позволит минимизировать риски. При этом, чем шире внедряются передовые технологии, тем чувствительнее для экономики и жизнедеятельности становятся их сбои и выходы из строя. Современные критические инфраструктуры все более становятся взаимозависимыми, и, следовательно, все они становятся уязвимыми, если даже лишь на одну из них воздействует космическая погода. Интенсивные возмущения геомагнитного поля и ионосферы могут воздействовать и на военные технологии. Например, 4 августа 1972 г. десятки магнитных мин, заложенных США для блокирования морской торговли в Северном Вьетнаме, самопроизвольно взорвались при отсутствии каких-либо судов. Анализ рассекреченных архивов войны во

---

<sup>2</sup> Теллурические токи (лат. tellūs – земля) – электрические токи, текущие у поверхности земной коры. Земные токи регистрируют путем измерения разности потенциалов между двумя электродами, помещенными в разные точки земного грунта.

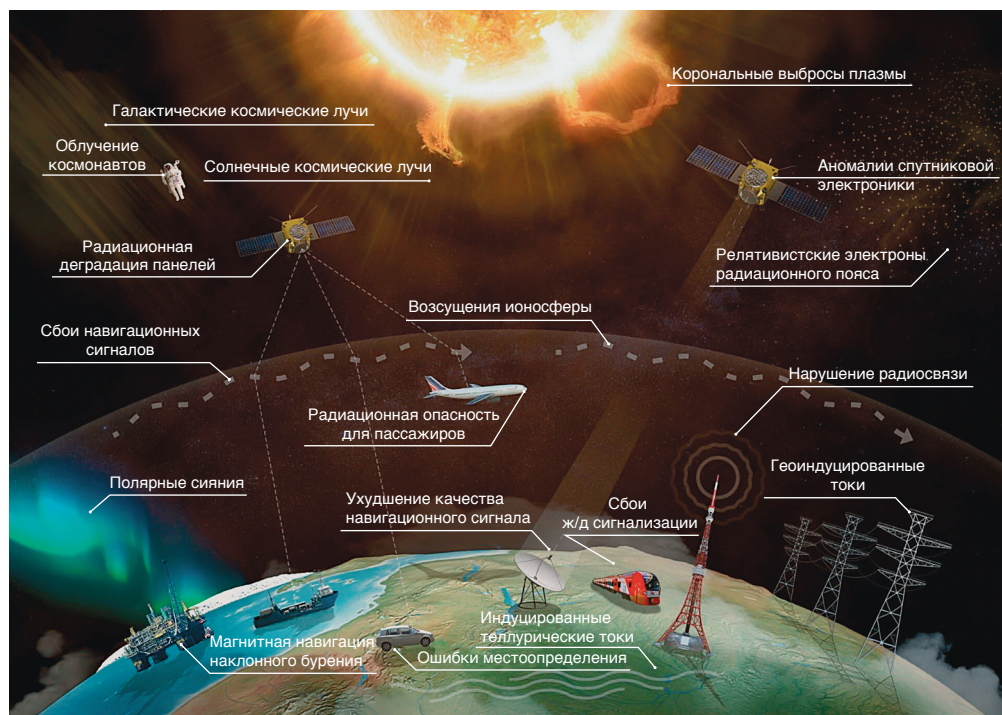


Рис. 1. Различные факторы космической погоды и ее влияния на технологические и транспортные системы. Рисунок из статьи Розенберг и др. (2021)

Вьетнаме показал, что самопроизвольный подрыв мин был вызван мощной магнитной бурей.

## МАГНИТНЫЕ БУРИ, СУББУРИ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

Магнитные бури наибольшей интенсивности связаны с корональными выбросами массы (КВМ) солнечной плазмы до 10 млрд тонн со скоростями до нескольких тысяч км/с. При южном направлении межпланетного магнитного поля, увлекаемого выброшенным облаком плазмы, происходит пересоединение его силовых линий и магнитного поля в пограничных областях магнитосферы Земли, что способствует интенсивному поступлению эне-

гии солнечного ветра в магнитосферу. В результате усиливаются токовые системы магнитосферы и ионосферы, которые вызывают резкое изменение геомагнитного поля продолжительностью от нескольких часов до суток, и на несколько порядков возрастают потоки высокоэнергичных частиц в околоземном пространстве. Бури, вызванные КВМ, не имеют строгой периодичности появления, их частота увеличивается в периоды максимума солнечного цикла, но не прекращается и в периоды минимума. Кроме того, происходят рекуррентные магнитные бури с периодичностью вращения Солнца 27 суток, за которые ответственны высокоскоростные потоки солнечного ветра, истекающие из корональных дыр Солнца.

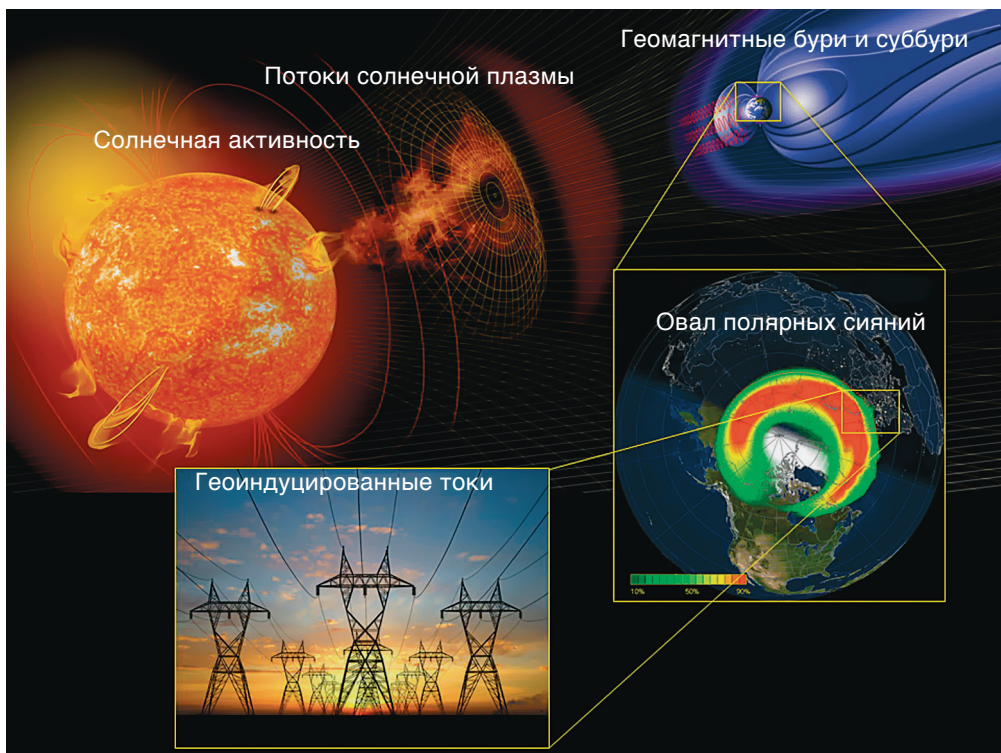


Рис. 2. Сценарий солнечно-земных связей, включающий корональные выбросы солнечной плазмы, возбуждение бурь и суббурь, активизацию полярных сияний, и генерацию геоиндуцированных токов в наземных технологических системах

Геоэффективность разных типов магнитных бурь неоднозначна и проявляется в разных магнитосферных явлениях по-разному. Магнитные бури формально классифицируются по планетарному индексу Dst (или SYM-H), отражающему вариации геомагнитного поля на низких широтах. За период экспериментальных наблюдений наиболее сильным событием в ближнем космосе считается буря Каррингтона 1–2 сентября 1859 г., интенсивность которой достигла  $|Dst| \sim 850$  нТл. Возможно, что буря 15 мая 1921 г. могла быть даже более мощной с  $|Dst| \sim 900 \pm 130$  нТл. Во время космической эры наиболее интенсивным событием была буря 13 марта 1989 г., когда  $|Dst|$  достиг

640 нТл. Оценки возможности повторения таких экстремальных событий дают вероятность около 12% в ближайшее десятилетие, а бури, подобные мартовскому событию 1989 г., могут происходить примерно раз в 60 лет.

В отличие от такого планетарного возмущения как магнитная буря, суббури развиваются только в ночном секторе магнитосферы. Если магнитная буря относительно редкое событие: примерно несколько десятков сильных и умеренных бурь происходят в течение года в зависимости от фазы солнечного цикла, то суббури разной интенсивности возникают в среднем раз в три дня. Суббуря является своеобразным «космотрясением», при котором



*Рис. 3. Во время сильных магнитных бурь неоднократно отмечались сбои в работе железнодорожной автоматики – сигнальный светофор переключался между красным и зеленым светом без видимых причин*

энергия, поступающая от солнечного ветра при благоприятной ориентации межпланетного магнитного поля, накапливается в ночной магнитосфере и спонтанно высвобождается при взрывном начале суббури. Наибольшую интенсивность имеют суббури на фоне магнитной бури, но они могут развиваться и изолированно вне бури.

Не только усиление крупномасштабной магнитосферно-ионосферной токовой системы в момент взрывного начала суббури, но и более локальные возмущения – геомагнитные пульсации и спорадические магнитные импульсы приводят к быстрым вариациям магнитного поля. На фоне суббури часто наблюдаются интенсивные иррегулярные пульсации, представляющие собой квазипериодическую последовательность импульсов длительностью 5–20 минут с крутыми фронтами.

Токовые системы в ионосфере, ответственные за импульсные геомагнитные возмущения, представляют собой локализованные радиусом 200–250 км вихревые структуры, поддерживаемые струями продольных токов из магнитосферы в ионосферу.

Такой быстрый выброс солнечной плазмы как КВМ приводит к образованию межпланетной ударной волны. При типичной скорости около 500 км/с эта ударная волна достигает Земли примерно за 3 дня, а при сверхбыстрых КВМ со скоростью 2500 км/с – через примерно 12 часов. Взаимодействие межпланетной ударной волны с магнитосферой Земли проявляется на земной поверхности в скачкообразном увеличении геомагнитного поля – внезапном начале бури, являющимся ее предвестником. Импульсное воздействие ударной волны может в течение очень

короткого времени привести значительное количество энергии и импульса из межпланетной среды в околоземное пространство.

Кроме того, Солнце является мощным источником электромагнитного излучения в чрезвычайно широком диапазоне длин волн. Всплески солнечного радиоизлучения (радиовспышки) в дециметровом диапазоне могут временно «ослеплять» приемники сигналов спутниковых навигационных систем.

---

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ

---

Влияние возмущений космической погоды на работу инфраструктуры железнодорожного транспорта оказалось неожиданным для геофизиков и железнодорожников. Первым событием, при котором была замечена связь аварии в железнодорожной сигнализации с космической погодой, явилась «буря Нью-Йоркской железной дороги» 1921 г. Во время этой исключительно сильной бури полярные сияния наблюдались даже в Калифорнии. Вышла из строя система сигнализации на Центральной станции Нью-Йорка, затем загорелась башня диспетчерской. Во время той же бури вспыхнувший пожар уничтожил Центральную железнодорожную станцию Новой Англии, а в Швеции загорелась телефонная станция, и была нарушена телефонная и телеграфная кабельная связь на большей части Европы. Впоследствии во время магнитных бурь неоднократно отмечались сбои в работе железнодорожной автоматики – сигнальный светофор переключался между красным и зеленым светом без видимых причин (например, в 1982 г. в Швеции).

Аномалии в работе железнодорожной сигнализации во время сильных магнитных бурь отмечались и в России, когда на Октябрьской и Северной железных дорогах возникали множественные сбои в работе автоматики – ложная занятость пути. Так, в течение 2000–2005 гг. Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН<sup>5</sup> получал много сообщений от операторов железных дорог о сбоях в работе системы сигнализации. На пультах дежурных по станциям появлялись ложные сигналы занятости секций вдоль главного пути при отсутствии на них подвижного состава, что сбивало график движения поездов. Проверка аппаратуры после таких событий показывала нормальное функционирование систем, поэтому эти аномалии для железнодорожников оказались спонтанными и необъяснимыми.

Сравнение полученных сообщений с данными по вариациям геомагнитного поля на ближайших магнитных станциях выявило хорошо выраженную корреляцию между нарушениями в работе железнодорожной автоматики и развитием сильнейших магнитных бурь. Выяснилось, что причиной таких явлений могут быть наведенные токи в системе рельсовой сигнализации. За период 2000–2005 гг. произошло 15 мощных магнитных бурь, и каждая из них вызвала сбои в работе железнодорожной сигнализации.

Например, в апреле 2000 г. без явных внешних причин произошли сбои в работе рельсовых цепей сигнализации на Северной железной дороге. Оказалось, что с 6 на 7 апреля развилась большая магнитная буря с  $|Dst| \sim 200$  нТл, и сбои совпали с ее наиболее возмущенным периодом. Во время бури произошло

---

<sup>5</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (<http://spaceweather.izmiran.ru>)

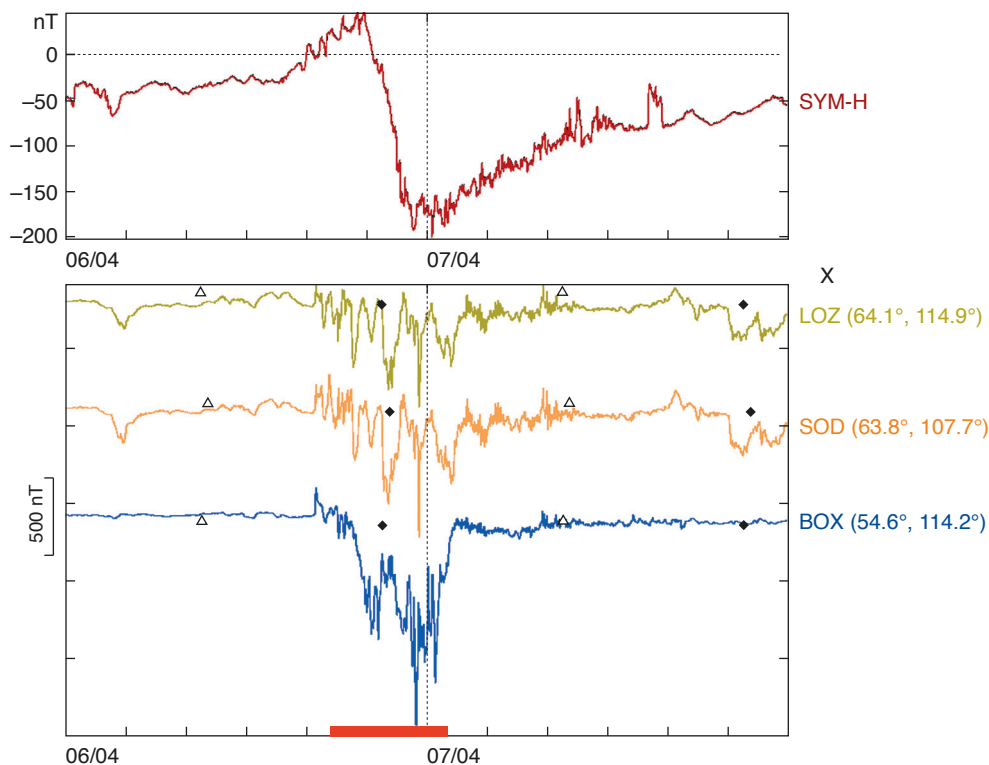


Рис. 4. Магнитограммы магнитных станций Ловозеро (LOZ), Соданкила (SOD), Борок (BOX) в период бури 6–7 апреля 2000 г., во время которой наблюдались сбои в работе рельсовых цепей железнодорожной сигнализации Северной железной дороги (этот период отмечен горизонтальной красной чертой). Геомагнитные координаты станций даны рядом с кодом станций. Верхняя панель показывает вариации геомагнитного SYM-H индекса, характеризующего общепланетарную магнитную возмущенность при магнитных бурях. Рисунок из статьи Пилипенко и др. (2023)

типичное расширение возмущенной области и аврорального овала<sup>4</sup> к более низким широтам, и в результате магнитная возмущенность на среднеширотных обсерваториях была даже выше, чем на более высокоширотных станциях. Сбои, зарегистрированные во время магнитной бури, возникли в периоды наибольшей вариабельности геомагнитного поля. Аналогичная

<sup>4</sup> Авроральный овал – овал полярных сияний, где наблюдаются яркие формы полярных сияний, протекают наиболее сильные ионосферные токи, а ионосферная плазма сильно турбулентна.

картина наблюдалась во время других сильных бурь.

Сбои в работе сигнальной автоматики могут возникать и при относительно умеренных магнитных возмущениях. Так, в июле 2004 г. во время умеренной магнитной бури на Северной ж/д сбои в работе сигнализации вызывались не только суббурями, но и уединенными магнитными импульсами.

Причиной сбоев могут быть теллурические токи, наведенные в поверхностных слоях Земли во время усиления геомагнитной активности. Железнодорожные пути состоят из отдельных

участков рельсовой цепи, изолированных от земли и друг от друга. При отсутствии состава на путях сигнальный ток от источника питания, подключенного к рельсовым нитям, держит под напряжением путевое реле, также подключенное к рельсовым нитям на противоположном участке рельсовой цепи. В результате на выходе системы сигнализации появляется сигнал «путь свободен». При появлении состава на путях основная часть сигнального тока пойдет через колесные пары, ослабив напряжение на путевом реле, что вызовет сигнал на выходе «путь занят». Оказывается, интенсивные теллурические токи также могут вызвать изменение сигнального тока, что и приводит к ложным сигналам о состоянии пути.

---

## КОСВЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ТРАНСПОРТ

---

По мере роста сложности технологических инфраструктур любое серьезное нарушение работы одной из них может иметь последствия для других и приводить к взаимозависимым откатам. Поэтому работа железнодорожных систем зависит от других, потенциально подверженных воздействию космической погоды технологий, таких как энергоснабжение, связь, и системы позиционирования. Наиболее опасным для технологических систем воздействием магнитных возмущений является геоиндуцированный ток (ГИТ), связанный с резкими изменениями геомагнитного поля  $B$ , т. е. большими величинами производной  $dB/dt$ . Индуцируемые в поверхностных слоях земной коры теллурические токи замыкаются через заземленные линии электропередач (ЛЭП), вызывая в них появление ГИТ. Поскольку ГИТ имеют

очень низкую частоту по сравнению с промышленной частотой 50/60 Гц, то протекание квазипостоянного тока через обмотки трансформаторов высоковольтных ЛЭП приводит к насыщению магнитопроводов трансформаторов. В результате ГИТ вызывают перепады напряжения, перегрев силовых трансформаторов и потерю реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП. В крайних случаях электрические сети могут даже становиться нестабильными и выйти из строя, вызывая масштабные отключения электроэнергии. Современные энергетические сети со сложной геометрией, распространившиеся до высоких широт, оказываются, по существу, гигантской антенной, электромагнитно-сопряженной с токами ионосферы. В заземленных энергетических сетях наблюдались токи до нескольких сотен ампер, в то время как ГИТ с интенсивностью всего несколько ампер достаточно, чтобы вывести некоторые типы трансформаторов из рабочего режима. Сбои в работе электрооборудования дополнительно могут быть вызваны преждевременным старением компонентов высоковольтных трансформаторов из-за кумулятивного воздействия даже умеренной по величине вариабельности геомагнитного поля. Поэтому длительное существование даже сравнительно небольших по интенсивности геомагнитных вариаций может быть даже более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные и интенсивные всплески  $dB/dt$  во время взрывного начала суббурь. Для передачи больших объемов энергии на большие расстояния строятся все более протяженные ЛЭП, которые особенно подвержены воздействию ГИТ, что делает электрические сети все более восприимчивыми к возмущениям космической погоды. Так, в Канаде и США уровни ГИТ стали в 2–3 раза выше, чем

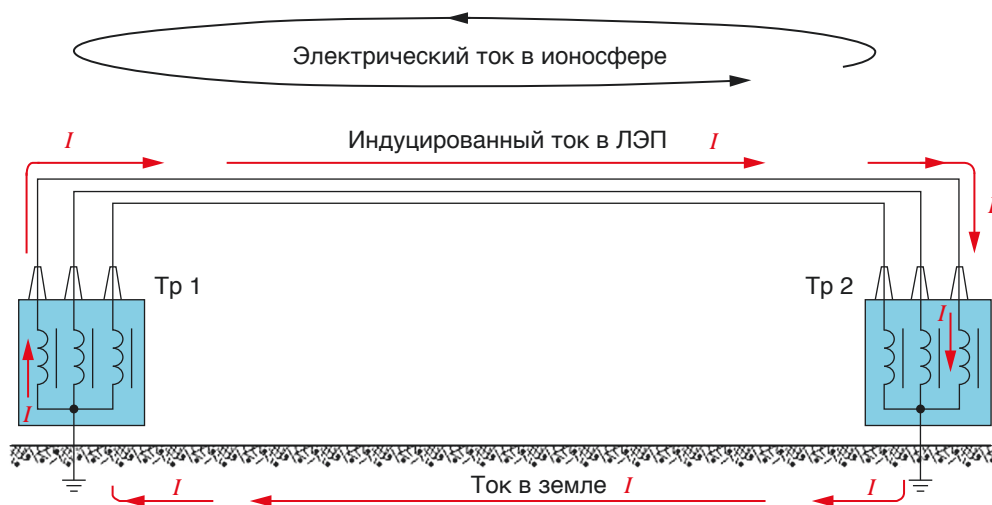


Рис. 5. Схема возбуждения теллурических токов в земле и ГИТ в высоковольтных трансформаторах ЛЭП электрическими токами в ионосфере

наблюдались 20 лет назад при магнитных бурях той же интенсивности.

Реле защиты силовых трансформаторов обычно отстроены от постоянной составляющей в токе и не реагируют на нее. Таким образом, релейная защита не будет реагировать на ГИТ, насыщающие трансформатор, и он просто сгорит. В истории известны случаи повреждения силовых трансформаторов во время сильных магнитных бурь, при которых по всему миру происходили срабатывания систем релейной защиты в ЛЭП и полностью прекращалась подача электроэнергии. Хотя максимальные возмущения геомагнитного поля происходят на авроральных широтах, т. е. на тех широтах, где вспыхивают полярные сияния, в последнее время обнаружено, что опасные величины ГИТ могут наблюдаться на средних и даже низких широтах.

Современные энергетические системы – это громадная сеть с крайне сложной топологией, которая покрывает обширные территории земной поверхности, локальные геоэлектри-

ческие свойства которой (например, проводимость) различаются до пяти порядков величины. В регионах с низкой проводимостью вероятность негативного воздействия магнитных возмущений резко повышается, т.к. наведенные токи преимущественно текут через проводящие элементы промышленных сетей. Таким образом, геологическое строение существенно влияет на амплитуду геоэлектрических полей, генерируемых магнитными возмущениями. Так, для северо-запада России различие в величинах теллурического поля для различных точек поверхности может составлять 3–4 раза при одинаковых амплитудах магнитного возмущения.

С неизбежностью проблемы, возникающие в энергетических системах, отражаются на надежности работы электрифицированных транспортных систем. Ухудшение качества передаваемой электроэнергии (нестабильность и появление высоких гармоник) снижает характеристики тяговых систем на железнодорожном транспорте.



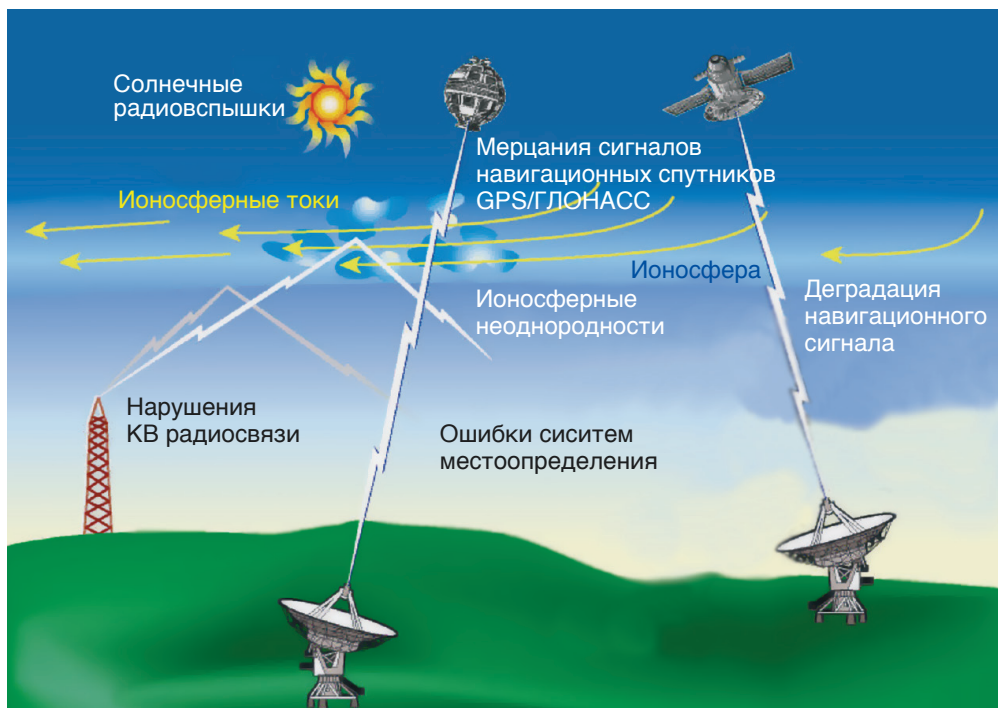
## ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ

Надежная работа систем радиосвязи на железнодорожном транспорте является одним из основных факторов безопасности движения подвижного состава. Анализ данных мониторинга систем радиосвязи показал, что из случаев проезда на запрещающий сигнал светофора примерно в половине сопутствующим обстоятельством было нарушение связи между машинистом и руководителем движения.

В арктических широтах действует множество факторов космической погоды, влияющих в различной степени на системы связи. Наиболее подвержена ионосферным возмущениям радиосвязь в коротковолновом (КВ)

диапазоне 1–10 МГц. Хотя в настоящее время интенсивно развиваются волоконно-оптические, радиорелейные и особенно спутниковые системы связи, КВ-радиосвязь остается их серьезной альтернативой. Возрождение интереса к КВ-радиосвязи специального назначения объясняется еще и уязвимостью спутниковых систем связи при конфликтных ситуациях. Увеличение надежности КВ-систем радиосвязи является сложной проблемой, поскольку распространение радиоволн декаметрового диапазона сильно зависит от гелиогеофизической обстановки. Волны КВ-диапазона реагируют на малейшие изменения состояния ионосферы, особенно в области овала полярных сияний, подверженного воздействию высыпавшихся потоков частиц и электрических полей во время геомагнитных бурь/суббурь.

Рис. 6. Влияние космической погоды на средства радиосвязи и навигации



---

## ДЕГРАДАЦИЯ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

---

Глобальные навигационные системы используют сигналы в диапазоне от единиц до десятков ГГц от околоземных спутников. Сама электроника этих аппаратов подвергается воздействию релятивистских электронов радиационных поясов. Но полное количество навигационных спутников в настоящее время настолько велико, что повреждение или даже потеря одного из них сильно не сказывается на качестве навигации в большинстве районов. Физические механизмы влияния возмущений космической погоды на точность приема навигационного сигнала связаны как с ухудшением отношения сигнал-шум из-за природных шумов, так и ионосферных возмущений на радиотрассе от спутникового передатчика к наземному приемнику. Источником первой группы искажений являются возрастания потока солнечного радиоизлучения во время вспышек. Ионосферные неоднородности, рассеивающие навигационный сигнал, наиболее интенсивны в зоне полярных сияний. Таким образом, солнечные вспышки, возрастание потоков высокоэнергичных (сотни кэВ – единицы мэВ) электронов в магнитосфере и мощные авроральные возмущения могут быть источниками ошибок в работе навигационных систем.

Экстремальные солнечные вспышки, происходящие в среднем 1–2 раза за десятилетие, являются источником электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, включая и диапазон сигналов навигационных спутниковых систем, что приводит к ухудшению качества сигнала со спутника, срыву сопровождения сигналов и к серьезной деградации в работе

GPS и ГЛОНАСС. Задача прогноза экстремальных солнечных радиовспышек, хотя и является предметом интенсивных исследований, до сих пор полностью не решена.

Наиболее важным для распространения радиоволн негативным эффектом являются ионосферные мерцания. Особенно опасна зона вблизи экваториальной границы аврорального овала, которая в зависимости от интенсивности бури/суббури может смещаться от авроральных широт к средним. Мерцания амплитуды и фазы сигнала возникают в результате рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации, которые существуют практически всегда в высокоширотной ионосфере, а во время интенсивных геомагнитных возмущений их амплитуда резко возрастает.

---

## ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МАШИНИСТОВ И ОПЕРАТОРОВ

---

Зависимость человека от окружающей среды не вызывает сомнений. Под средой обитания следует понимать не только ландшафт и погоду, но и окружающую электромагнитную обстановку. Изменения в биосфере, геосфере и атмосфере имеют существенную космически обусловленную составляющую, а у всех живых организмов есть определенные функции, поддерживающие равновесие обмена вещества и энергии. При этом изменения в функционировании какой-то из составных частей биосферы неизбежно отражаются на остальных, а изменения в околоземном пространстве заставляют перестраиваться всю биосферу целиком. Экспериментальные исследования указывают на существенное влияние электромагнитных полей на биообъекты и на связь изменений

Рис. 7. Нельзя  
исключить  
негативное влияние  
магнитных бурь  
на машинистов  
и операторов  
железнодорожных  
магистралей на  
высоких широтах



космической погоды с отклонениями в нормальной жизнедеятельности человека<sup>5</sup>. По-видимому, основным агентом-переносчиком перепадов космической погоды в биосферу являются электромагнитные поля. Работы, проведенные медиками, экологами, биофизиками и геофизиками, показывают наличие устойчивых связей между резкими изменениями геомагнитного поля и атмосферного электрического поля и наличием биосферной реакции, т. е. отклонениями функционирования организмов от нормы. Хотя скопилось множество статистически достоверных доказательств влияния космической погоды на биосферу, теории, на основании которой можно было бы удовлетворительно объяснить всю совокупность имеющихся данных, на данный момент не существует. Вероятнее всего, изменения космической погоды воздействуют на биосферу опосредованно, через множество различных факторов. Многие параметры среды обитания уже вышли за пределы коридора экологически беспрепятственного существования человека, так как из-

менения окружающей среды идут настолько быстро, что человек как вид не успевает к ним адаптироваться. Между тем ширина коридора для электромагнитных воздействий до сих пор не установлена, так как физические механизмы воздействия электромагнитных полей на биологические объекты практически не выявлены. Таким образом, нельзя исключить негативное влияние магнитных бурь на машинистов и операторов железнодорожных магистралей на высоких широтах.

## ПРОГНОЗ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

К настоящему времени космическая геофизика достигла уровня, позволяющего ставить вопрос о реальном прогнозе космической погоды. Однако, несмотря на мощный арсенал современной космофизики – солнечные телескопы, космические обсерватории между Землей и Солнцем, сотни спутников на разных орбитах, сети наземных радаров и магнитометров и т.п., проблема мониторинга и прогноза состояния околоземного космического пространства не свелась к чисто «инженерной», и многие фундаментальные вопросы

<sup>5</sup> Бреус Т.К. Влияние «космической погоды» на биологические объекты // Земля и Вселенная. 2009. № 3.



*Рис. 8. Полярное сияние над железнодорожной магистралью. Железнодорожная магистраль Северный Широтный Ход будет проходить через авроральные области, где полярные сияния и сопутствующие возмущения космической погоды являются обыденными*

остаются нерешенными. Так же, как и для других катастрофических геофизических событий, оценка вероятности космических рисков может быть проведена лишь с конечной точностью в пространстве и во времени. Наиболее активные проявления результатов воздействия космической погоды, такие как перегрузка энергетических линий, сбои коротковолновой радиосвязи, нарушения работы железнодорожной сигнализации и пр., наблюдаются в области овала полярных сияний, особенно его экваториальной границы. Для этой области характерны интенсивные ионосферные токи, выпадение заряженных частиц, резкие градиенты и высокий уровень турбулентности ионосферной плазмы, что провоцирует нарушения в работе как наземных технологических систем, так и снижает устойчивость спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. При расширении аврорального овала на средние широты в этот же регион смещается и область повышенных рисков.

Сама возможность прогноза связана с тем, что от возникновения активной области на Солнце до прихода связанного с ней возмущения к Земле про-

ходит конечное время. Первую линию прогноза дают оптические наблюдения Солнца, которые позволяют предсказать возможное возмущение за время переноса плазмы солнечного ветра к границе земной магнитосферы в течение порядка трех дней. Краткосрочный (около 1 часа) и более точный прогноз обеспечивается за счет мониторинга межпланетного пространства спутниками, которые зависли в точке либрации на расстоянии около 1.5 млн км от Земли.

Вопросы надежности работы железнодорожной инфраструктуры и ее защиты от воздействий космической погоды приобретают особое значение в связи с планируемым строительством Северного Широтногохода. Эта железнодорожная магистраль протяженностью более 700 км пройдет через Салехард, Надым и Новый Уренгой и в перспективе дойдет до Норильска. Северный широтный ход войдет в состав транспортной инфраструктуры арктической зоны России. Поскольку эта магистраль будет проходить в области авроральных и субавроральных широт, то на надежность ее работы особое влияние будут оказывать различные проявления космической погоды.

# КОСМОС КАК ПРИРОДНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ



**ПУЛИНЕЦ Сергей Александрович,**

*доктор физико-математических наук*

**ВЕДЕШИН Леонид Александрович,**

*доктор технических наук*

*Институт космических исследований РАН*



DOI: 10.7868/50044394823060038

**В** 1960-е гг. резко повысился интерес в физике космической плазмы – частично ионизированной атмосферы, в которую погружена наша планета, начиная с высоты более 60 км – слой D ионосферы, до высоты 2000 км, где атмосфера превращается в полностью ионизированную плазму, и начинается оболочка, называемая плазмосферой. Первые измерения на искусственных спутниках Земли продемонстрировали, что уровень наших знаний о космической плазме чрезвычайно низок, а прикладные задачи метеорологии, связи, навигации, дистанционного зондирования Земли и других прикладных задач требовали повышения уровня этих зна-

ний. С другой стороны, результаты испытаний ядерного оружия в атмосфере продемонстрировали, что воздействие ионизирующей радиации сильно меняет параметры окружающей среды, вплоть до изменения параметров Глобальной электрической цепи<sup>1</sup>. Это поставило на повестку дня вопрос об искусственном воздействии на окружающую среду, в том числе на

<sup>1</sup> Глобальной электрической цепью в атмосфере называют электрический контур, по которому осуществляется движение атмосферных электрических токов между ионосферой и Землей. См., например, *Markson R. The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years // Bull. Am. Meteorol. Soc., 2007. Vol. 88. P. 223–241.*



*Геофизические ракеты Р-2А и Р-5А для проведения атмосферных, ионосферных и радиофизических исследований. Космодром Капустин Яр*

космическую плазму, с целью исследования физических свойств космической плазмы в верхних слоях атмосферы.

В СССР существовало несколько первоклассных школ по физике плазмы, таких как Новосибирская, возглавляемая академиком Р.З. Сагдеевым, харьковская в Харьковском физико-техническом институте, где после визита И.В. Курчатова уже в 1960-х гг. создавались установки по нагреву плазмы и другим плазменным экспериментам. В Москве в различных институтах работали выдающиеся ученые, занимавшиеся плазменной физикой, одно перечисление фамилий которых заняло бы целую страницу. Все это позволяло говорить, что СССР в эти годы занимал одно из первых мест по исследованию фундаментальных проблем физики плазмы. Однако лабораторные эксперименты с плазмой выявили их существенный недостаток: взаимодействие плазмы со стенками вакуумных камер, в которых проводились экспе-

рименты, что портило результаты экспериментов. Необходимо было создать сложную конфигурацию магнитного поля в центре камеры для удержания плазмы, чтобы она не касалась ее стенок. Тогда-то и появилась идея использовать космическую плазму как природную лабораторию, где с помощью приборов, установленных на космических аппаратах, можно было бы диагностировать процессы корпускулярно-волновых взаимодействий в различных конфигурациях, в том числе при исследовании естественных явлений в ионосфере и магнитосфере Земли без ограничений, накладываемых эффектами стенок камер в лабораторных экспериментах.

В течение нескольких десятилетий в рамках программы «Интеркосмос» (1967–2001) с участием ученых социалистических стран и Франции был организован и проведен ряд международных ионосферно-магнитосферных и активных экспериментов на спутниках, геофизических и метеорологиче-

ских ракетах<sup>2</sup>. Они позволили впервые получить подробные данные об изменении состава атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли. Учеными были также проведены исследования последствий воздействия на природную среду ядерных испытаний в космосе и на Земле, а также выбросов в атмосферу продуктов ядерного распада при авариях на АЭС, химических веществ и малых газовых составляющих. Эти работы позволили создать в странах-участницах программы «Интеркосмос» соответствующие измерительные приборы и электронные ускорители заряженных частиц для выполнения активных космических экспериментов, которые привели к лучшему пониманию физики плазмы и оценки состояния природной среды<sup>3</sup>.

Активные космические эксперименты, проводимые в ионосфере и магнитосфере Земли, предусматривали исследования воздействия на природную среду радиотехнических источников высокочастотного диапазона с калиброванными параметрами. При соответствующей их энергетике проявлялись не только собственные характеристики данной среды, но и ее реакция на осуществляемое воздействие, в том числе на межгеосферные связи. Изучение процессов в магнитосферно-геосферной системе, вызываемых активными воздействиями с использованием мощных радиоволн высокочастотного диапазона относится к числу

интенсивно развивающихся в мире направлений. Крупный российский ученый в области наук о Земле академик Н.П. Лавёров (1930–2016) предлагал рассматривать активные эксперименты при исследовании проблем солнечно-земных связей как комплексный процесс взаимодействия Солнца, литосферы и биосферы Земли<sup>4</sup>. Активные методы исследований широко используются в изучении как электродинамического взаимодействия между ионосферой и магнитосферой, так и неустойчивостей в околоземной плазме, искусственных ионосферных возмущений и их влияния на распространение радиоволн. Возрастание интереса к изучению проблем высокоширотной ионосферы под воздействием мощных коротковолновых радиоволн в значительной степени вызвано, проводимыми в настоящее время исследованиями на нагревных стендах в Норвегии, на Аляске и Пуэрто-Рико (США), Шпицбергене (Великобритания), Сура (Россия) с одновременными измерениями на спутниках<sup>5</sup>.

---

## РАКЕТНАЯ АТАКА

---

Первые эксперименты в ближнем космосе начались еще до запуска первого искусственного спутника Земли с помощью геофизических ракет, первоначально предназначавшихся для измерений параметров атмосферы в целях

---

<sup>2</sup> Ведишин Л.А. Первый по программе «Интеркосмос» (к 50-летию запуска международного спутника «Интеркосмос-1») // Земля и Вселенная, 2019. № 6 (330). С. 64–75. Маринин И.А. Многоликий «Интеркосмос» // Земля и Вселенная, 2023. № 4 (352). С. 50–60.

<sup>3</sup> Грингауз К.И., Серафимов К.Б., Шмеловский К.Г., Шмилауэр К. Ионосферные исследования, выполненные на спутниках и ракетах, запущенных по программе «Интеркосмос». Под ред. Г.С. Нариманова. М.: Машиностроение, 1976. С. 21–47.

<sup>4</sup> Лавёров Н.П., Зецер Ю.И. Активные эксперименты в ионосфере с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2000. С. 11–30.

<sup>5</sup> Макоско А.А. Геофизические и гидрометеорологические процессы катастрофического характера. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИГЕМ РАН, 2007. С. 191–193.

гидрометеорологии. В 1957 г. в СССР для изучения влияния источника высокочастотных электромагнитных волн на ионосферу Земли и распространения радиоволн различных диапазонов начались радиотехнические эксперименты с магнитными или электрическими антеннами (с 1969 г. с ускорителями заряженных частиц) на геофизических ракетах Р-1В, Р-2А и Р-5А на высотах от 100 до 500 км<sup>6</sup>. Почти одновременно с ними начались эксперименты по ионизации, стимулируемой напуском газа и сопровождаемой генерацией альвеновских волн<sup>7</sup>. Несмотря на различные типы активных экспериментов, процессы в плазме были очень похожи: нагрев плазмы, появление электрических полей и токов, ускорение частиц, возникновение когерентных низких частот – особо низких частот (КНЧ-ОНЧ) и альвеновских волн.

Первые ионосферные и активные радиофизические эксперименты по программе «Интеркосмос» были выполнены на геофизических ракетах Р-5В «Вертикаль-1» (28 ноября 1970 г.)

<sup>6</sup> Грингауз К.И., Рудаков В.А. Измерение электронной концентрации в ионосфере по вращению плоскости поляризации радиоволн, излучаемых с ракет // Докл. АН СССР, 1960. Т. 132. № 6. С. 1311–1313. Ведешин Л.А., Рудаков В.А., Рустенбах Ю. О влиянии газовой выделения из ракет «Вертикаль» на ионосферные измерения, проведенные на этих ракетах // Некоторые результаты научных экспериментов на ракетах «Вертикаль-1 и -2» и на спутниках «Интеркосмос-2 и -8». Институт электроники АН ГДР, 1974. С. 184–189.

<sup>7</sup> Поперечные магнитогидродинамические волны плазмы, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля Земли, они вызываются низкочастотными электромагнитными волнами в плазме, распространяющимися вдоль постоянного магнитного поля, при этом плазма также приходит в движение за счет энергии электромагнитного поля, что приводит к многократному понижению скорости распространения волны. Названы в честь шведского астрофизика Х. Альвена, предсказавшего в 1942 г. их существование.

и «Вертикаль-2» (20 августа 1971 г.), запущенных на высоты до 500 км с космодрома Капустин Яр в средних широтах Европейской части СССР. Под руководством профессора К.И. Грингауза (ИКИ РАН) на этих ракетах были осуществлены ионосферные и радиофизические эксперименты по программе «Интеркосмос».

Ионосферные эксперименты на геофизических ракетах «Вертикаль-1 и -2».

| Эксперимент, измеряемый параметр  | Страна    | Прибор и размещение датчиков   |
|---|-----------|--|
| Интенсивность поглощения УФ-излучения Солнца в нескольких спектральных диапазонах | СССР      | Анализатор фотоэлектронов  |
| Интенсивность поглощения в линии $H_{\alpha}$                                     | ГДР       | Ионизационная камера   |
| Концентрация электронов   | СССР, ГДР | Дисперсионный УКВ-радиоинтерферометр 48 и 144 МГц                        |
| Концентрация и температура электронов, $n_e$ и $T_e$                              | СССР      | Зонды Ленгмюра: плоский (на корпусе ракеты) и цилиндрический (на штанге) |
| Частота соударений электронов $E$   | ГДР, СССР | Дисперсионный интерферометр, наземная установка для измерения радиоволн  |

Радиофизические эксперименты проводились во время запуска ракет на различных высотах до 500 км с помощью дисперсионного ультракоротковолнового радиоинтерферометра ( $f_1 = 48$  МГц и  $f_2 = 144$  МГц) и радиочастотного емкостного зонда  $f = 20$  МГц,



а также прецизионной наземной установки для измерения поглощения радиоволн, созданной в ГДР, вблизи старта ракеты на частотах 1.0, 1.5 и 2.0 МГц. В результате экспериментов на ракетах «Вертикаль-1» и «Вертикаль-2» был сделан вывод о том, что при восходе Солнца главная часть поглощения радиоволн падает на область вблизи высот отражения для частот 1.3 и 2.0 МГц, а не во всей толще ионосферы.

Большой интерес ученых вызывали процессы, называемые высыпанием энергичных электронов из радиационных поясов Земли в атмосферу в авроральных широтах и вызывающие полярные сияния. В этой связи начался бум в проведении активных экспериментов с инжектором энергичных электронов – «электронной пушкой» на борту. В январе 1969 г. был выполнен первый активный эксперимент с инъекцией электронов в атмосферу несколькими исследовательскими центрами под руководством доктора В.Н. Хесса на ракете «Аэроб», которая достигла высоты 270 км. Ускоритель электронов с максимальным током 0.5 А и энергией 10 кэВ был направлен вниз и инжектировал вдоль силовой линии серию электронных импульсов длительностью до секунды. При подготовке эксперимента возникали опасения, что при инъекции мощного электронного пучка ракета может зарядиться до потенциала близкого к потенциалу ускорителя и в результате может прекратиться поступление быстрых электронов в ионосферу. Для компенсации электрического заряда, уносимого отрицательно заряженными электронами, ракета была снабжена алюминиевой фольгой площадью 300 м<sup>2</sup>. После выхода ракеты за пределы плотных слоев атмосферы экран разворачивался перпендикулярно силовым линиям и служил собирающей поверхностью для тепловых электро-



*Прецизионная наземная установка для измерения поглощения радиоволн, созданная в ГДР, вблизи старта ракеты на космодроме Капустин Яр. Фото из ст. Грингауз К. И., Серафимов К. Б., Шмеловский К. Г., Шмилауэр К. Ионосферные исследования, выполненные на спутниках и ракетах, запущенных по программе «Интеркосмос». По программе «Интеркосмос» под ред. д.ф.-м.н. Г. С. Нариманова. М., Машиностроение, 1976. С. 25*

нов, которые могли компенсировать заряд, уносимый быстрыми электронами пучка. Телевизионная аппаратура зарегистрировала светящиеся траектории электронных пучков, которые можно рассматривать как искусственные сияния лучевой формы. Четыре луча диаметром около 100 м были зарегистрированы двумя станциями<sup>8</sup>. 13 августа

<sup>8</sup> Hess W.N., Trichel M.C., Davis T.N. et al. Artificial Aurora Experiment. Experiment and Principal Results // Geophys. Res., 1971. Vol. 76. P. 6067–6081.

1970 г. группой Дж. Р. Винклера (США) был проведен следующий активный эксперимент. Отсек с измерительной аппаратурой располагался в головной части ракеты и отстреливался перед включением «электронной пушки», в дальнейшем он следовал по близкой траектории с основной части ракеты. Электронный пучок инжектировался из Северного полушария в Южное вдоль силовой линии магнитосферы. Всего было инжектировано 3000 импульсов энергией около 45 кэВ и длительностью 16 мс, регистрировались электроны, вернувшиеся после отражения в Южном полушарии от верхних слоев атмосферы. Основным результатом эксперимента следует считать прямое доказательство непрерывности силовой линии, расположенной достаточно далеко от поверхности Земли, и отсутствии значительных потерь энергии при прохождении пучком в магнитосфере расстояний в несколько десятков тысяч километров, обнаружено излучение, возбуждаемое электронным пучком в интервале частот 1–10 МГц.

В мае 1973 г. в СССР был проведен активный эксперимент «Зарница-1» на метеорологической ракете МР-12 со специальным ускорителем электронов. До сих пор космические эксперименты велись пассивно, фиксировалось только развитие естественных процессов и явлений в околоземном пространстве. Основная подготовительная работа и координация групп наблюдения осуществлялась лабораторией ИЗМИРАН<sup>9</sup>. Ускоритель электронов был поднят на ракете на высоту 160 км и на высоте 100 км «электронная пушка» начала инъекцию электронов длительностью в секунду и с интервалом в секунду, посылая импуль-

сы в ионосферу сверху вниз вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Ток электронов составлял 0.5 А, энергия – 7.5–10 кэВ при мощности пучка около 4 кВт. Эксперимент продолжался на восходящей и нисходящей траекториях полета ракеты в течение 232 с, вызывая свечение неба, родственное полярному сиянию. С помощью телевизионной аппаратуры фотографировалось свечение, вызываемое электронными пучками в диапазоне высот 100–160 км. В результате было получено свыше 300 фотографий искусственного полярного сияния. Удалось выявить особенности прохождения электронного пучка и тонкую структуру лучевых форм сияния. Отчетливо наблюдалось перемещение ограниченного в пространстве свечения, вытянутого вдоль силовой линии, а также было обнаружено радиоизлучение на частоте 44.5 МГц<sup>10</sup>. Важной технической деталью эксперимента «Зарница-1» было отсутствие специальных приспособлений для снятия заряда, уносимого электронным пучком. Было показано, что компенсация положительного заряда обеспечивается металлической поверхностью самой ракеты.

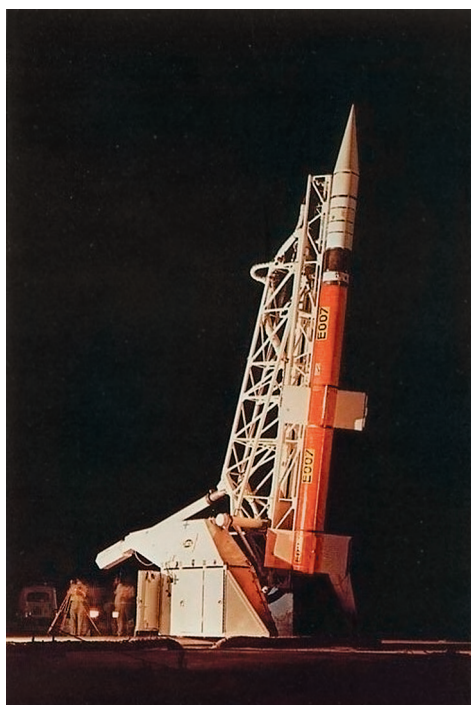
В 1975 г. в соответствии с Межправительственным соглашением о сотрудничестве в освоении и изучении космоса в мирных целях между СССР и Францией в рамках программы «Интеркосмос» был организован и проведен совместный российско-французский эксперимент «Аракс» (ARAKS – Artificial Radiation and Aurora at Kerguelen and Sogra – искусственное излучение и полярное сияние в Кергелене и Согре)<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Сагдеев Р. З., Жулин И. А. Активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере // ДАН СССР, 1975. Т. 12. С. 874.

<sup>11</sup> Жулин И. А., Камбу Ф., Сагдеев Р. З. Активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере // Наука и человечество. М.: Знание, 1977. С. 216–233.

<sup>9</sup> Сегодня Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН.

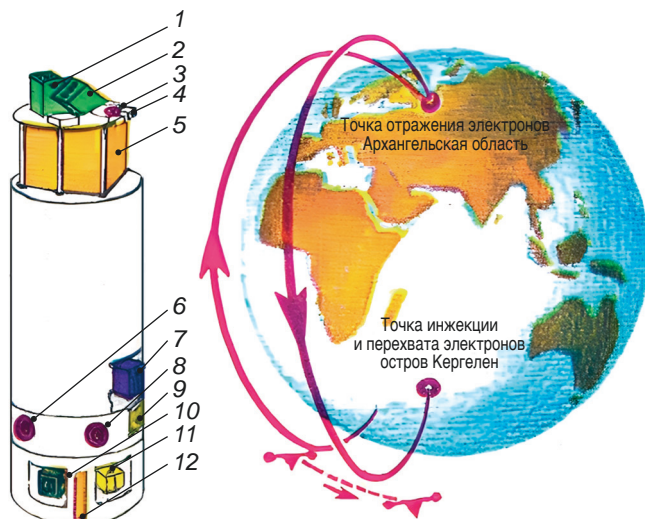
В подготовке и осуществлении эксперимента «Аракс» участвовали многие научно-технические коллективы СССР и Франции, были организованы наземные наблюдения в Архангельской области и на о. Кергелен. Руководителями эксперимента с советской стороны были директор ИКИ АН СССР академик Р. З. Сагдеев и заместитель директора ИЗМИРАН доктор физико-математических наук И. А. Жулин, а с французской стороны – доктор Ф. Камбу. Цель эксперимента «Аракс» состояла в изучении процессов в магнитосфере и ионосфере Земли, сопровождающих искусственную инжекцию электронов в ионосферу. Для реализации проекта с о. Кергелен были запущены две французские твердотопливные ракеты «Эридан» с советским ускорителем электронов, с помощью которого на высотах 150–200 км в околоземное пространство инжектировалась струя электронов с энергиями 27 и 15 кэВ при силе тока 0.5 А под различными углами к магнитной силовой линии. Генератор плазмы выбрасывал струю цезиевой плазмы для компенсации положительного заряда ракеты, создаваемого при инжекции электронного пучка. С помощью приемных устройств на борту судна «Боровичи» в районе о. Кергелен осуществлялся прием телеметрической информации с советского прибора «Спектр», который регистрировал волновые излучения. Уникальность эксперимента «Спектр» состояла в том, что высокочастотные излучения, генерируемые электронным пучком, принимались с помощью широкополосного приемника, что позволяло определять спектр излучения от каждого импульса в диапазоне частот 0.1–4 МГц. На ракетах был установлен комплекс советских и французских приборов для детектирования заряженных частиц и волн общей массой 400 кг, которые регистрировались также и наземными приборами.



*Ракета «Эридан» на стартовом комплексе перед запуском (российско-французский эксперимент «Аракс»). Фото из статьи Жулин И. А., Камбу Ф., Сагдеев Р. З. Активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере*

26 января 1975 г. произведен пуск первой ракеты «Эридан» в направлении на север вдоль магнитного меридиана. Изучались процессы, связанные с искусственным полярным сиянием, а также результаты взаимодействия волн и частиц. Силовая линия, которая связывает остров Кергелен с Северным полушарием проходит через Архангельскую область, поселок Согра. Именно регистрация пучково-волнового взаимодействия между Кергеленом и Согрой было основной целью этого эксперимента. В результате учеными зафиксировано полярное сияние и впервые замечено, что вблизи ракеты происходит нагрев плазмы. Во время пуска второй ракеты 15 февраля 1975 г., который был направлен на геомагнит-

Схема проведения эксперимента «Аракс». Стрелками показано движение электронного пучка в магнитосфере Земли при его движении в северное полушарие и обратно. Внизу показан дрейф геомагнитной трубки за время путешествия электронного пучка в магнитосфере. Иллюстрация из статьи Фото из статьи Жулин И. А., Камбу Ф., Сагдеев Р. З. Активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере



ный восток, изучался азимутальный дрейф электронов и электрическое поле Земли. С помощью радиолокационных установок удалось определить истинное положение магнитосопряженной точки, в которой было вызвано искусственное полярное сияние. В ходе эксперимента стало известно о сложных взаимодействиях электронного пучка с окружающей средой, получены новые данные о процессах, связанных с движением электронов в электрическом и магнитном полях, а также о плазме околоземного пространства<sup>12</sup>. В ходе второго запуска французский радиоспектрометр вышел из строя, и информация об излучениях электронного пучка принималась только с помощью аппаратуры «Спектр»<sup>13</sup>. Комплексные спектрограммы высокочастотных излучений, зарегистрированных во время первого и второго за-

пусков ракеты «Эридан» аппаратурой «Спектр».

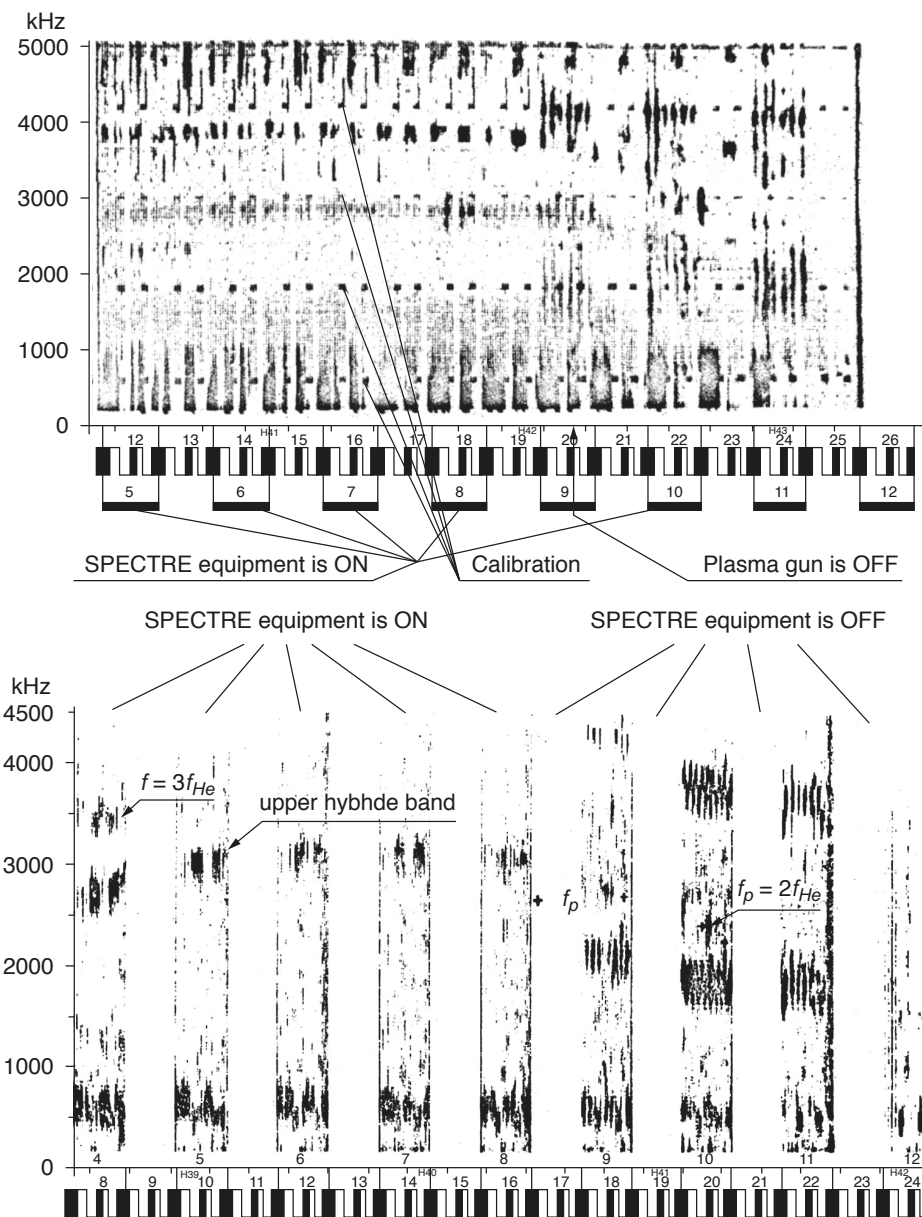
Через два года был осуществлен немецкий эксперимент «Porcupine» (дикобраз) с международным участием. Выполнены три ракетных запуска, первый в марте 1977 г. и два остальных в марте 1979 г. В экспериментах от основной ракеты отделялись уже не один, а четыре контейнера: с инжектором ионов ксенона и три с диагностической аппаратурой<sup>14</sup>. Одним из основных результатов эксперимента стало возбуждение колебаний на водородных гиро-частотах (частотах вращения протонов вокруг геомагнитной силовой линии), что показало, что инжекция плазмы может возбуждать собственные ионные колебания ионосферы.

В дальнейшем ракетные активные эксперименты проводились и в других странах в разных конфигурациях. Один из последних советских экспериментов «Электрон-1» состоялся

<sup>12</sup> Dechambre M., Lavergnat J., Kusnerevsky Yu.V., Pulinets S.A., Zhulin I.A. The waves observed in the ARAKS-North experiment. *Advance Space Research*, 1981. Vol. 1. P. 89–95.

<sup>13</sup> Kusnerevsky Yu.V., Pulinets S.A. The waves observed in the ARAKS East experiment. *Advance Space Research*, 1981. Vol. 1. P. 97–101.

<sup>14</sup> Kintner P.M., Kelley M.C. Plasma Waves Produced by the Xenon Ion Beam Experiment on the Porcupine Sounding Rocket, in: *Artificial Particle Beams in Space Plasma Studies*. Springer: Boston MA, 1982. P. 199–206.



Вверху – динамический спектр высокочастотного излучения, зарегистрированного аппаратурой «Спектр» во время запуска ракеты «Эридан» на Север, внизу – динамический спектр высокочастотного излучения, зарегистрированный аппаратурой «Спектр» во время запуска ракеты «Эридан» на Восток. На обеих панелях видно возбуждение сигналов синхронно с импульсами электронной пушки в различных частотных участках высокочастотного спектра. Иллюстрация из статьи С. А. Пулинец, Высокочастотное излучение электронного пучка, инжектируемого в ионосферу, в сборнике «Проект АПЭКС, научные задачи, моделирование, методика и техника проведения эксперимента», сборник докладов. Международная конференция по программе «Интеркосмос», Липецк, 12–16 ноября 1990 г., Москва, Наука. 1992, с. 124–135

в 1989 г. на метеорологической ракете МР-12 в районе г. Волгограда. Для ракеты МР-12 были разработаны и изготовлены оригинальные автономные, отделяемые зондовые контейнеры, обеспечивающие наряду с бортовой аппаратурой приборного отсека ракеты регистрацию параметров области взаимодействия электронного пучка с плазмой. В соответствии с названием с борта ракеты проводилась инъекция энергичных электронов. Зафиксировано зажигание пучково-плазменного разряда на высотах от 150 км в апогее и до 90 км на нисходящей части баллистической траектории, проведены измерения параметров зарядки и нейтрализации ракеты в периоды инъекции электронных пучков в ионосферу, в также структуры области пучково-плазменного разряда. Также было осуществлено трассирование радиоволн через область инъекции электронного пучка с расстояния 850 км и зарегистрировано их отражение от области пучково-плазменного разряда под углом  $60^\circ$  к направлению трассирования радиоволн через ионосферу на расстоянии 450 км от области разряда<sup>15</sup>.

Среди более поздних ракетных активных экспериментов следует упомянуть эксперименты *Flaksus* и «Северная звезда», проведенные Институтом динамики геосфер РАН и университетом Джона Хопкинса (США), суть которых как нельзя лучше подходит к названию данного раздела, поскольку выброс алюминиевой плазмы в ионосферу проводился с помощью взрывного кумулятивного генератора ВГПС-300. Ракеты запускались в 1997 г. на полигоне Капустин Яр (*Flaksus*) на высоту 140 км и на Аляске на полигоне *Chatanika*

(«Северная звезда») на высоты 270 и 360 км. Они выполнялись ночью, чтобы исключить влияние солнечного излучения на процесс взаимодействия в период низкой гелиогеофизической активности. Целью этих экспериментов являлось исследование процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей средой и геомагнитным полем, процессов генерации ионосферных возмущений разных пространственных и временных масштабов, а также определение характеристик этих процессов. Инъекция плазменных струй с заранее известными параметрами позволила, в том числе, верифицировать теоретические модели взаимодействия потоков плазмы со средой в максимально контролируемых условиях эксперимента, выгодно отличаясь от анализа данных мониторинга естественных процессов<sup>16</sup>.

Подводя итог, мы можем сказать, что активные эксперименты на высотных ракетах дали большой объем научной информации в области плазменно-волнового взаимодействия, вариаций электрического потенциала космических аппаратов и ракет при инъекции электронных и ионных пучков и способов их нейтрализации. Однако все это касалось области нижней ионосферы, тогда как основную динамику ионосферы определяет область F (130–1300 км), максимум ионизации которой находится на высотах порядка 350 км. Кроме того, эксперименты проводились только на ряде геофизических полигонов и не позволяли определить глобальный отклик ионосферы и магнитосферы, что достижимо только с помощью искусственных спутников Земли.

<sup>15</sup> Быковский В. Ф. Активный ракетный эксперимент «Электрон-1» с инъекцией электронных пучков в ионосферу. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук // ОИЯИ, 2007. С. 22.

<sup>16</sup> Зецер Ю. И., Поклад Ю. В., Erlandson R. E. Активные эксперименты в ионосфере на высотах 140–360 км. Анализ результатов оптических наблюдений // Физика Земли, 2021. № 5. С. 184–201.

## ОРБИТАЛЬНЫЕ АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Изучение процессов, происходящих в верхней атмосфере и ионосфере Земли, в рамках программы «Интеркосмос» проводились в 1969–2001 гг. на ряде космических аппаратов в период до прекращения сотрудничества социалистических стран по программе «Интеркосмос». В совместных экспериментах принимали участие ученые Болгарии, ГДР, СССР, ЧССР, Польши, Румынии, Кубы, а также западных стран, таких как Австрия, Франция, Швеция, а также Индия. Одним из первых таких экспериментов был проведен на спутнике «Интеркосмос-2», запущенном 25 декабря 1969 г. с космодрома Капустин Яр на эллиптическую орбиту высотой  $206 \times 1200$  км, наклоном  $48.4^\circ$  и периодом обращения 98.5 минут. В эксперименте проводились измерения параметров ионосферной плазмы на различных высотах от 200 до 1200 км в области средних геомагнитных широт и экваториальной области<sup>17</sup>. Подробную информацию о научных результатах программы «Интеркосмос» можно найти в публикации<sup>18</sup>.

Из ряда научных результатов программы «Интеркосмос» выделяется крупный космический эксперимент проекта «Интершок» по изучению структуры и характеристик ударной волны и магнитопаузы, возникающих при взаимодействии солнечного

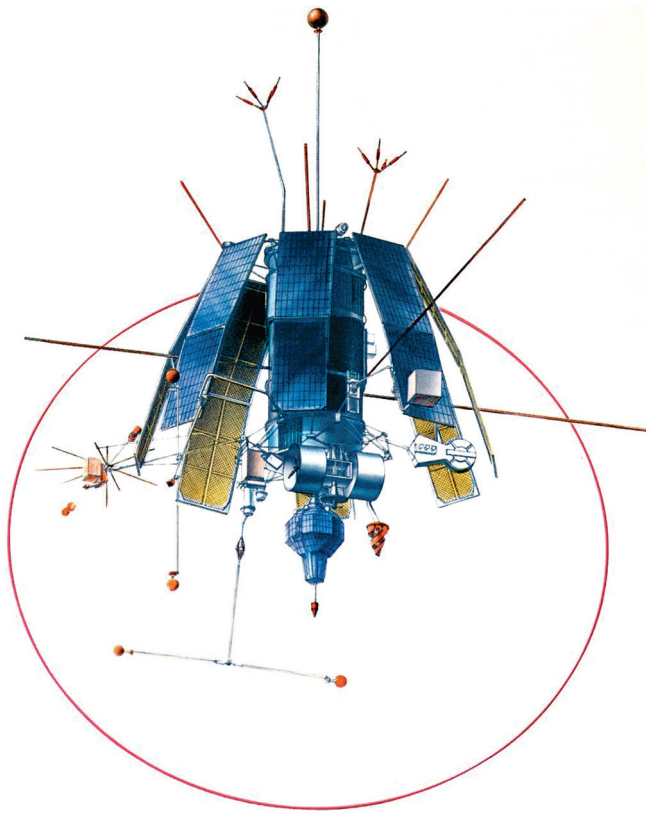
ветра с магнитосферой Земли. Он был осуществлен на спутнике «Интеркосмос-23» («Прогноз-10») с набором советско-чехословацкий научной аппаратуры, запущенном 26 апреля 1985 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Молния-М». В эксперименте «Интершок» были получены уникальные научные данные, существенно расширившие представления о магнитосфере Земли и солнечно-земных связях. Результатом, выполненных экспериментов стала реализация комплексной программы исследования бесстолкновительных ударных волн на всех ее этапах<sup>19</sup>.

В СССР первый реально активный эксперимент выполнен на спутнике «Интеркосмос-24», запущенный 28 сентября 1989 г. с помощью ракеты-носителя «Циклон-3» с космодрома Плесецк на орбиту высотой  $500 \times 2500$  км, наклоном  $82.5^\circ$  и периодом обращения 116 минут. Целью запуска были комплексные исследования распространения электромагнитных волн в диапазоне особо низких частот (ОНЧ) в магнитосфере Земли и их взаимодействия с энергичными заряженными частицами радиационных поясов. На борту спутника был установлен мощный низкочастотный передатчик с магнитной рамочной антенной диаметром 20 м, с помощью которых планировалось излучение мощных радиоволн в диапазоне ОНЧ. Такое активное воздействие на окружающую плазму могло возбуждать эффекты не только в ионосфере, но и в магнитосфере Земли, отсюда и название проекта – «Активный».

<sup>17</sup> Ведешин Л.А., Крошкин М.Г. Ионосферный эксперимент на спутнике «Интеркосмос-2» // Вестник АН СССР, 1971. № 3. С. 37–42.

<sup>18</sup> Ведешин Л.А. Международное сотрудничество в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях (К 55-летию программы «Интеркосмос») // Исследование Земли из космоса, 2023. № 2. С. 1–7.

<sup>19</sup> Галеев А.А., Вумба В., Вайсберг О.Л., Фишер С., Застенкер Г.Н. Проект «Интершок» – исследование тонкой структуры ударных волн в космической плазме: цели, задачи, методы // Космические исследования, 1986. Т. 24. Вып. 2. С. 147–150.



Спутник «Интеркосмос-24» («Активный»),  
запущенный 28 сентября 1989 г.  
с космодрома Плесецк

Кроме аппаратуры активного воздействия на спутнике были установлены небольшой передатчик с электрической антенной, источник напуска газа ксенона для изучения альвеновской ионизации, диагностический плазменный комплекс для измерения температуры и массового состава ионосферной плазмы, комплекс НВК-ОНЧ для измерения волн в частотном диапазоне 8–20 кГц, датчик потоков электронов с энергией 20–200 кэВ<sup>20</sup>. На спутнике

<sup>20</sup> Михайлов Ю. М., Еришова В. А., Ростэ О. З., Шульчишин Ю. А., Шмилауер Я., Капустина О. В., Кочнев В. А. Низкочастотные волновые и масс-спектрометрические

также находился специальный передатчик «Маяк», изготовленный в ЧССР, работавший на двух когерентных частотах для измерения интегральной концентрации электронов в столбе сечением 1 кв. м ионосферной плазмы от спутника до приемной станции.

В подготовке аппаратуры и анализе результатов измерений участвовали специалисты Болгарии, Венгрии, Германии, Польши, России, Словакии и Чехии. Активные эксперименты, проводимые спутником, способствовали нагреву ионосферной плазмы и возникновению квазистатических полей, ускорению частиц и возбуждению ультранизкоча-

стотных (УНЧ) когерентных низкочастотных волн. Возбуждение ОНЧ-волн в окрестности спутника на расстоянии 1000 км в паузе между импульсами ОНЧ-генератора имело место в результате взаимодействия ОНЧ-волн, излучаемых генератором, с электронами и ионами внешнего радиационного пояса. ОНЧ-волны частично подпитывались за счет энергии ионов и электронов радиационных поясов. «Интеркосмос-24» должен был значительно расширить имевшуюся на тот момент информацию о плазменной оболочке Земли, расположенной на высотах от 100 до 500 000 км, и о ее взаимодействии с земной магнитосферой.

измерения на спутнике «Интеркосмос-24» // Геомагнетизм и аэрономия, 1994. Т. 34. № 2. С. 68–77.



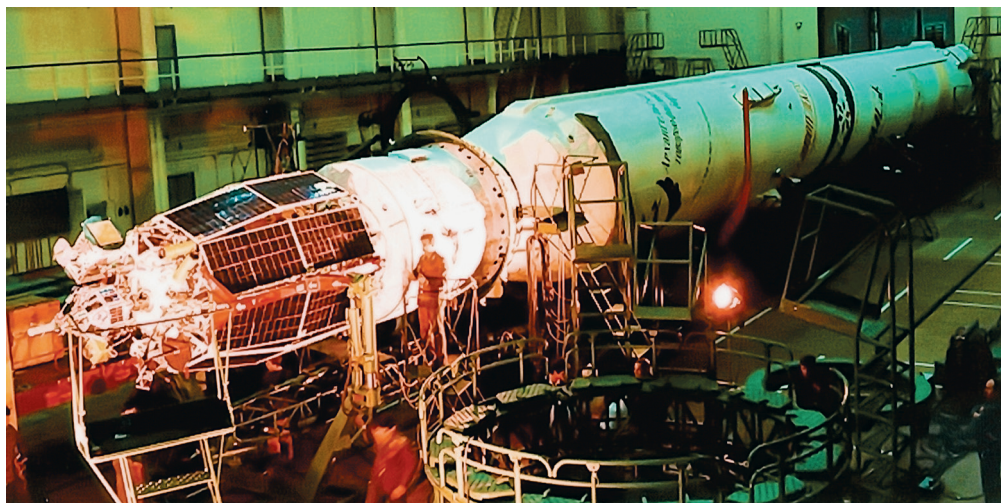
Ученые рассчитывали оценить, как на околоземной плазме сказываются многочисленные процессы: возмущение от магнитных бурь, влияющих на самочувствие человека, высыпание частиц полярных сияний, воздействие множества радиопередатчиков, создающих вокруг планеты ореол радиоизлучений, разряды молний. Для более точного и детального исследования волновых процессов в паре со спутником должен был работать вместе с созданным в ЧССР субспутником «Магион-2». Научную аппаратуру для обоих аппаратов разработали в Советском Союзе, Венгрии, Болгарии, Чехословакии, ГДР, Польше и Румынии. Планировалось, что субспутник в течение нескольких месяцев после отделения от основного аппарата будет совершать полет в непосредственной близости от него на расстоянии от нескольких метров до 10 км. К сожалению, оказалось, что передатчик с магнитной антенной вместо 5 кВт имеет мощность всего лишь 5–7 Вт, в зависимости от частоты излу-

чаемой волны. Обнаружилось, что в паузе между импульсами передатчика мощность, измеряемая аппаратурными КНЧ-ОНЧ- и ОНЧ-2-комплексами, втрое больше мощности самого передатчика, явление назвали «эхом передатчика». Целью активных экспериментов было искусственное создание вторичных электромагнитных волн при помощи источников радиоизлучения, установленных на борту космического аппарата. Из-за неполадок двигательной установки и ОНЧ-генератора выполнить всю программу не удалось. Вскоре после запуска «Интеркосмос-24» было объявлено о намерении продолжить активные исследования плазменной оболочки Земли и с этой целью реализовать в первой половине 1990-х гг. в проекте «Активный-2». В 1990 г. данный проект был переименован в АПЭКС (Активные Плазменные Эксперименты).

Следующим активным спутником стал «Интеркосмос-25» проекта АПЭКС, выведенный 18 декабря 1991 г.

---

*Ракета-носитель «Циклон-3» со спутником «Интеркосмос-25» и субспутником «Магион-3» (впереди слева) в монтажно-испытательном корпусе космодрома Плесецк. Космические аппараты запущены 18 декабря 1991 г. по проекту АПЭКС*



на орбиту высотой  $440 \times 3080$  км, наклонением  $82.5^\circ$  и периодом обращения 122 минуты. Целью запуска были комплексные исследования возбуждения электромагнитных волн в диапазоне особо низких и высоких частот с помощью «электронной пушки», аналогичной той, что использовалась в 1975 г. в эксперименте «Аракс». Для нейтрализации корпуса спутника осуществлялась инжекция нейтрального газа ксенона. Комбинация различных режимов работы «электронной и плазменной пушек» позволяла осуществлять исследования взаимодействия электромагнитных волн и заряженных частиц в ионосфере и магнитосфере Земли. Часть научных приборов спутника стала повторением и модернизацией аналогичной аппаратуры «Интеркосмос-24». В ходе эксперимента проводились исследования электрических полей и токов, посредством которых происходит взаимодействие ионосферы и магнитосферы, а также потоков заряженных частиц вдоль силовых линий геомагнитного поля<sup>21</sup>.

Через 10 дней после запуска спутника «Интеркосмос-25» от него отделился микроспутник «Магион-3», разработанный специалистами из Чехословакии. Его научная аппаратура позволяла проводить измерения практически того же набора физических величин, что и на основном аппарате. Субспутник на этот раз не имел корректирующего двигателя, и его удержание на расстоянии 10–100 м обеспечивалось двигательной установкой основного аппарата. В зависимости от режима работы ускорителя электронов воз-

никали различные неустойчивости и возбуждались МГД-волны или УНЧ-ОНЧ-волны. В течение одного года на нем проводились активные эксперименты, в том числе стимулирование с помощью электронной пушки высыпания электронов из радиационных поясов для изучения процессов, сопровождающих геомагнитные бури<sup>22</sup>. В первом эксперименте удалось показать, например, что рассеяние энергии, излучаемой электронным пучком (8 кэВ, 100 мА), сопровождается созданием местной напряженности электрического поля величиной около 100 В/м, хотя обычное электрическое поле в магнитосфере достигает значений только 10 мВ/м. Во втором эксперименте выброс частиц производился с одного спутника, но высыпание электронов из радиационных поясов затем успешно наблюдалось на обоих спутниках одновременно<sup>23</sup>.

Исследования на «Интеркосмосе-25» оказались достаточно успешными: все научные приборы работали нормально. Удалось провести серию активных экспериментов по излучению пучков плазмы и электронов и их регистрации на субспутнике «Магион-3». После прекращения в 1991 г. программы «Интеркосмос» международные эксперименты на спутнике «Интеркосмос-25» по исследованию межгеосферных связей наземными

<sup>21</sup> Baranets N.V., Ruzhin Y.Y., Afonin V.V., Oraevsky V.N., Pulinets S.A., Dokukin V.S., et al. Active experiment in space for investigation of beam plasma interactions. Results of the APEX project. *Adv. Space Res.*, 1999. Vol. 24. P. 981–984.

<sup>22</sup> Васьков В.В., Будько Н.И., Гдалевич Г.Л., Капустина О.В., Комраков Г.П., Марсов А.Н., Михайлов Ю.М., Прутенский И.С., Рябова Н.А. Обнаружение на спутнике «Интеркосмос-24» ОНЧ- и КНЧ- волн, возбуждаемых в ионосфере мощным КВ-радиоизлучением станда «Сура» // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1995. Т. 35. № 1. С. 98–106.

<sup>23</sup> Baranets N.V., Ruzhin Y.Y., Afonin V.V., Oraevsky V.N., Pulinets S.A., Dokukin V.S., et al. Active experiment in space for investigation of beam plasma interactions. Results of the APEX project. *Adv. Space Res.*, 1999. Vol. 24. P. 981–984.

и космическими средствами продолжались<sup>24</sup>. Отличительной чертой этого спутника, по сравнению с другими космическими аппаратами данной серии, стал прием бортовой научной информации не только в странах-членах организации «Интеркосмос», но и в США, Бразилии, Канаде, Финляндии, Японии.

---

## МОЖЕМ ЛИ МЫ НАГРЕТЬ ИОНОСФЕРУ?

---

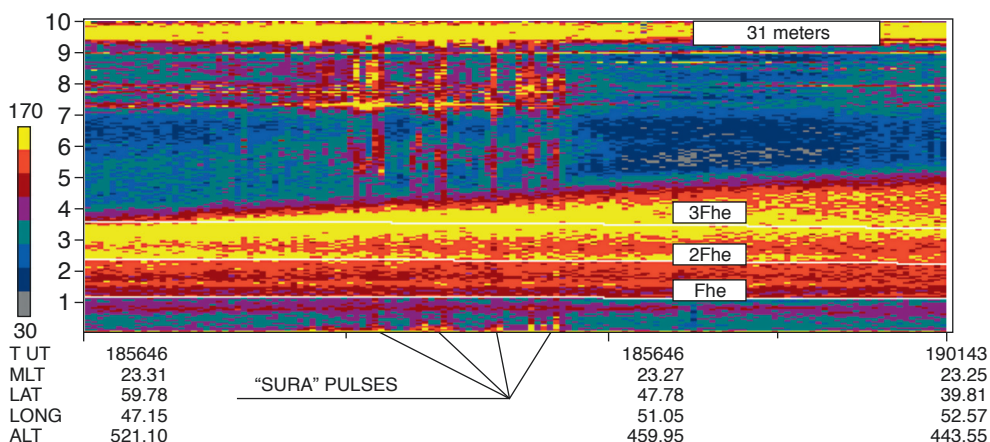
В последние годы в сети Интернет ходит страшилка по поводу ужасных эффектов, создаваемых в окружающей среде с помощью американской установки HAARP (High-frequency Active Auroral Research Program – программа исследования высокочастотных активных полярных сияний), расположенной на Аляске. На самом деле это одна из подобных установок, разработанных для экспериментов по активному воздействию на ионосферу, которыми обладают разные страны, в том числе и Россия. В эру активного увлечения активными экспериментами в рамках сотрудничества между СССР (а потом Россией) и США регулярно проводились Суздальские симпозиумы по нагреву ионосферы мощным радиоизлучением. Они входили в официальный календарь мероприятий, проводимых международным союзом радиосвязи УРСИ. Долгое время научным руководителем программы с российской стороны был академик В. В. Мигулин<sup>25</sup>. Сутью этих экспериментов является

создание в ионосфере модифицированной области диаметром 50–100 км, установкой, называемой нагревным стендом, состоящей из набора дипольных антенн, работающих в диапазоне высоких частот 1–10 МГц. Антенны запитываются мощным сигналом порядка нескольких МВт, который с помощью фазовой фокусировки сигналов, излучаемых каждой из антенн, может создавать поле электромагнитного излучения в ионосфере, мощность которого составляет несколько гигаватт. Описание результатов подобных исследований выходит за рамки настоящей публикации, т.к. здесь мы рассматриваем только космические эксперименты. Но дело в том, что спутник может посмотреть сверху, что происходит в ионосфере над областью воздействия нагревного стенда. Это не просто, поскольку нагрев ионосферы проводится на частотах ниже критической частоты ионосферы, когда радиосигнал отражается от ионосферы, происходящей при распространении сигналов радиовещательных диапазонов. Оказалось, что при нагреве часть энергии передается частицам плазмы (в основном, электронам), которые проходят через барьер непрозрачности и проникают во внешнюю ионосферу, где могут быть зарегистрированы спутниковой аппаратурой. Подобные эксперименты проводились с российским нагревным стендом «Сура», расположенным вблизи Нижнего Новгорода. Спутники для активных экспериментов «Интеркосмос-24» («Активный») и «Интеркосмос-25» (АПЭКС) проводили измерения над «Сурой» во время работы нагревного стенда. Так на спутнике «Активный» было отмечена генерация в ионосфере КНЧ- и ОНЧ-волн под воздействием

---

<sup>24</sup> Prech L., Ruzhin Y.Y., Dokukin V.S., Nemecek Z., Safrankova J. Overview of APEX Project Results // Front. Astron. Space Sci., 2018. Vol. 5. P. 46.

<sup>25</sup> Труды III Симпозиума УРСИ по модификации ионосферы мощным радиоизлучением (ИСИМ-3), Суздаль, СССР, 9–13 сент. 1991. Ред. В. В. Мигулин. М.: ИЗМИРАН, 1991.



Динамический спектр плазменных шумов, зарегистрированных на спутнике АПЭКС во время пролета над стендом «Сура» 14 июня 1992 г. Иллюстрация из статьи Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н., Прутенский И. С., Пулинец С. А., Кирага А., Клос Э. Возникновение плазменных шумов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы по данным спутника «АПЭКС»

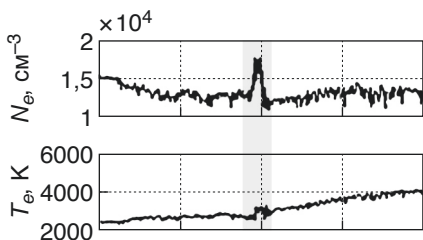
излучения стенда<sup>26</sup>. Одним из наиболее интересных результатов, полученных на спутнике АПЭКС при его пролете над нагревным стендом «Сура», явилось обнаружение широкополосного радиоизлучения при воздействии на ионосферу мощного излучения на частоте ниже критической частоты ионосферы<sup>27</sup>. Излучения ниже критической частоты не могут проникать во внешнюю ионосферу, но при воздей-

ствии мощного излучения создавались потоки ускоренных электронов, которые, проникнув выше максимума электронной концентрации, генерировали широкополосное излучение, регистрируемое на высоте 500 км орбиты спутника АПЭКС.

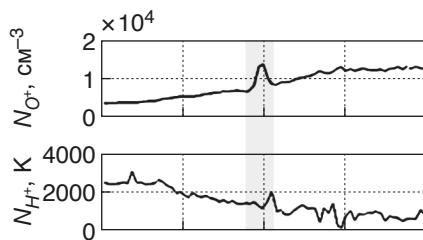
В 1994 г. при пролете спутника «Корона-И» над работающим стендом «Сура» были зарегистрированы излучения на 3 и 5 гармониках гирочастоты электронов. Результат, полученный на спутнике АПЭКС, был подтвержден более чем через 10 лет на французском спутнике DEMETER (запущен 29 июня 2004 г.), о том, что излучение, зарегистрированное на спутнике АПЭКС, связано с потоками частиц электронов и ионов. На спутнике DEMETER регистрировалась повышенная концентрации электронов и ионов водорода и кислорода, а также повышение электронной температуры, когда спутник находился в магнитосферной трубке, опира-

<sup>26</sup> Васьков В. В., Бутько Н. И., Гдалевич Г. Л., Капустина О. В., Комраков Г. П., Маресов А. Н., Михайлов Ю. М., Прутенский И. С., Рябова Н. А. Обнаружение на спутнике «Интеркосмос-24» ОНЧ- и КНЧ-волн, возбуждаемых в ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стенда «Сура» // Геомагнетизм и аэронавигация, 1995. Т. 35. № 1. С. 98–106.

<sup>27</sup> Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н., Прутенский И. С., Пулинец С. А., Кирага А., Клос Э. Возникновение плазменных шумов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы по данным спутника «АПЭКС» // Геомагнетизм и аэронавигация, 1995. Т. 35. № 1. С. 154–158.



|          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Долгота  | 49.8     | 47.9     | 45.8     | 43.1     | 39.6     |
| Широта   | 44.6     | 49.5     | 54.4     | 59.3     | 64.1     |
| Время UT | 18:13:46 | 18:15:08 | 18:16:30 | 18:17:52 | 18:19:13 |



|          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Долгота  | 49.8     | 47.9     | 45.8     | 43.1     | 39.6     |
| Широта   | 44.6     | 49.5     | 54.4     | 59.3     | 64.1     |
| Время UT | 18:13:46 | 18:15:08 | 18:16:30 | 18:17:52 | 18:19:13 |

Результаты измерений концентрации электронов  $N_e$  и основных (на высоте орбиты спутника) ионов  $N(O^+)$  и  $N(H^+)$ , а также температуры электронов  $T_e$ , выполненных бортовой аппаратурой ИСЗ DEMETER. По горизонтальной оси отложены координаты спутника и всемирное время, соответствующее его положению. Источник: Белов А. С., Марков Г. А., Фролов В. Л., Парро М., Шевцов Б. М., Бычков В. В. Воздействие мощным КВ радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда «Сура» на локальные ионосферно-магнитосферные связи // Докл. V международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», Петропавловск-Камчатский, 2010

ющейся на местоположение стенда «Сура»<sup>28</sup>.

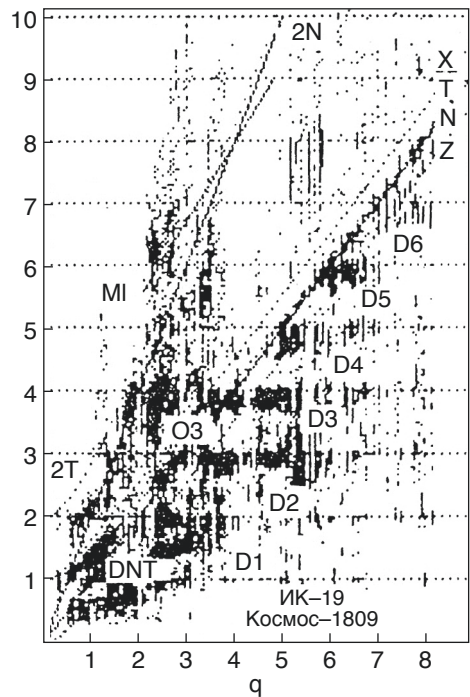
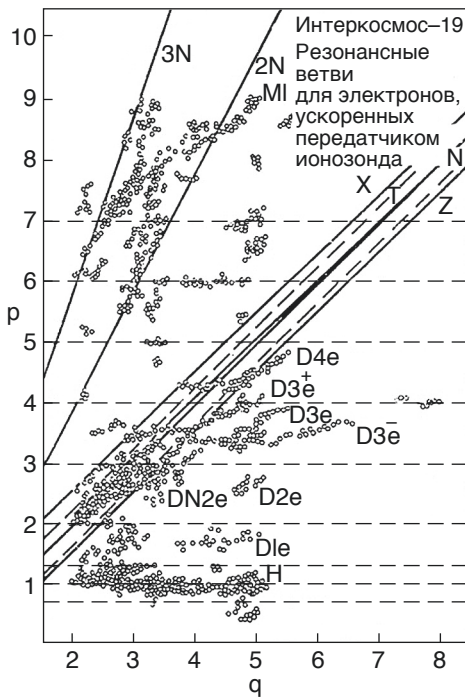
Отвлекаясь от экспериментов с нагревными стендами, хотелось бы остановиться еще на одном интересном результате, полученном в эксперименте АПЭКС, – ускорении электронов при искусственной инжекции со спутника до величин нескольких кэВ в очень узком питч-угле (менее  $10^\circ$ )<sup>29</sup>. Окончательно механизм создания таких пучков не был установлен, и были предложены два варианта: ускорение

электронов, инжектируемых электронной пушкой со спутника АПЭКС или электронов окружающей среды за счет пучково-плазменного взаимодействия; аномальное высыпание частиц кольцевого тока, индуцированное взаимодействием пучка и плазмы. Этот результат перекликается с данным по модификации ионосферы мощным радиоизлучением, неожиданно полученными при анализе результатов ионосферного зондирования с помощью спутникового ионозонда ИС-338<sup>30</sup>. Оказалось, что резонансное воздействие мощных импульсов спутникового ионозонда тоже приводит к резонансному ускорению частиц до энергий порядка 1 кВ. Ускоренные электроны реги-

<sup>28</sup> Белов А. С., Марков Г. А., Фролов В. Л., Парро М., Шевцов Б. М., Бычков В. В. Воздействие мощным КВ радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда «Сура» на локальные ионосферно-магнитосферные связи // Докл. V международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 95–97.

<sup>29</sup> Prech L., Nemecek Z., Safrankova J., Omar A. Actively produced high-energy electron bursts within the magnetosphere: the APEX project // Ann. Geophys., 2002. Vol. 20. P. 1529–1538.

<sup>30</sup> Пулинец С. А., Селегей В. В. Модификация ионосферной плазмы вблизи ИСЗ при внешнем зондировании ионосферы мощными радиоимпульсами // Космические исследования, 1985. Т. 23. № 1. С. 113–122.



Слева – распределение потоков частиц как зависимости от  $p$  и  $q$ , справа – распределение частот плазменных резонансов, регистрируемых спутниковым ионозондом ИС-338 от  $p$  и  $q$ . Представлено сравнение распределения потоков ускоренных электронов от отношения частоты зондирования к гирочастоте электронов  $p$  и отношения плазменной частоты к гирочастоте электронов  $q$ . Очевидно высокое подобие обоих распределений. Источник: Пулинец С.А., Селегей В.В. Модификация ионосферной плазмы вблизи ИСЗ при внешнем зондировании ионосферы мощными радиопульсами // Космические исследования, 1985. Т. 23. № 1

стрировались с помощью спектрометра мягких электронов СФ-3 на спутнике АПЭКС<sup>31</sup>.

Активные космические эксперименты, начатые в конце 1960-х гг. в СССР и других странах, в том числе по программе «Интеркосмос», внесли значи-

тельный вклад в изучение электродинамического взаимодействия между ионосферой и магнитосферой Земли, процессов неустойчивостей в околоземной плазме, искусственных ионосферных возмущений и их влияния на распространение радиоволн. Для продолжения аналогичных исследований Институтом прикладной геофизики Росгидромета совместно с ИКИ РАН готовится проект «Ионозонд-2025», состоящий из четырех космических аппаратов «Ионосфера» и одного спутника

<sup>31</sup> Shuiskaya F.K., Galperin Yu.I., Serov A.A., Baranets N.V., Kushnerevsky Yu.V., Pulinets S.A., Vasiliev G.V., Fligel M.D., Selegey V.V. Resonant heating of the ionospheric plasma by powerful radiopulses aboard the Intercosmos-19 and Cosmos-1809 satellites // Planet. Space Sci, 1990. Vol. 38. № 2. P. 173–180.



Нагревной стенд на Аляске (США). Иллюстрация из Лавёров Н. П., Зецер Ю. И. Активные эксперименты в ионосфере с использованием энергии радиоволн ВЧ диапазона. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН, 2000

«Зонд»<sup>32</sup>. Изготовление спутника «Ионосфера-М» производится ВНИИЭМ<sup>33</sup>. Запуск первых двух спутников для проведения космического эксперимента «Ионозонд-2025» планируется осуществить в ближайшие полгода. Все четыре аппарата «Ионосфера-М» будут выводиться попарно на взаимно-пер-

<sup>32</sup> Пулинец С., Закутняя О. Градусник космической погоды. Российские спутники возобновляют изучение ионосферы // Русский космос, 2022. № 8 (42). С. 40–43.

Пулинец С.А., Ведешин Л.А. Комплексные исследования межгеосферных связей наземными и космическими средствами // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2019 г. С. 86–94.

<sup>33</sup> Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А. Г. Иосифьяна.

пендикулярные в долготной области солнечно-синхронные круговые орбиты на высоту 820 км для исследования ионосферных процессов, а «Зонд» будет запущен на близкую к круговой орбиту в плоскости терминатора на высоту 650 км для изучения активности Солнца и его воздействия на ионосферу Земли. После длительного перерыва в магнитосферно-геосферных исследованиях спутники «Ионосфера-М» примут эстафету активных экспериментов, проводившихся по программе «Интеркосмос», вдохновителем которых был академик Н. П. Лавёров.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Мониторинг»), госрегистрация № 122042500031-8.

## ТАНЦУЮЩИЕ СИЯНИЯ

**САХАРОВ Ярослав Алексеевич,**

*кандидат физико-математических наук*

*Полярный геофизический институт (ПГИ)*

DOI: 10.7868/5004439482306004X



### ЧТО ТАКОЕ ПОЛЯРНОЕ СИЯНИЕ?

Полярное сияние – это свечение верхних слоев атмосферы, которое возникает из-за взаимодействия заряженных частиц солнечного ветра с магнитосферой Земли. В окрестности нашей планеты расположен плазменный слой из высокоэнергичных частиц, вдоль силовых линий которого движутся частицы солнечного ветра, в результате чего происходит люминесценция атомов и молекул воздуха. Цвет излучения зависит от высоты его появления: на высотах 200–400 км – зеленое и желтое свечение кислорода, на высотах около 100 км светит также и азот, вместе с кислородом образуя красный и фиолетовый цвета. Бывают полярные сияния и на других планетах: на Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне, там их цвет зависит от состава атмосферы (например, от наличия большого количества водорода). Полярные сияния различаются не только по цвету, но по яркости и по форме.

### НЕ ТОЛЬКО ПРЕДМЕТ НАУКИ, НО И ИСТОЧНИК ВДОХНОВЕНИЯ

Наблюдения за полярными сияниями – это не только строгая оценка интенсивности свечения в баллах по международной шкале, не только изучение географических закономерностей и по-

строение соответствующих изогазм, соединяющих точки с равной частотой возникновения этих явлений. Полярные сияния – это феерические картины, несущие неземную красоту, самое яркое на Земле проявление космической погоды.

Я много лет пытаюсь «остановить мгновение», с помощью фотокамеры ухватить и сохранить диковинную картину, присланную нам из космоса. И, конечно, как любой художник, не без ревности смотрю на работы других фотографов, которые сумели сделать лучший кадр. Однажды в местной газете «Дважды-два» я наткнулся на рисунок Татьяны Корниловой «Кармен в красном». Фоном ее работы послужил фотоснимок полярного сияния Д. Педерсона (Daryl Pederson), американского профессионального фотографа и музыканта. Работа произвела на меня сильнейшее впечатление. Во-первых, удалось сфотографировать сияние прекрасной формы, во-вторых, такой яркий красный цвет в наших широтах наблюдается очень редко. Наконец, почему же я таких работ Татьяны не встречал раньше, коль скоро мы с ней работаем в одном институте, знакомы давным-давно и полярные сияния это ее профессия? Это ведь особенная работа, здесь авроральное свечение – проекция плазменного слоя на земную поверхность – органичная и главная часть сюжета.



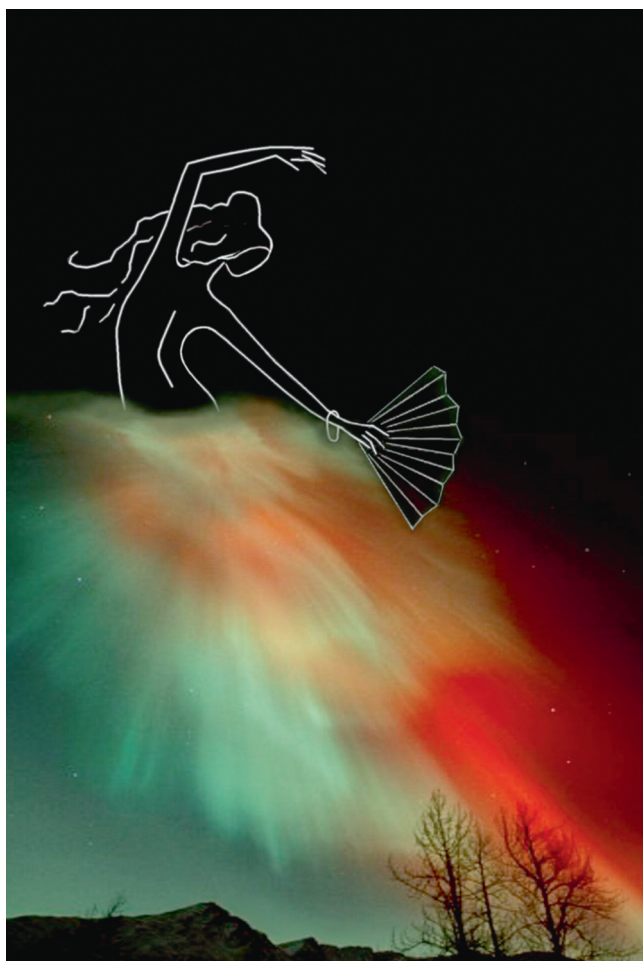
---

## ПОЛЯРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

Наш Полярный геофизический институт (ПГИ) был создан в рамках Кольского филиала АН СССР в 1960 г. Одна из основных задач института – изучение полярных сияний. Институт появился на пике интереса мирового научного сообщества к проблемам физики процессов, связывающих Землю с Солнцем. После проведения Международного геофизического года (МГГ) одной из основных задач нового института являлось изучение полярных сияний, в том числе обработка результатов съемки сияний на сети станций во время МГГ. Для систематизации материалов наблюдений и организации доступа к данным при институте был создан МЦД В-2 по полярным сияниям. Так на Крайнем Севере родился научный центр по исследованию проявлений космических явлений в атмосфере Земли.

Многих из нас увлек диковинный вид авроральных форм, разрывающих небосвод морозными ночами. Кто-то связал судьбу с исследованиями магнитных бурь, кто-то до сих пор робко прислушивается, пытаясь на слух уловить мелодию полярной авроры. Существует поверье, что магические лучи сияния в морозном небе звучат, как струны, подобно арфе, но кто слышал этот волшебный звук?



*«Кармен в красном». Работа Т.А. Корниловой*

---

## СФОТОГРАФИРОВАТЬ НЕБЕСНОГО ДРАКОНА

---

За прошедшие годы стало известно многое о солнечном ветре, о поведении магнитосферы и о причинах и характере аврорального свечения. Определены место и время появления авроральных дуг, спектральный состав свечения, исследуется поляризация излучения и фрактальная структура форм. Стало понятно, как и почему «пазори» – старинное название полярного сияния –

сбивают с курса морские суда, магнитные компасы и системы определения координат.

И фольклор, и дошедшие до нас записи описывают, как правило, подвижное небесное свечение как образы диковинных существ, драконов, змей или даже «всадников небесных с копиями». Или как открывшийся путь в страну мертвых. В любом случае яркие картины оставляют неизгладимые впечатления. Астронавт Скотт Келли (Scott Kelly) снабдил свой снимок с борта космического аппарата репликой: «Красная аврора – я никогда прежде не видывал такого. Захватывающе!» (I've never seen this before – red aurora. Spectacular!)

И мы, живущие «в суб-авроральной зоне», старались в далекие 70-е годы запечатлеть редкие удивительные картины сияний на обычную фотопленку. Что-то получалось, что-то не очень, но свой, любительский снимок сияний, был каждому очень дорог. Теперь же, с развитием качественной цифровой техники, получить интересную фотографию полярного сияния стало гораздо проще. А снимки сияний, прошедшие через конкурс астрофотографии (Astronomy Photographer), потрясающе хороши! В средней полосе во многих местах образовались сообщества любителей фотосъемки сияний и работают они весьма плодотворно. Мне иногда становится жаль, что при высокой магнитной активности яркие формы убегают на юг, куда-то в Москву, а у нас в зените остаются только слабые пятна!



Т. А. Корнилова

Сегодня на многих геофизических станциях ведется постоянная телевизионная съемка сияний, в том числе в различных спектральных окнах. Динамика движения авроральных форм отражает плазменные процессы, протекающие на расстояниях от 3 до 10 земных радиусов от центра нашей планеты.

---

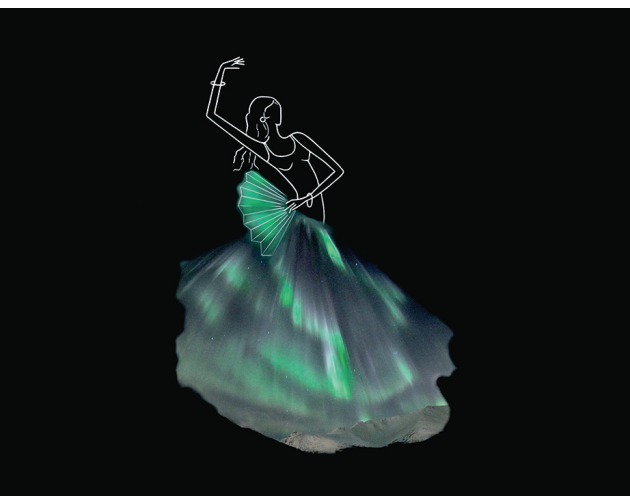
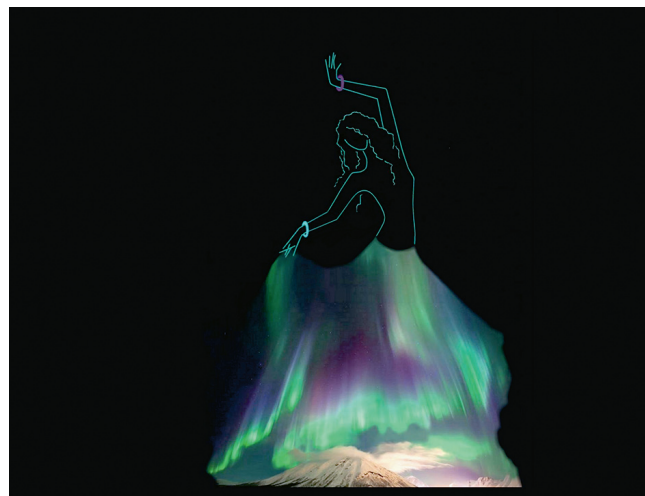
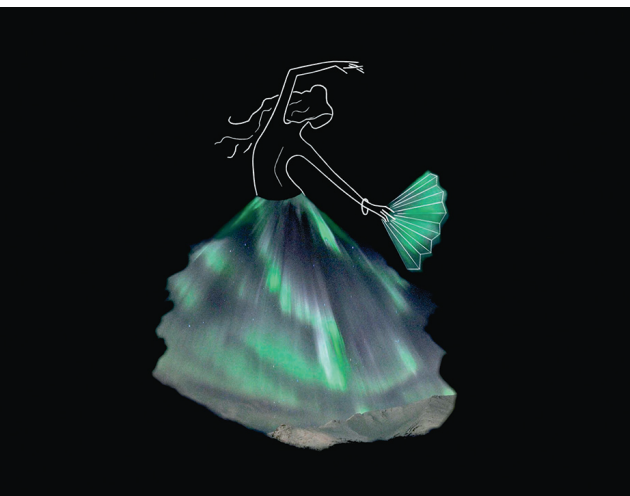
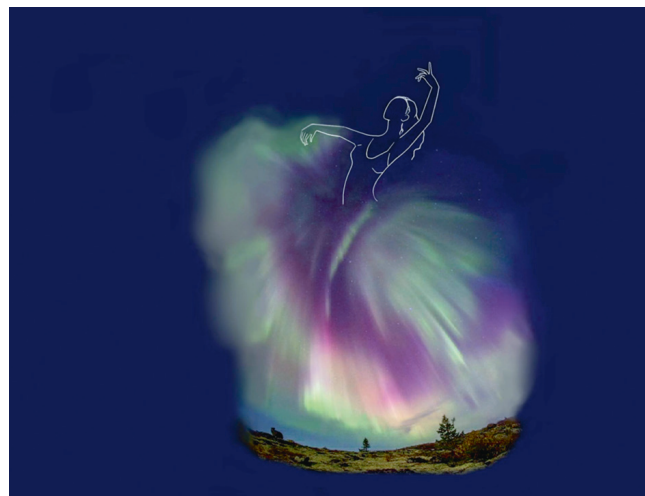
## ОДНОЙ ТОЛЬКО НАУКИ МАЛО...

---

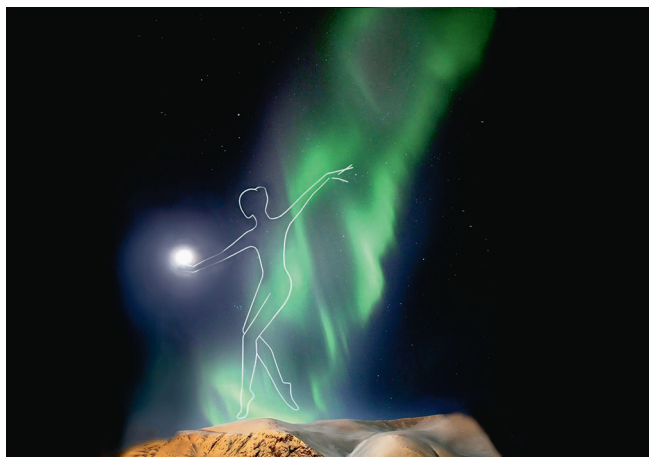
До сих пор остается тайной связь души человеческой с таинственными небесными сполохами.

Поговорим о рисунках танцующих сияний, которые создает наша коллега Татьяна Корнилова. Оказывается, некоторое время тому назад вышел из печати удивительный альбом «Танцующие сияния» с ее рисунками в оригинальной технике.

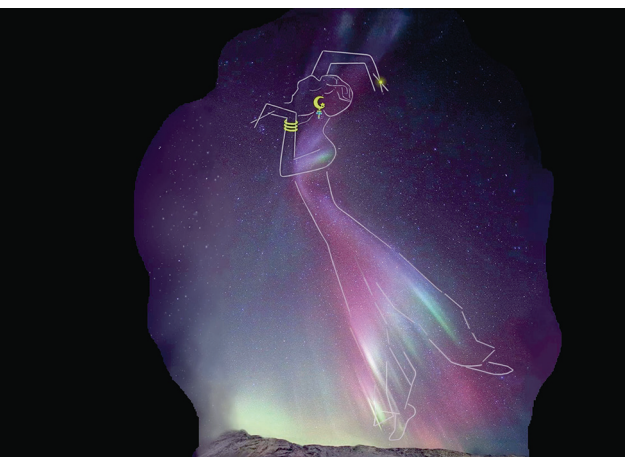
Татьяна окончила физический факультет Ленинградского университета, ее руководителем был профессор М. И. Пудовкин. Много лет, работая в ПГИ, Татьяна занималась исследованиями полярных сияний, причем в самых удивительных проявлениях, скажем, «черные сияния», явление, противоположное свечению. Занимаясь наукой, Татьяна не могла расстаться с увлечением искусством, балетом и живописью. Ее талант сплавил стремления творческой натуры. Движения авроры породили сюжеты волшебного балета. Для тех, кто вживую наблюдал взрывы аврорального свечения, многое сразу станет понятным – мимолетная пауза в движении балерины, и – мгновенно – вновь по-



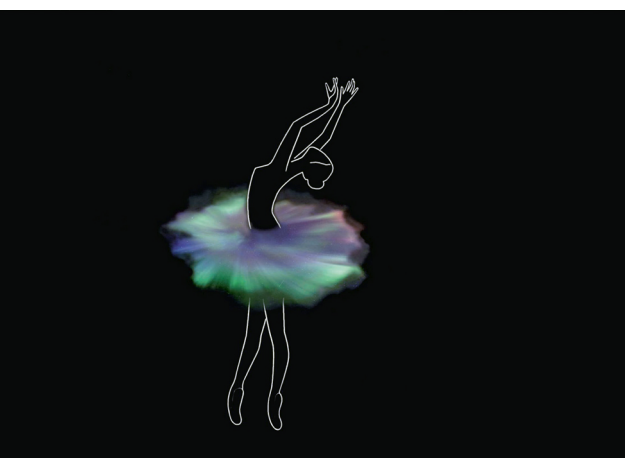
Из серии «Испанские танцы»  
Работы Т.А. Корниловой



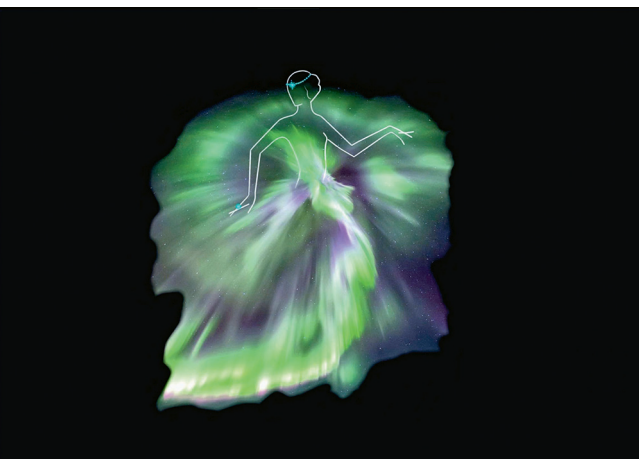
*Из серии «Художественная гимнастика». Работы Т.А. Корниловой*



*Из серии «Восточные танцы». Работы Т.А. Корниловой*



*Из серии «Балет»  
Работы Т.А. Корниловой*



Из серии «Мода». Работы Т.А. Корниловой

лет в движении танца. Так родились первые сюжеты, которые собрались в семь серий работ, составивших альбом «Танцующие сияния».

Часть Таниных работ разошлись по небольшим экспозициям, часть – подарены коллегам на полярных станциях. Тепло о работах Татьяны отозвалась королева Норвегии Соня (Sonja Haraldsen), достаточно известный график.

В качестве иллюстрации я хочу привести несколько работ из альбома Татьяны «Танцующие сияния».

У северных народов существует поверье: если долго смотреть на полярное сияние, можно потерять разум. По-моему, это не так. Разум не потеряешь, а вот попасть в плен к обаятельным рисункам Татьяны Корниловой, это я вам гарантирую!

С завидным постоянством вспышки на Солнце и выбросы замагниченной плазмы несут в окружающее пространство гигантскую энергию и мощный поток заряженных частиц. Малая доля этой энергии попадает на Землю и радует нас феерическими картинами полярных сияний. Мы с вами заглянули в космическое пространство через слегка приоткрытое окошко. Может быть, кого-то зачарует диковинное яв-



Из серии «Мода»  
Работы Т.А. Корниловой

ление, и тогда манящий свет сияний распахнет для каждого из вас дорогу в загадочный мир Вселенной, мир, окружающий нашу планету.

## Литература

1. Корнилова Т.А. Танцующие сияния Dancing auroga / Корнилова Татьяна; [фот.: Сергей Черноус, Валентин Жиганов]. Мурманск: Глухов А.Б., 2018. 76с.: ил.
2. Исаев С.И. Полярные сияния. Мурманск, 1980.
3. Мизун Ю.Г. Полярные сияния. М., 1983.

# МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ В ЛАБОРАТОРИИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА НАЗЕМНУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ

СЕЛЕМИР Виктор Дмитриевич,

член-корреспондент РАН

ТРЕНЬКИН Алексей Александрович,

доктор физико-математических наук

ФГУП «Российский Федеральный ядерный центр –  
ВНИИЭФ»



DOI: 10.7868/50044394823060051

**П**роцессы, протекающие в магнитосфере Земли, весьма разнообразны, а их исследования важны как с точки зрения получения фундаментальных знаний, так и в части влияния на человеческую жизнедеятельность. Ввиду сложности, высокой стоимости, а зачастую и невозможности осуществления натурных исследований процессов в магнитосфере важную роль играет расчетное моделирование. Интенсивное развитие вычислительных возможностей обуславливает значительный прогресс в моделировании широкого спектра процессов, протекающих в магнитосфере Земли на больших пространственных масштабах – масштабах, сопоставимых или даже превосходящих диаметр нашей планеты. В то же время повышение сложности физико-математических моделей и расчетных методик подразумевает необходимость подтверждения достоверности получаемых с их помощью

результатов – верификации. Одним из способов осуществления верификации является проведение лабораторного моделирования интересующих процессов и сравнение получаемых экспериментальных данных с результатами расчетов. Такое моделирование представляет собой непростую научно-техническую задачу и под силу только небольшому числу научных центров. В настоящей публикации дано представление о ряде значимых электромагнитных явлений в магнитосфере и их влиянии на функционирование технической инфраструктуры, рассмотрены общие подходы к лабораторному моделированию этих явлений. На примере явлений возникновения низкочастотных волн в магнитосферно-ионосферной плазме и динамики высокоэнергичных электронов в радиационных поясах описана технология их исследования на одном из крупнейших лабораторных стендов под названием

НПМ-01, расположенном в Федеральном ядерном центре г. Саров, а также приведен пример расчетного моделирования влияния сильной магнитной бури на систему электроснабжения нашей страны.

## МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ, ПРОЦЕССЫ В НЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЧЕЛОВЕЧЕСКУЮ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

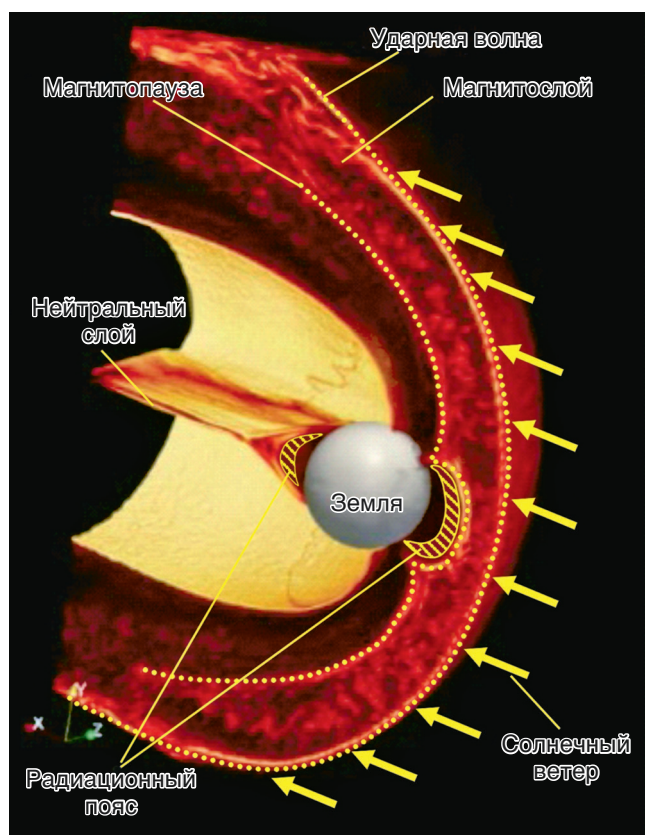
Магнитосфера Земли – это заполненная плазмой полость, образующаяся в потоке солнечного ветра при его взаимодействии с геомагнитным полем. Форма и размеры магнитосферы определяются характеристиками собственного магнитного поля Земли, которое в первом приближении имеет вид диполя, и параметрами набегающего потока плазмы – солнечного ветра (рис. 1).

Скорость солнечного ветра высокая – среднее значение вблизи орбиты Земли около 400 км/с. Поэтому перед магнитосферой с ее дневной стороны постоянно существует отходящая ударная волна, замедляющая и отклоняющая поток солнечного ветра. Точечный слой, являющийся границей магнитосферы, называют магнитопаузой. Он расположен на расстоянии около 70 тыс. км от Земли. Динамическое давление солнечного ветра уменьшается при удалении от Солнца. В результате с ночной стороны Земли формируется вытянутая кометобразная полость – хвост

магнитосферы, протяженность которой составляет более 1.5 млн км.

В качестве отдельных элементов структуры магнитосферы можно выделить радиационные пояса Земли. Они формируются за счет поступления и удержания высокоэнергичных заряженных частиц в областях геомагнитного поля, имеющих вид магнитной ловушки. В западной литературе эти пояса часто называются поясами Ван Аллена, в честь американского физика, который впервые обнаружил их в 1958 году на основе измерений спутника «Эксплорер-1». Радиационный пояс в первом приближении представляет собой тороид, в котором выделяются две области: внутренний пояс на высоте около 4000 км,

Рис. 1. Трехмерная визуализация строения магнитосферы на основе гибридной численной модели (Karimabadi et al. 2013)



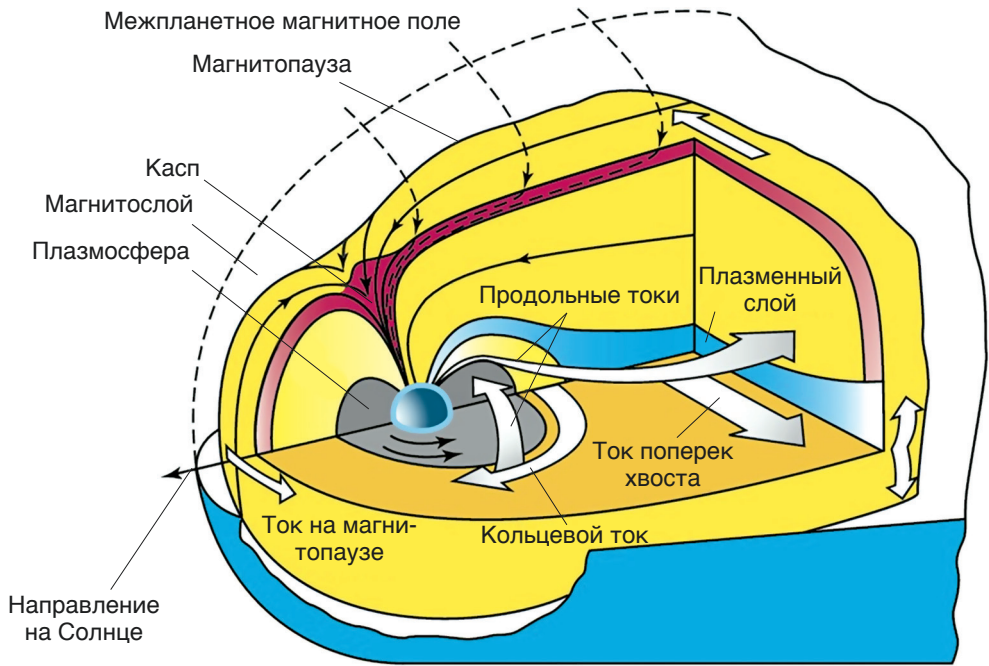


Рис. 2. Области магнитосферы Земли и токовые системы

состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ, и внешний пояс на высоте около 17 000 км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.

Движение заряженных частиц солнечного ветра в магнитосфере Земли формирует электрические токи. Магнитное поле, создаваемое этими токовыми системами, вместе с главным магнитным полем Земли определяет структуру плазменных образований в магнитосфере и характеризует геомагнитную активность. Основные магнитосферные токовые системы (рис. 2): поверхностные токи на магнитопаузе, токовая система хвоста магнитосферы, кольцевой ток и продольные токи, текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля. Последние образуют высокоширотные токовые системы сложной формы, которые проникают в ионосферу, в том числе в области, близ-

кие к поверхности Земли на высоте около 100 км.

Ионосфера – это верхний слой атмосферы с высокой концентрацией свободных ионов и электронов, ионизированный ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца, а также космическими лучами. Ионы и электроны ионосферы находятся под действием гравитационного и магнитного полей.

Ионосфера Земли состоит из смеси газа нейтральных атомов и молекул (в основном азота и кислорода) и квазинейтральной плазмы (число отрицательно заряженных частиц примерно равно числу положительных). Степень ионизации становится существенной уже на высоте 60 км. Условно выделяют несколько областей ионосферы. В области *D*, расположенной на высоте 60–90 км, концентрация заряженных частиц составляет  $10^2$ – $10^3$  см<sup>-3</sup> – это область слабой ионизации. Область *E*



на высоте 90–120 км характеризуются плотностями плазмы до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Область  $F$  называют всю ионосферу выше 130–140 км. Максимум ионообразования достигается на высотах 150–200 км. Особенностью слоя  $F$  является то, что он отражает радиоволны на частотах от нескольких мегагерц до 10 МГц, что делает возможным передачу таких радиосигналов на значительные расстояния, обеспечивая радиосвязь. За открытие слоя  $F$  английскому физика Эдварду Виктору Эпלטону в 1947 году была присуждена Нобелевская премия по физике.

Нестационарные явления, происходящие на Солнце, вызывают сложную последовательность процессов в магнитосфере Земли, оказывающих также влияние на биосферу, на организм человека и общество в целом, а также на созданную им техническую инфраструктуру. Для обозначения совокупности гелиогеофизических явлений и процессов на Солнце в межпланетном и околоземном космическом пространстве, магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере Земли часто используется термин «космическая погода». Таким образом, можно без преувеличения сказать, что влияние космической погоды для нашей планеты является всеобъемлющим.

По-видимому, наиболее известное явление такого рода – это магнитная буря, которая представляет собой возмущение магнитного поля Земли длительностью от нескольких часов до нескольких суток. Она вызывается поступлением в окрестности Земли возмущенных потоков солнечного ветра и их взаимодействием с магнитосферой Земли, что приводит к усилению кольцевого тока Земли и токов других магнитосферно-ионосферных систем. При этом происходит повышение радиации в поясах Земли и высыпание заряженных частиц в верхние слои

атмосферы, которое мы наблюдаем как северное сияние.

Наряду с красотой этого явления в периоды активизации процессов в магнитосфере могут происходить и негативные эффекты. Так, высокоэнергичные заряженные частицы вызывают деградацию полупроводниковых материалов космических аппаратов, сбои в микросхемах их бортовых систем и внутреннюю электризацию элементов. Результатом может стать, например, постепенное снижение эффективности солнечных батарей либо сбои функционирования космических аппаратов. В ряде случаев указанные процессы приводили к потере искусственных спутников Земли.

Магнитные бури создают также сильные возмущения в ионосфере, которые, в свою очередь, отрицательно сказываются на функционировании радиосвязи и радиолокации, могут являться причиной возрастания ошибок позиционирования вплоть до потери сигнала спутниковых навигационных систем.

Пагубное воздействие магнитные бури могут оказывать и на наземные технические системы. Механизм их воздействия следующий. Вариации протекающего в ионосфере электрического тока вызывают соответствующее изменение в окружающем пространстве магнитного поля, что по закону индукции приводит к возникновению электрического тока в земной коре – так называемый геоиндуцируемый ток. Этот ток перетекает во все заземленные с двух сторон протяженные проводящие (как правило, металлические) структуры, прокладывая, согласно принципу наименьшего сопротивления, для себя дополнительный контур. В этой связи воздействию геоиндуцированного тока подвержены линии электропередач, проводные линии связи, нефтегазопроводы, железные дороги, трансконтинентальная подземная

(подводная) сеть интернет-трафика, что способно привести к сбоям функционирования соответствующих систем, повреждениям оборудования и крупным авариям.

Так, значительные помехи и повреждения, возникавшие во время магнитных бурь, были отмечены уже на самых первых протяженных системах коммуникации – телеграфных линиях, построенных в первой половине XIX века. Геомагнитная активность может приводить к значительным нарушениям в работе железнодорожной автоматики, особенно в приполярных районах, к ускоренной коррозии магистральных трубопроводов, сбоям функционирования промежуточных усилителей оптического сигнала в сетях интернет трафика.

Системы электроснабжения из-за возрастающей сложности становятся все более уязвимыми к воздействию магнитных бурь. Геоиндуцированные токи вызывают одностороннее насыщение магнитной системы силовых трансформаторов подстанций. В результате в системе электроснабжения увеличивается потребление реактивной мощности, снижается пропускная способность сети, происходит падение напряжения, появляются интенсивные высшие гармонические составляющие тока и напряжения, происходит нагрев элементов конструкции трансформатора и его повреждение, возникают сбои в работе систем релейной защиты и автоматики.

Негативные воздействия геоиндуцированных токов на энергосистемы с высоким экономическим ущербом неоднократно происходили во время сильных магнитных бурь, преимущественно в высокоширотных районах, например, в 1989 и 2003 годах в Северной Америке и Северной Европе. Для примера опишем последствия воздействия магнитной бури, произошедшей в марте 1989 года. Ложное срабатывание релейной защиты вызвало аварий-

ное отключение пяти ЛЭП 735 кВ объединенной электроэнергетической системы Канады и США «Гидро-Квебек» суммарной мощностью 9.5 млн кВт. После этого произошел «развал» электроэнергетической системы и была потеряна мощность в размере 21 млн кВт. Без электроснабжения оказались около 6 млн человек в течение 9 часов. Во время этой бури на Салемской АЭС в Нью-Джерси вышла из строя группа однофазных повышающих трансформаторов 500 кВ общей мощностью 360 МВА в результате обугливания изоляции обмоток. Аварии произошли и в энергосистемах Северной Европы, например, в Швеции отключились 5 линий напряжением 130 кВ.

В историческом аспекте, помимо сильных, известны магнитные бури экстремальной интенсивности. Они наблюдались в 1770, 1859 (событие Кэррингтона, названное в честь британского астронома Ричарда Кристофела Кэррингтона, наблюдавшего вспышку на Солнце, вызвавшую эту магнитную бурю) и 1921 годах. Воздействия таких бурь распространяются в том числе и на низкие широты. Так, например, во время события Кэррингтона северные сияния наблюдались на широте Кубы. Статистическая частота возникновения таких бурь составляет примерно один раз в 100 лет. С учетом того, что последнее событие подобного типа произошло в начале прошлого века, его очередное наступление можно ожидать в ближайшее время.

Решением проблемы повышения устойчивости технической инфраструктуры в условиях воздействий факторов космической погоды является мониторинг, прогнозирование и своевременное предупреждение федеральных органов исполнительной власти, а также заинтересованных организаций и ведомств о возможных периодах и факторах негативных воздействий и ре-

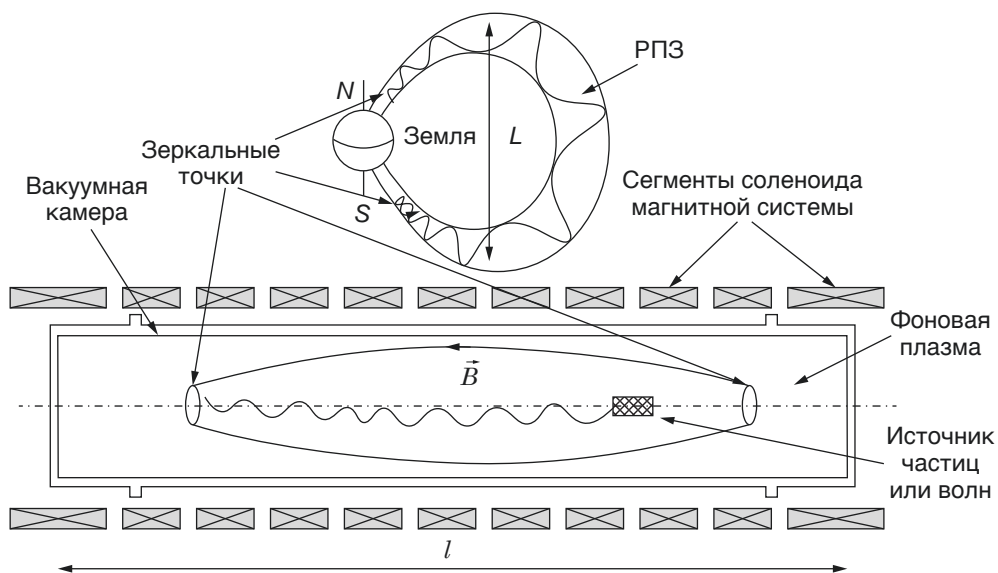


Рис. 3. Методология лабораторного моделирования движения электронов в радиационном поясе Земли

ализация мероприятий как по защите, так и по снижению последствий таких воздействий. Повышение степени достоверности прогноза космической погоды напрямую зависит от степени понимания закономерностей процессов в цепочке солнечно-земных связей. Вот почему так важно изучение явлений в магнитосфере Земли!

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Из сказанного выше следует, что для лабораторного моделирования электромагнитных процессов в магнитосфере как минимум необходимо наличие (рис. 3):

- вакуумной области, моделирующей безвоздушное космическое пространство;

- фонового магнитного поля (однородного и в конфигурации магнитной ловушки), моделирующего невозмущенное геомагнитное поле;

- фоновой замагниченной плазмы, моделирующей невозмущенную магнитосферно-ионосферную плазму;

- источников частиц и волн, моделирующих факторы возмущения в магнитосфере.

Однако наличие экспериментального оборудования, обеспечивающего создание указанных условий, еще не достаточно для адекватного моделирования. Проблема кроется в огромной разнице пространственных масштабов явлений в космическом пространстве и в лаборатории, и весь вопрос заключается в том, как правильно «сжать» размеры космических явлений  $L$  до масштабов лабораторной установки  $l$ . Решение этой задачи основывается на соответствующих законах, которые определяют, как должны соотноситься между собой основные физические величины в космическом объекте и его лабораторном аналоге.

Обычно полное масштабное моделирование электромагнитных явлений провести не удается, и, по существу, речь идет только о частичном моделировании, которое основывается на двух основных предположениях. Во-первых, из всей совокупности безразмерных параметров, характеризующих моделируемое явление, выделяется один или несколько основных, по которым проводится количественное моделирование, заключающееся в требовании равенства этих параметров в космосе и лаборатории. По всем остальным параметрам можно ограничиться качественным моделированием, которое сохраняет лишь некоторые пропорции отношения величин. Во-вторых, необходимо постулировать или обосновать инвариантность (неизменность) каких-либо функций, описывающих исследуемое явление: электрических и магнитных полей, токов, зарядов и т.д.

Одним из разумных постулатов является предположение о том, что все невозмущенные скорости (волн, частиц, движения плазмы как целого и т.д.) в космических явлениях и в лабораторном эксперименте одинаковы. Основанием этого является то обстоятельство, что в космосе и в лаборатории скорость света одна и та же. Следовательно, при уменьшении пространственных масштабов в  $\gamma = L/l$  раз временные масштабы явления также должны сократиться в  $\gamma$  раз. Из уравнения движения частиц в электрическом и магнитном поле следует, что величины этих полей в лаборатории должны возрасти в  $\gamma$  раз. При этом уравнения Максвелла не нарушаются, если при указанном пересчете плотность тока и плотность заряда в лабораторной плазме изменяются в  $\gamma^2$  раз. Отсюда следует, что концентрация заряженных

частиц должна увеличиться в  $\gamma^2$  раз, во столько же раз должна увеличиться плотность электромагнитной энергии. Поскольку теперь, при указанном пересчете величин, уравнения Максвелла и уравнения движения заряженных частиц, описывающих электромагнитные явления в лаборатории, удовлетворяют законам подобия, этим законам будет удовлетворять и кинетическое уравнение, а значит, и все следствия из указанных уравнений, автоматически масштабируя основные безразмерные параметры.

Другим существенным аспектом при «переносе» явлений из космического пространства в условия лабораторного эксперимента является необходимость исключения влияния границ, присущих любому оборудованию и отсутствующих в космосе. Например, для минимизации влияния стенок вакуумной камеры на процессы, протекающие в расположенной внутри плазме, необходимо максимально удалять их от плазменной области, в которой выполняются исследования.

В итоге предпочтительными для моделирования электромагнитных процессов в приближении «безграничной» плазмы являются установки большого размера. Следует отметить, что само по себе создание стабильно работающих источников магнитного поля и замагниченной плазмы с требуемыми параметрами в объеме более одного кубического метра представляет собой достаточно сложную техническую задачу и требует существенных энергетических затрат. Поэтому в настоящее время в мире функционирует сравнительно небольшое число плазменных стендов, на которых может выполняться моделирование электромагнитных процессов в околоземном космическом пространстве.

## СТЕНД НПМ-01

Одним из таких стендов является электрофизический лабораторный стенд НПМ-01. Он позволяет реализовать все указанные выше требования, является одним из крупнейших в своем роде стендов и способен обеспечить моделирование широкого спектра процессов в магнитосфере Земли, включая генерацию и распространение низкочастотных волн в замагниченной плазме и процессы в областях захваченной радиации. Например, для высот от двухсот до тысяч километров над поверхностью Земли масштабный коэффициент для стенда составляет  $g = 10^3 - 10^4$ . В соответствии с этим в таблице (табл. 1) приведены истинные и масштабированные значения характерных параметров.

Стенд (рис. 4) представляет собой цилиндрическую вакуумную камеру из нержавеющей стали диаметром один и длиной около восьми метров, которая соосно установлена внутри сегментированного соленоида. Вакуумное оборудование откачивает камеру до остаточного давления  $10^{-5}$  Па. Соленоид разбит на 12 сегментов, равномерно разнесенных по длине. Сегмент собран из шести катушек, кроме двух торцевых – в них девять катушек. За счет изменений схемы включения катушек соленоида формируется поле со сложной осесимметричной геометрией. Соленоид питается программируемым аккумуляторным источником напряжения. Мощности аккумуляторов хватает, чтобы создать внутри соленоида квазистационарное фоновое поле  $B_0 = 0.15$  Тл, которое в 6000 раз

| Параметр                             | Ионосфера                      | Приведенные значения                 | Стенд НПМ-01                           |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Плотность нейтралов                  | $10^{10}$ см <sup>-3</sup>     | $10^{13} - 10^{14}$ см <sup>-3</sup> | $10^{12} - 10^{14}$ см <sup>-3</sup>   |
| Плотность заряженных частиц          | $10^5 - 10^6$ см <sup>-3</sup> | $10^{11} - 10^{14}$ см <sup>-3</sup> | $10^{11} - 10^{12}$ см <sup>-3</sup>   |
| Индукция магнитного поля             | 0.05 мТл                       | 50–500 мТл                           | 150 мТл                                |
| Циклотронная электронная частота     | 0.5–1.5 МГц                    | 0.5–10 ГГц                           | 0.1–3 ГГц                              |
| Циклотронная ионная частота          | 10–30 Гц (O-)                  | 10–300 кГц                           | 100–300 кГц (He+)                      |
| Плазменная частота                   | 0.05–5 МГц                     | 0.1–50 ГГц                           | 1–10 ГГц                               |
| Частота столкновений электронов      | 0.1–1 кГц                      | 0.1–10 МГц                           | 0.5–5 МГц                              |
| Частота столкновений ионов           | 0.5–20 Гц                      | 0.5–200 кГц                          | 0.1–1 МГц                              |
| Фазовая скорость альвеновской волны  | $10^5 - 10^6$ м/с              | –                                    | $10^5 - 10^7$ м/с                      |
| Средняя тепловая скорость электронов | $2 \cdot 10^5$ м/с             | –                                    | $\approx 106$ м/с                      |
| Дебаевский радиус                    | 0.4–1 см                       | $10^{-4} - 10^{-3}$ см               | $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ см         |
| Ларморовский радиус электронов       | 1–10 см                        | $10^{-4} - 10^{-2}$ см               | $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ см |
| Ларморовский радиус ионов            | 5–50 м                         | 0.5–5 мм                             | 1–5 мм                                 |

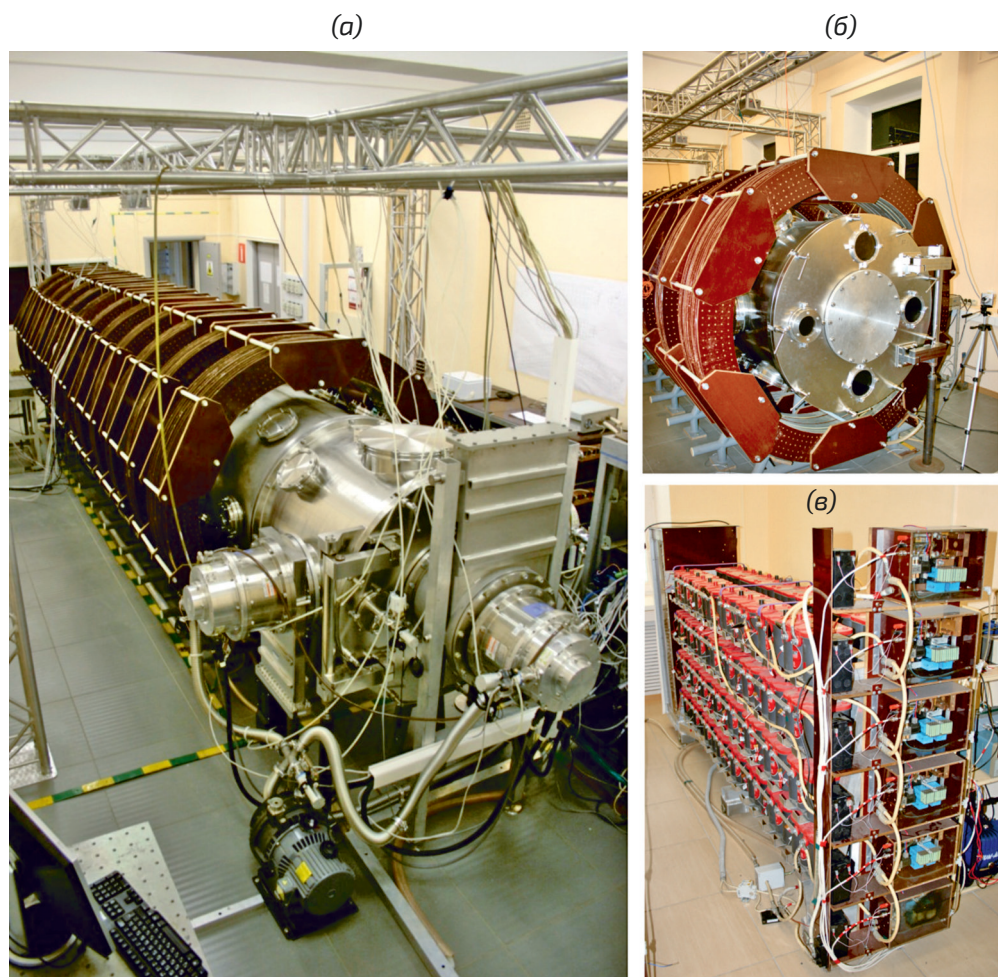


Рис. 4. а, б – Стенд НПМ-01: соленоид, внутри него вакуумная камера с установленными на ней турбомолекулярными насосами, в – аккумуляторный источник питания соленоида

больше геомагнитного. Испытательное поле соленоида 0.3 Тл.

В камере стенда генерируется шестиметровый столб фоновой плазмы плотностью до  $10^{13}\text{см}^{-3}$ . Для ионизации газа используется открытый дуговой разряд вдоль магнитного поля, который зажигается между оксидным термокатодом и сетчатым анодом на торце камеры. Время горения разряда 0.1 с. Плазменные эксперименты проводятся как во время горения разряда, так и в распадающейся плазме после его прекращения.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛЬВЕНОВСКИХ ВОЛН

Одним из интереснейших направлений исследований на стенде является моделирование процесса возбуждения и распространения магнитогидродинамических (МГД) волн. Эти волны пронизывают все околоземное космическое пространство, регистрируются как спутниками, так и наземными станциями в виде сверхнизкочастотных пульсаций геомагнитного поля.

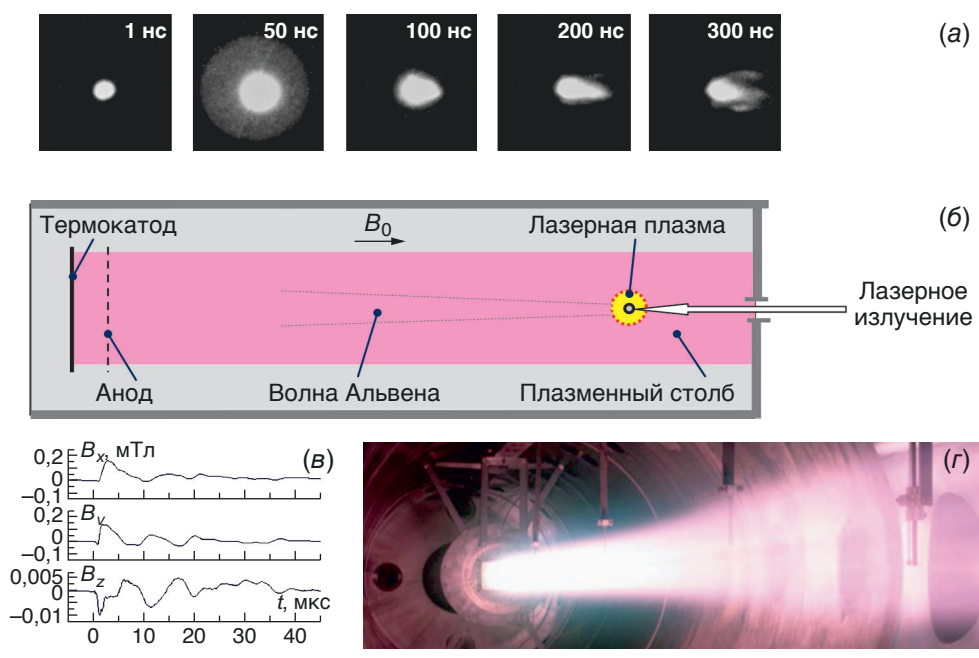


Рис. 5. а – Фотографии разлета лазерной плазмы, б – схематичное изображение эксперимента по генерации альвеновской волны лазерной плазмой, в – зарегистрированная формы сигнала магнитного поля в альвеновской волне, г – фотография фоновой гелиевой плазмы

Энергетически эти волны являются самым мощным волновым электромагнитным процессом в магнитосфере. Исследования волновых явлений базируются на наблюдениях, физико-математических моделях, натурных и лабораторных экспериментах. Исследования МГД-волн имеют не только прикладной характер, но и формируют ряд принципиально новых идей, получивших затем широкое развитие: пересечение силовых линий и аннигиляция магнитных полей, бесстолкновительные ударные волны. За открытие этих волн Ханнес Альвен в 1970 г. был удостоен Нобелевской премией.

На стенде проведены эксперименты (рис. 5) по изучению альвеновских волн, возбуждаемых лазерной плазмой в фоновой замагниченной гелиевой плазме. В опытах алюминиевую мишень облучали коротким наносекунд-

ным импульсом неодимового лазера. Энергия излучения в импульсе ~1 Дж.

При облучении на мишени образуется облако лазерной плазмы, которое расширяется в фоновую плазму со скоростью 100 км/с. Двигаясь поперек линий магнитного поля, лазерная плазма поляризуется и порождает в фоновой плазме продольные, направленные вдоль соленоидального магнитного поля, электрические токи и, как следствие, поперечные магнитные поля. Это взаимодействие приводит к возникновению поперечного скручивания «вмороженной» в магнитное поле фоновой плазмы и возбуждению альвеновских волн. Такие волны еще называют торсионными.

Для измерения магнитного поля волны используется индукционный датчик, представляющий собой миниатюрный кубик с тремя взаимно

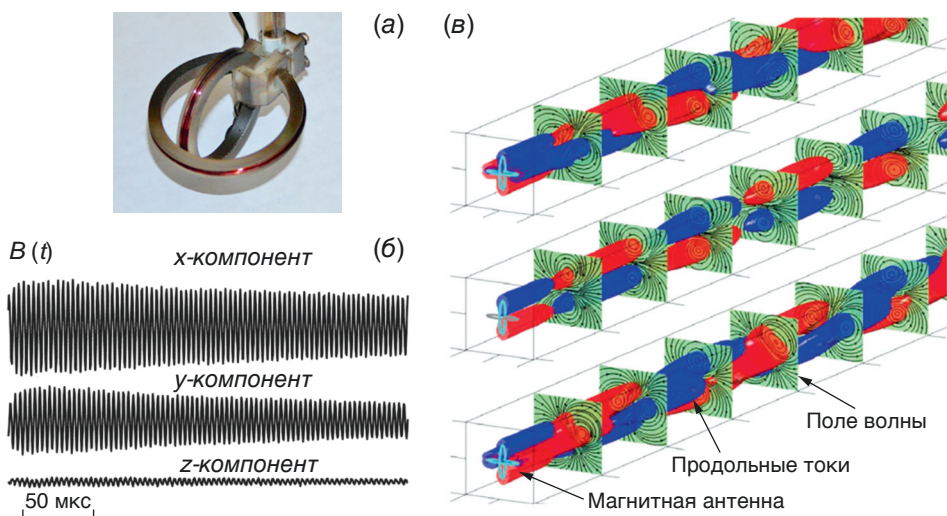


Рис. 6. а – Фотография магнитной антенны, состоящей из двух катушек, б – сигналы магнитного поля в альвеновской волне, в – конфигурация токов и магнитных полей в альвеновской волне (расчет А. Караваяв 2010)

перпендикулярными обмотками. Магнитное поле волнового процесса индуцирует в обмотках электрические сигналы, которые усиливаются и регистрируются на осциллограф. На расстоянии одного метра от мишени амплитуда поля волны составляла 0.15 мТл.

В лабораторной плазме альвеновские волны можно возбудить также с помощью магнитной антенны: погруженных в плазму катушек с переменным током, которые имеют определенную геометрию. Требуется только выполнить следующие условия: магнитное поле тока в катушке должно индуцировать в фоновой плазме продольные электрические токи, а частота тока должна быть меньше циклотронной частоты ионов – частоты с которой ионы вращаются вокруг силовой линии магнитного поля.

Так, например, для возбуждения гармонической альвеновской волны на стенде были использованы две, ориентированных ортогонально друг другу, круглых катушки с совмещенными

центрами (рис. 6) Оси катушек были ортогональны фоновому магнитному полю, а в катушках протекал переменный ток. Сигналы в катушках были сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ .

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ

Другим направлением исследований, проводимых на стенде, является моделирование поведения заряженных частиц в радиационных поясах Земли. Сегменты соленоида включают таким образом, чтобы в вакуумной камере создать осесимметричное поле с конфигурацией в виде открытой магнитной ловушки, ее еще называют пробкотроном (рис. 7). Приведем результаты одного опыта, в котором была изучена траектория электронного пучка в ловушке с целью калибровки численной модели этого физического процесса.



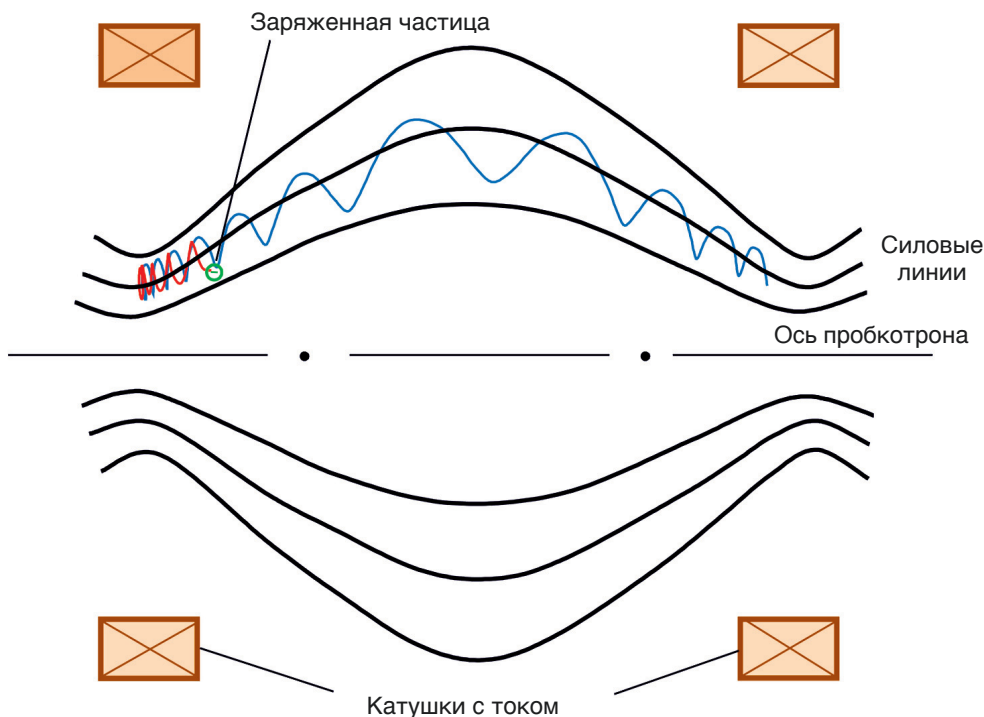


Рис. 7. Частица в пробкотроне

Короткий, длительностью 10 нс, пучок электронов с энергией 30 кэВ инжектировался в магнитную ловушку с помощью специально разработанной для опыта малогабаритной электронной пушки с сегнетоэлектрическим плазменным катодом. Для регистрации тока пучка в различных точках ловушки устанавливались контактные датчики, а на рентгенографическую пластину, такую же используют в медицинском рентгеновском кабинете, получили отпечатки электронных пучков, на которых можно было увидеть распределение электронов по сечению пучка.

Вылетев из пушки, электроны, двигаясь по циклическим орбитам вдоль силовых линий, попадают в область сильного магнитного поля, как бы магнитной пробки, где их продольная ско-

рость уменьшается вплоть до нуля. После чего они движутся в обратном направлении. Такой же процесс происходит у одного из магнитных полюсов Земли. При отражении пучок смещается на небольшой угол относительно оси камеры из-за азимутального дрейфа, и за счет этого основная часть электронов при обратном пролете проходит мимо пушки. В области второй магнитной пробки пучок вновь отражается. Такая же зеркальная точка есть у другого магнитного полюса Земли. Получается что, электроны совершают колебательные перемещения от одной пробки к другой, но могут и покинуть ловушку при определенной траектории своего движения. Аналогичное явление – высыпание заряженных частиц в атмосферу, наблюдается как северное сияние.

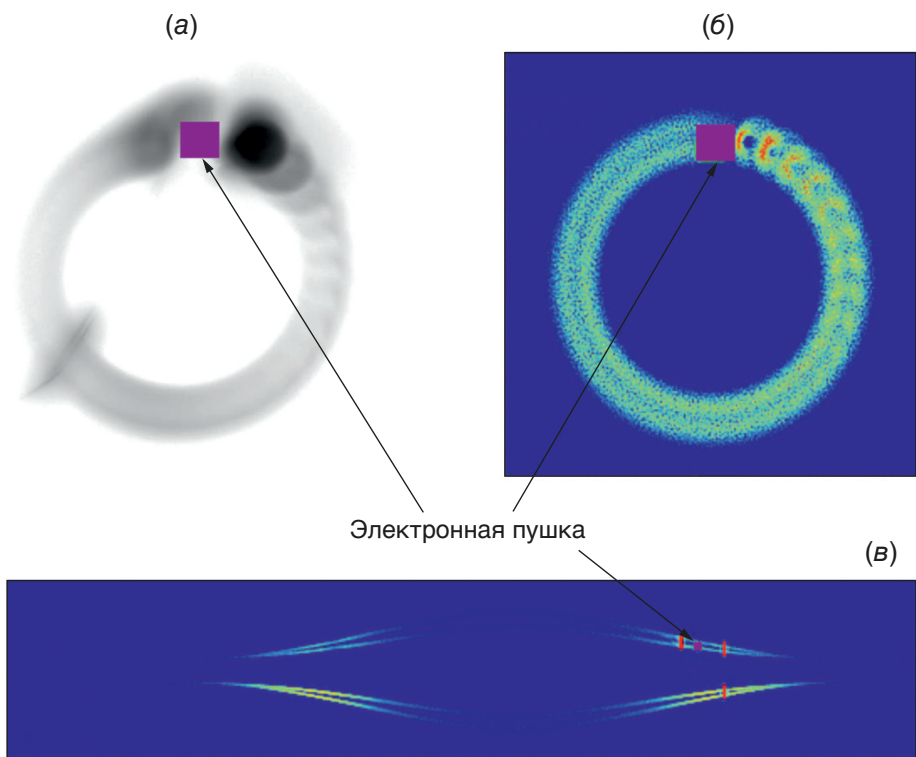


Рис. 8. а – Отпечаток пучка на рентгенографической пластине; б, в – расчет динамики пучка в магнитной ловушке стенда НППМ-01 (А. Широков 2018)

Ввиду разброса скоростей электронов по направлению в момент их вылета из пушки они имеют различные периоды азимутального движения и также различные периоды колебаний вдоль магнитной линии. Это приводит к образованию криволинейной электронной трубки и последующему постепенному ее размытию по азимуту. В итоге через несколько периодов азимутального дрейфа происходит заполнение дрейфовой электронной оболочки толщиной  $\sim 5\text{--}10$  см.

О траектории пучка в пробкотроне мы можем судить по его отпечатку на рентгенографической пластине, установленной в фокусе магнитной пробки, а также по данным численного моделирования, находящегося в согласии с нашим экспериментом (рис. 8).

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОЙ БУРИ НА ЭНЕРГОСИСТЕМУ

Как было отмечено выше, магнитосферно-ионосферные системы электрических токов индукционно взаимодействуют с проводящей поверхностью Земли. Пространственные и амплитудные вариации ионосферного тока возбуждают в грунте вихревые геоиндуцированные токи (рис. 9). Эти токи проникают в гальванически связанные с землей линии электропередачи высокого напряжения и воздействуют на мощные силовые трансформаторы, что приводит к авариям в системе электроснабжения и даже выходу трансформаторов из строя.

Разберем, как геоиндуцированный ток воздействует на трансформатор.

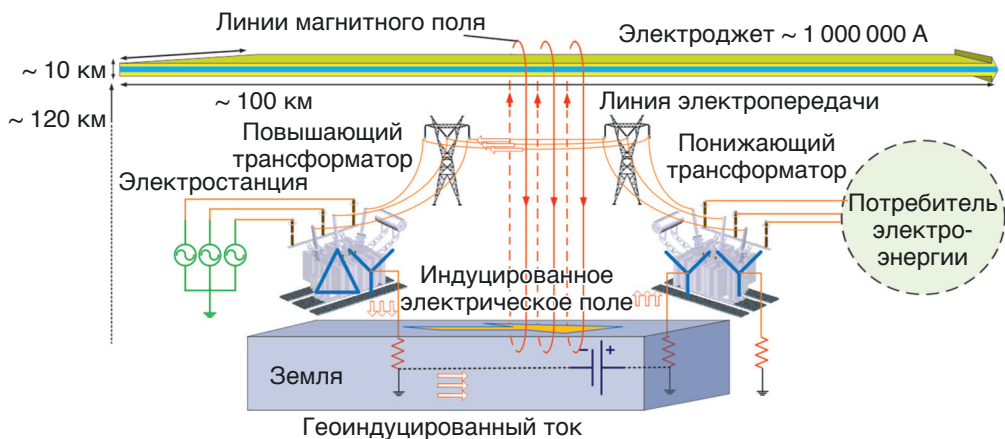


Рис. 9. Проникновение геоиндуцированного тока в энергосистему

Известно, что на пути от генератора к потребителю электроэнергия несколько раз трансформируется. Генераторное напряжение на электростанциях повышается для передачи на большое расстояние до следующей подстанции, где напряжение снижается. Преобразование напряжения осуществляют силовые трансформаторы, в которых энергия переменного тока от одной неподвижной катушки передается в другую через магнитное поле. Для обеспечения между катушками сильной магнитной связи их располагают на едином замкнутом ферромагнитном сердечнике, изготовляемом из специальной электротехнической стали. Под воздействием внешнего поля, создаваемого током в катушке, материал сердечника намагничивается, из-за чего потокосцепление между катушками увеличивается в тысячи раз. Зависимость намагничивания от внешнего поля у ферромагнетика имеет сильно нелинейный характер. С увеличением внешнего поля или, по-другому, намагничивающего тока магнитная восприимчивость уменьшается, и намагниченность приближается к насыщению. Рабочий диапазон на кривой намагничивания сердечников у силовых трансформаторов выби-

рают таким образом, чтобы он не заходил в область насыщения.

Характерная частота колебаний геоиндуцированного тока на один-два порядка ниже частоты электросети 50 или 60 Гц, следовательно, для трансформатора этот ток будет постоянным, и он будет дополнительно подмагничивать сердечник. В таком режиме рабочий диапазон сердечника смещается в область насыщения, где для поддержания магнитной связи между катушками трансформатору требуется значительно больший переменный намагничивающий ток и, соответственно, большую реактивную мощность трансформатор должен забрать у генератора для своей работы.

Пропорционально росту намагничивающего тока в трансформаторе увеличиваются магнитные потоки рассеивания. По типу индукционной печи сильное переменное поле быстро за несколько минут нагревает до недопустимых температур металлические детали конструкции трансформатора. Недопустимый нагрев создает необходимые условия для снижения электрической прочности изоляции вследствие образования в трансформаторном масле пузырьков газа, а также повреждение элементов изоляции,

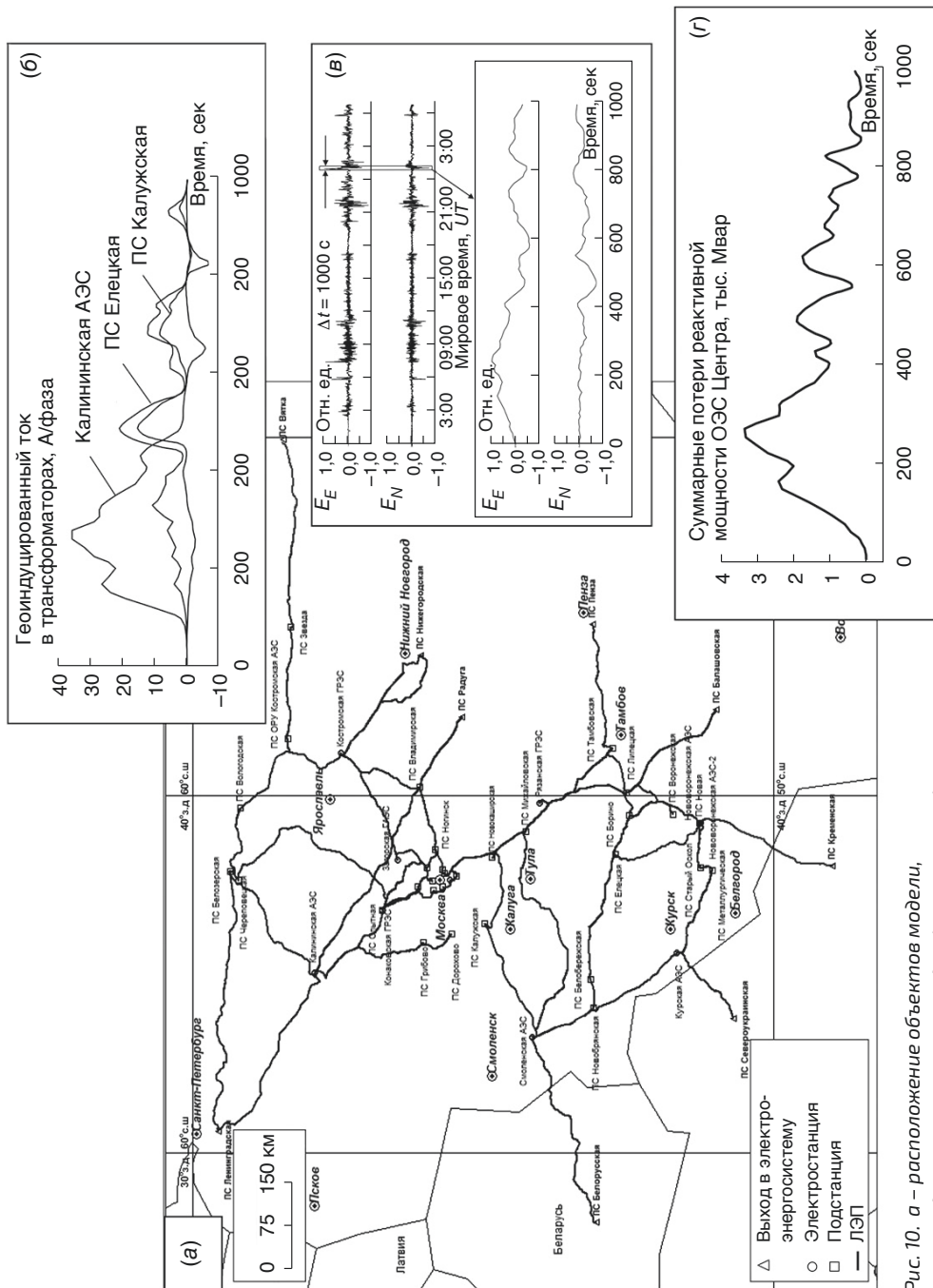


Рис. 10. а – расположение объектов модели, в – геоиндуцированные токи в однофазных трансформаторах, б – образцовая вариация геоэлектрического поля, г – потеря реактивной мощности в энергосистеме

прилегающих к разогретым частям конструкции. В американской энергосистеме зарегистрированы случаи выхода из строя блочных трансформаторов электростанций из-за воздействия на них геоиндуцированного тока.

Важность исследования влияния магнитных бурь на энергосистемы, расположенные не только в высокоширотных областях, обусловлена тем, что с ростом интенсивности бури район максимального воздействия смещаются в направлении низких широт. Согласно ряду исследований во время экстремальной магнитной бури максимальное воздействие ожидается на магнитных широтах 40–60 градусов. В потенциально опасную зону попадает энергонасыщенная густонаселенная часть территории России, что обуславливает актуальность исследования уязвимости расположенной там энергосистемы к воздействию геоиндуцированного тока.

Проводится расчетное моделирование воздействия сильной магнитной бури на энергосистему центра России (рис. 10). Ввиду отсутствия отечественной нормативной базы в качестве исходных данных использована образцовая вариация геоэлектрического поля из американского стандарта надежности.

В результате моделирования установлено, что воздействие магнитной

бури на трансформаторы вызывает значительный рост потребления ими реактивной мощности. Можно ожидать ложное срабатывание релейной защиты на некоторых линиях электропередачи. Расчеты нагрева стержневой пластины у наиболее подверженных воздействию бури трансформаторов, указывают на возможность отключения их от электросети или выхода из строя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Явления, протекающие в магнитосфере Земли, сложны и разнообразны, а их понимание необходимо для расширения представления о нашей среде обитания и возможностях негативного влияния на неё факторов космической погоды. Для этого необходимо комплексное изучение этих процессов, включающее натурные космические исследования, расчетно-теоретическое и экспериментальное лабораторное моделирование. Целенаправленное и систематическое развитие этого направления в России, несомненно, принесет свои результаты, как в плане дальнейшего научного описания красивых масштабных явлений в околоземном космическом пространстве, так и в плане организации мер по снижению их негативного влияния на жизнедеятельность.



издательство  
**НАУКА**  
— 1727 —  
**ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ  
ПЕРЕПЛЕТ**

Рисунок на коже  
Все виды тиснения  
Кожанный переплет  
Рельефное тиснение  
Клише любой сложности  
Полноцветная роспись обзоров  
**А также** адресные папки, дипломы, футляры

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

показана

QR code

**ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ  
В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ  
ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»**

КНИГИ    ЖУРНАЛЫ

## ЗАРЯЖЕННАЯ ПЫЛЬ НА ЛУНЕ

МОРОЗОВА Татьяна Игоревна,

кандидат физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394823060063

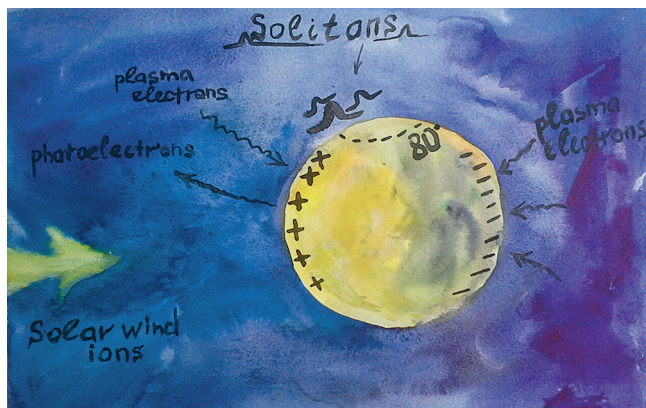


*Представлено описание плазменно-пылевой системы у поверхности Луны и рассмотрено, какие волны и неустойчивости могут возникать в данной системе при различных ситуациях, в том числе когда Луна находится внутри и вне хвоста магнитосферы Земли. Описан механизм зарядки пылевых частиц в приповерхностной лунной плазме. Отмечается влияние солнечного излучения и фотоэлектронов на зарядку пылевых частиц.*

### ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ЛУНЫ

Поверхность Луны состоит из реголита и покрыта слоем мелкораздробленных пылевых частиц. Сам реголит представляет собой смесь пироксенов, оливинов, ильменита и других пород. Слой пыли на Луне составляет несколько сантиметров и образован в результате ударных процессов. Луна – это безатмосферное тело, поэтому метеорные тела беспрепятственно достигают ее поверхности, приводя к появлению слоя мелкораздробленной пыли на поверхности Луны. Когда на Луну планировалась посадка первых посадочных миссий, и ученые

не знали, твердая она или мягкая, Королев решительным указанием написал, «поверхность Луны считать твердой». Оказалось, что практически так и есть. Размеры пылевых частиц составляют десятки нанометров и более. Кроме них на поверхности Луны присутствуют микроразмерные шарики из спекшегося лунного материала, образованные в результате высокоскоростной бомбардировки поверхности Луны метеороидами с большим энерговыделением. Под действием солнечного излучения и электронов, и ионов солнечного ветра, освещенная часть поверхности Луны и сами пылевые частицы заряжаются положительно (в основном в результате фотоэффекта, ког-



Зарядка поверхности Луны в представлении художника. Работа Т.И. Морозовой

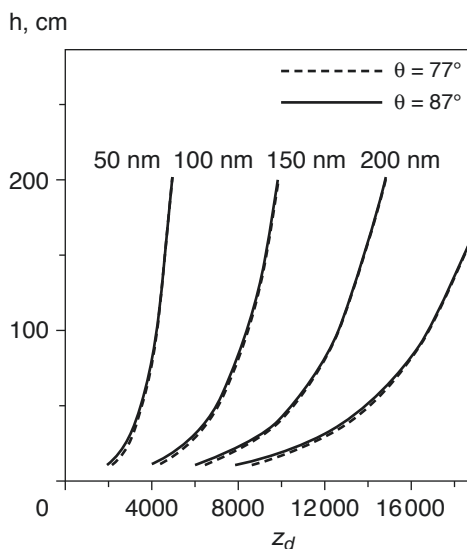
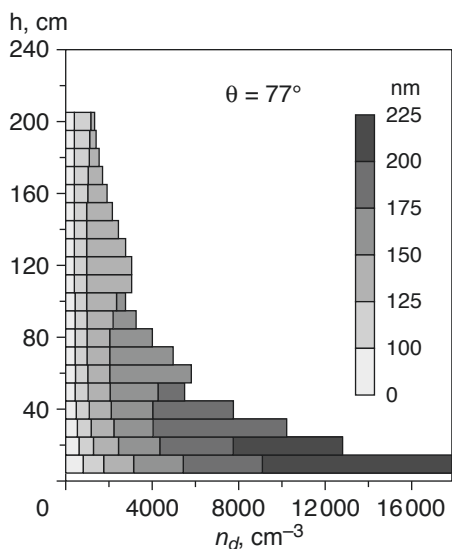
да с поверхности частиц выбиваются электроны, оставляя на пыли положительный заряд) (Popel S. I., Zelenyi L. M.). Таким образом, в результате действия сил электростатического отталкивания мелкие пылинки подскакивают над поверхностью. Обратная сторона Луны и пыль, которая ее покрывает, заряжаются в основном отрицательно из-за налипания на пылинки более мобильных по сравнению с ионами электронов.

У Луны практически отсутствует дипольное магнитное поле, однако имеются магнитные аномалии, связанные в основном с составом приповерхностных лунных пород и их обогащением железом. Максимум концентрации нейтралов также тяготеет к максимуму магнитных аномалий на Луне.

Луна, как уже говорилось, – это безатмосферное тело, однако оказывается, что у нее есть экзосфера (внешняя оболочка), которая состоит из нейтралов, электронов, ионов и заряженных пыле-

вых частиц. Поток заряженных частиц практически беспрепятственно проходит к поверхности Луны и образует плазменную тень за спутником, обтекая его. Нейтралы дрейфуют с освещенной части Луны на неосвещенную, где их концентрация оказывается выше. Днем водород практически свободно рассеивается в окружающем пространстве. Однако для гелия, аргона и других более тяжелых газов орбиты, по которым они движутся, возвращают их обратно на лунную поверхность. Получив новый импульс теплового движения, они начинают следующую фазу полета. На неосвещенной стороне Луны, где температура низка, частицам ничто не может сообщить достаточную энергию для их ускорения и поэтому они задерживаются на обратной стороне. Залететь с освещенной на неосвещенную часть частицам гораздо легче, и, таким образом, в тени концентрация нейтральных частиц больше, чем на освещенной стороне. Тяжелый газ аргон

Графики распределения концентраций и зарядов пылевых частиц у поверхности Луны от высоты над ее поверхностью в зависимости от угла между направлением солнечного ветра и поверхностью Луны (Т. И. Морозова, С. И. Копнин, С. И. Попель)



становится совсем неподвижным и адсорбируется поверхностью. В момент восхода Солнца к увеличенной концентрации за счет миграций частиц прибавляется еще одна волна частиц, освобожденных за счет нагрева солнечными лучами.

Таким образом, вокруг Луны образуется слой пылевой плазмы высотой 1–2 м от поверхности, состоящей из электронов, ионов, нейтралов и пылевых частиц с размерами пылинок порядка нескольких сот нанометров (Popel S. I., Golub' A. P., Zelenyi L. M.). Такая высота характерна для посадочных лунных миссий, поэтому задача изучения лунной пыли является актуальной с точки зрения понимания воздействия процессов в околослунной пылевой плазме на работу оборудования и влияния заряженной пылевой компоненты на исправность работы технических систем. В частности, возникновение электрических полей может мешать работе датчиков.

Стоит также отметить, что пыль может подниматься над лунной поверхностью и за счет других механизмов. Например, в результате удара метеороида и выброса вещества. Отдельные пылинки были обнаружены на высотах вплоть до 100 км над поверхностью Луны.

---

## ЛЕВИТИРУЮЩАЯ ПЫЛЬ

---

Как же ученые поняли, что на Луне существует левитирующая пыль? Интерес к пылевой плазме на Луне возник в результате наблюдений с посадочных лунных миссий. Во время космических миссий Apollo наблюдались лунные зори (lunar horizon glows) – рассеянный свет у лунного терминатора (Rennilson J. J., Criswell D. R.), что даже было запечатлено на фотографии. Терминатор – это граница света и тени, и именно в этой области

удобнее всего наблюдать за парящими пылинками. Последующие наблюдения показали, что при этом рассеяние солнечного света наиболее вероятно происходит на заряженных пылевых частицах, источником которых служит поверхность Луны. На основе данных спускаемых космических аппаратов «Surveyor» был сделан вывод, что пылевые частицы с размерами до 5 мкм могут подниматься над поверхностью Луны на высоты порядка 10 см. В миссиях Аполлон проводились наблюдения субмикронной пыли в лунной экзосфере на высотах вплоть до 100 км. В 2013 г. в американской миссии LADEE («Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer» – «Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды») лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты.

---

*Лунный терминатор и рассеянный пылевыми частицами свет.  
Фото с миссии Apollo*





Функция распределения фотоэлектронов по скоростям у поверхности освещенной части Луны представляется в виде суперпозиции двух функций распределения, характеризующихся различными температурами электронов: электроны с меньшей энергией выбиваются из лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода реголита, тогда как происхождение электронов с большей энергией связано с фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения (Rennilson J. J., Criswell D. R.). Существенное влияние на функцию распределения электронов в приповерхностной лунной плазме оказывает движение солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц.

Выбитые с поверхности пылевых частиц фотоэлектроны имеют разную энергию, так как образуются главным образом фотонами, соответствующими пику 10.2 эВ в спектрах солнечного излучения и фотонами с энергией, близкой к работе выхода лунного реголита. Также большое влияние на функцию распределения электронов в приповерхностной лунной плазме оказывает движение солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц. Данное свойство функции распределения приводит к возможности развития плазменных неустойчивостей и возбуждению высокочастотных волн.

---

## ЛУНА В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

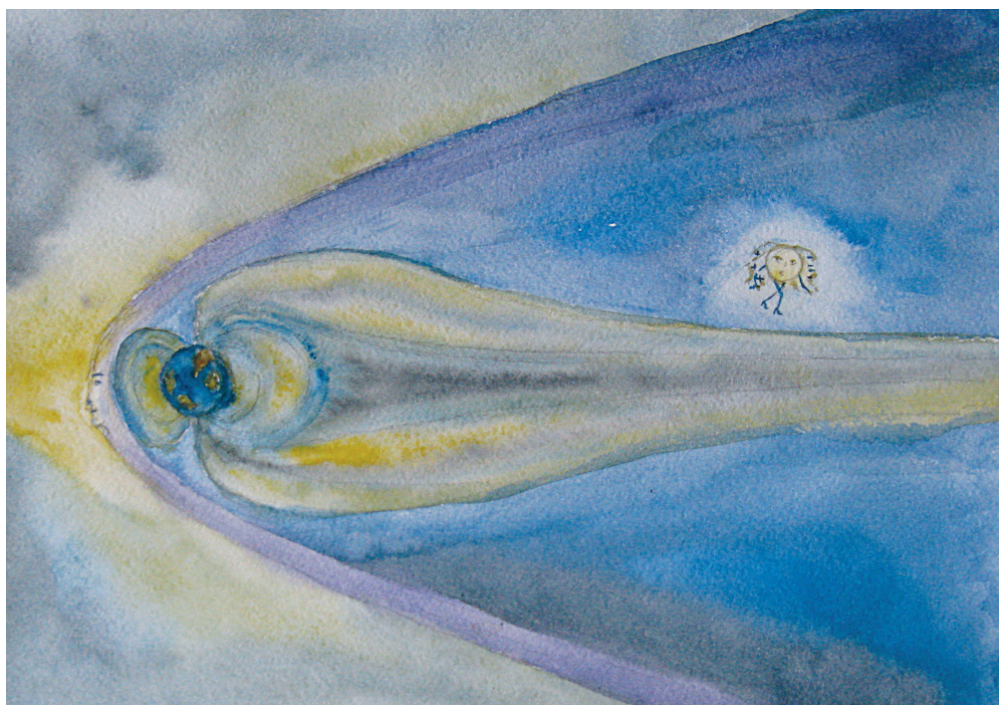
---

С практической точки зрения и в вопросах корректной работы оборудования особый интерес представляет возникновение электрических полей у поверхности Луны в результате развития турбулентных процессов, связанных

с различными модами колебаний. Данные волны, в свою очередь, возникают в системе в результате развития ряда неустойчивостей, для которых параметры плазменно-пылевой системы приповерхностной лунной плазмы оказываются подходящими. В частности, это кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, вызванные относительным движением пылевой плазмы у поверхности Луны и пылевой плазмы хвоста магнитосферы Земли (для случая, когда Луна находится в хвосте магнитосферы) (С. И. Попель, Т. И. Морозова).

Четверть своей орбиты Луна проводит в хвосте магнитосферы Земли. Во время этой фазы Луна вступает в область с более плотной плазмой и магнитными полями хвоста магнитосферы, которые также могут воздействовать на окололунную плазму и волновые процессы в ней в результате относительного движения двух плазменных систем.

В этой ситуации в процессе развития кинетической неустойчивости происходит возбуждение пылевых звуковых волн. Развитие гидродинамической неустойчивости приводит к генерации ионно-звуковых колебаний. В силу довольно длительного характера развития неустойчивостей в указанных двух ситуациях успевает установиться развитая плазменная турбулентность. В процессе развития нелинейных эффектов может устанавливаться плазменная турбулентность, вызванная неустойчивостями. В стационарном состоянии насыщения, когда рост неустойчивости ограничивается нелинейными процессами, имеет место турбулентный нагрев плазмы. При развитии ионно-звуковой турбулентности в плазменно-пылевой системе у Луны могут возбуждаться электрические поля, несколько меньшие электрических полей у поверхности Луны, возникающих в процессе зарядки ее поверхности при взаимодействии



*Проход Луны по хвосту магнитосферы Земли в представлении художника  
Работа Т.И. Морозовой*

Луны с солнечным излучением, но тем не менее вполне значимые для установления адекватной картины электрических полей над Луной – порядка 0.1 В против обычных лунных 1 В у поверхности.

Также в результате относительно движения плазмы солнечного ветра и лунной пылевой плазмы могут возникать линейные и нелинейные волны, например, солитоны. Солитон представляет собой уединенную волну, распространяющуюся по пространству без изменения своей формы, пока не происходит достаточно диссипации энергии и волна не распадается. Вдоль поверхности Луны могут распространяться одномерные солитоны, возбуждение которых может происходить, например, в области лунного терминатора (солитоны схематично изображены на первом рисунке рядом с областью

лунного терминатора, где могут возбуждаться).

Итак, возбуждение волн и неустойчивостей может приводить к возникновению электрических полей у поверхности Луны и влиять на работу посадочных лунных миссий.

---

## МИССИЯ ЛУНА-25

---

11 августа 2023 Россией была запущена миссия Луна-25 (продолжение советской лунной программы). Миссия была успешно выведена на окололунную орбиту, но 19 августа 2023 года из-за программных сбоев потерпела крушение на поверхности Луны, где образовался новый кратер. Однако она успела заснять лунную поверхность рядом с южным полюсом, где предполагалось искать запасы лунного льда, который обнаруживается там, в тени кратеров.

Данная задача очень интересна с точки зрения перспектив освоения Луны, создания лунной базы и производства на ней водородного топлива из водяного льда (при низком давлении на Луне вода не может существовать в жидком состоянии). Поэтому космические миссии с данными целями стоят в настоящее время в приоритетных задачах освоения ближнего космического пространства.

Вот такая сложная и нелинейная система с целым спектром плазменных колебаний находится в приповерхностном слое Луны, казалось бы, такой нам знакомой и близкой, но таящей в себе массу секретов и сложных процессов. Заряженная Луна неизвестностей полна!



Снимок аппаратурой СТС-Л космического аппарата «Луна-25» района кратера Зеeman на обратной стороне Луны. Фото ИКИ РАН

## Литература

1. Popel S.I., Zelenyi L.M. J. Plasma Phys. 2013. V. 79. No. 4. P. 405.
2. Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M. The European Physical Journal D. 2014. V. 68. No. 9. P. 245.
3. Т.И. Морозова, С.И. Копнин, С.И. Попель. Волновые процессы в пылевой плазме у поверхности Луны // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 10. С. 867–876.
4. Rennilson J.J., Criswell D.R. The Moon. 1974. V. 10. P. 121.
5. С.И. Попель, Т.И. Морозова. Волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 5. С. 474–484).

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-зале и на экспозиционных площадках издательства по адресу:

г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

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

# ПО СТОПАМ ЧИЖЕВСКОГО: ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА АГРЕССИВНОСТЬ КОММУНИКАЦИИ В ИНТЕРНЕТЕ

ОЖЕРЕДОВ Вадим Андреевич,

Институт космических исследований РАН

DOI: 10.7868/50044394823060075

*В статье рассматриваются подтверждения гипотезы о том, что настроения генерируемого текстового контента, по-видимому, можно рассматривать в качестве параметра, откликающегося на влияние космической погоды. В качестве показателя настроения рассматривается отклик нейросети, обученной на полтора миллионах сообщений с крупнейшего русскоязычного научного форума. Продемонстрирована связь появления текстовых сообщений с высоким уровнем эмоциональной окраски и возникновения рентгеновских вспышек на Солнце.*

---

## ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПСИХОЛОГИЮ ЧЕЛОВЕКА: PROS...

---

Человек не обладает абсолютной свободой воли, и сообщество землян в смысле закономерностей индивидуального и коллективного поведения не является изолированной системой. Именно к такому выводу пришел А.Л. Чижевский в 1920-х гг., именно этот вывод послужил причиной его конфликта с системой, стоявшей на тогдашней мейнстримной позиции «материалистического фундаментализма». Чижевский предположил существование физического фактора, влияние которого, с одной стороны, на отдельного индивида было принципиально не измеримым, но, с другой стороны, влияние на огромные популяции было, как он считал, очевидным<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Чижевский А.Л. Физические факторы исторического процесса. Калуга, 1924.

<sup>2</sup> Путилов А.А. Неравномерность распределения исторических событий в пределах 11-летнего солнечного цикла // Биофизика. Т. 37, № 4. С. 629–635. 1992.

В более поздних работах<sup>2, 3</sup> (значительный рост числа которых приходится на конец двадцатого – самое начало двадцать первого века) авторы приходят к тому же самому выводу, но уже с позиции хаотической динамики и математической статистики:

а) временные ряды изменения индексов социальной напряженности и творческой продуктивности явно носят неслучайный характер – меру объективной неслучайности можно получить через оценку корреляционной размерности ряда<sup>4</sup>;

б) временные ряды имеют достоверную связь с такими общеизвестными параметрами солнечной активности, как числа Вольфа (говоря грубо, число солнечных пятен) и Кр-индекс геомагнитной активности (этот показатель

---

<sup>3</sup> Ertel S. Space weather and revolutions. Chizovsky's sociobiological claim scrutinized. *Studia Psychologica*. V. 38. P. 3–21. 1996.

<sup>4</sup> См., например, Provenzale A., Smith L.A., Vio R., Murante G. Distinguishing between low-dimensional dynamics and randomness in measured time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. Volume 58, Issues 1–4, Pages 31–49, ISSN 0167-2789, 1992.

отражает возмущения геомагнитного поля). Поэтому имеется как минимум общая причина, обуславливающая изменения в поведении людей и поведении Солнца.

---

## ... AND CONS

---

Казалось бы, после ухода диалектического мировоззрения с территории советского и пост-советского пространства идеи Чижевского должны были получить признание на самом высоком уровне. В самом деле, на смену убеждению, что за теориями стоит объективная реальность, фундаментальные свойства которой по большей части уже изучены и потому никаких скрытых механизмов влияния среды на человека быть не может, пришел постпозитивистский настрой с его союзом теории и наблюдения, где третий, а именно реальность с ее устойчивостью и познаваемостью – лишний. Иными словами, теории создают математический аппарат, предсказывающий появление одних наблюдений и «запрещающий» появление других. Теории не дают ответа на вопрос «что как устроено на самом деле», поэтому появление «рояля в кустах» в виде непредсказуемых изменений некоторого измеримого параметра, поведение которого до сего момента маскировалось отсутствием наблюдательных инструментов или научного интереса к определенному аспекту задачи, в любой момент способно радикально поменять взгляд на заданный класс явлений природы.

Однако противники Чижевского попытались нанести удар его же оружием – статистикой. Предпочитающие иметь дело исключительно со стационарными выборками математики с их «*correlation does not imply causation*» («корреляция не подразумевает причинную связь») выкатили ряд работ, в которых рассматривались интерпретационные искажения результатов обработки данных, каза-

лось бы, обесценивающие «корреляционные» доказательства концепции Чижевского<sup>5</sup>. Одним из наиболее широко эксплуатируемых мемов на тему «корреляция, сколь бы достоверной она ни была, ничего не доказывает», является картинка, иллюстрирующая совместный ход временных зависимостей ежегодного количества людей, утонувших в бассейнах, и ежегодного же числа фильмов с участием Николаса Кейджа (см. рис. 1).

---

## МАЛЫЕ ЭФФЕКТЫ И БОЛЬШАЯ СТАТИСТИКА

---

Сложно спорить с тем, что «корреляционный» метод проверки идей Чижевского – это попытка редуцировать экстремально многофакторную зависимость параметров организма человека от всего-чего-угодно до линейной регрессии на один-единственный параметр (какую-либо характеристику солнечной активности).

Это может не сработать в случае, когда зависимость существует – потому что последняя нелинейна или потому что она может потонуть в случайном шуме, так как зависимость от Солнца явно на порядки слабее, чем от тонкого приповерхностного слоя Земли, называемого биотехносферой, или потому что под действием множества других факторов она резко меняет свою направленность, что при усреднении дает ровно «ноль». И, увы, это может-таки сработать в случае, когда никакой зависимости нет – см. пример с Николасом Кейджем.

Поэтому мы предлагаем подход, основанный на одновременной реакции экстремально больших популяций людей на изменение некоторой характеристики солнечной активности

---

<sup>5</sup> В популярном изложении об этом можно прочитать в Hamilton Chang. Nicholas Cage – Spurious Pool Savior? Testing that Spurious Correlation. Towards Data Science, <https://towardsdatascience.com/nicholas-cage-pool-saviour-9c13feaff6f>, 2019.

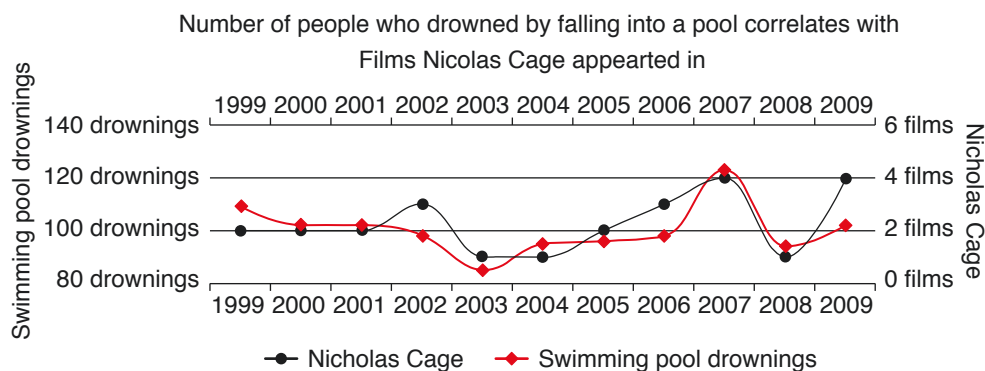


Рис. 1. Пример ложной (а ложной ли?) корреляции между ежегодным числом инцидентов в бассейнах и вариацией востребованности Николаса Кейджа. Источник: Hamilton Chang. *Nicholas Cage – Spurious Pool Savior? Testing that Spurious Correlation. Towards Data Science*, <https://towardsdatascience.com/nicholas-cage-pool-saviour-9c13feafff6f>, 2019. Впрочем, учитывая очень большое число факторов, обуславливающих смертность в бассейнах, сложно наверняка утверждать, что число фильмов с этим актером не имеет к ним никакого отношения

(назовем ее *предиктором*). Вопрос лишь в том, отклик какого параметра (назовем его *адаптором*) целесообразней рассматривать.

При этом понятно, что необходимо будет получать значения адаптора у большого количества людей внутри достаточно малых интервалов времени, на которых не слишком сильно меняется предиктор. Это позволит «вытащить» слабый эффект из-под уровня шума. Так же понятно, что если искомый отклик существенно нелинейный и/или хаотично меняет знак под действием тысячи факторов, мы ничего не найдем. Однако в случае обнаружения статистически достоверной связи апеллировать к эффекту «spurious correlations» («ложных корреляций») будет невозможно, потому как один и тот же отклик не может случайным образом практически синхронно повторяться столь большое количество раз.

Следующий вопрос – каким параметром организма человека должен являться адаптор, чтобы его можно было почти одновременно измерять у большого количества людей, желательно сильно разнесенных в пространстве

(чтобы усреднить локальные влияния среды)?

В середине 2000-х гг.<sup>6</sup> предпринимались попытки создать интернациональную мониторинговую сеть для одновременного получения больших выборок физиологических параметров. Он закономерно закрылся по очень простой причине – никому не интересно аккуратно и регулярно самоизмеряться на безвозмездной основе. В настоящий момент идея массового мониторинга людей с целью проверки гелиобиологических гипотез получила второе дыхание в связи с повсеместным распространением смарт-часов, однако есть нюанс: «подружить» ее с законом о защите личной информации будет не так просто.

Таким образом, решением, лежащим на поверхности, становится измерять то, что легко доступно. Иными словами, мониторить поведение большой

<sup>6</sup> Рагульская М.В., Чибисов С.М., Вишневский В.В., Тугаенко А.М. Автоматизированный математический прогноз космо-биосферных связей (по результатам телекоммуникационного мониторинга «Гелиомед» 2006–2007 гг). *Здоровье и образование в XXI веке*. № 2, 2007.

популяции. Отслеживание жестов, перемещения или спектрального состава голоса человека называется «сталкинг» (stalking), это, увы, статья, причем далеко не в рецензируемом журнале. Однако существует психофизиологический параметр, измерение которого запретить попросту невозможно, – это эмоциональная окраска письменного контента (генерируемого для публичного доступа) – например, сообщений, опубликованных на крупнейшем российском научном форуме dxdu<sup>7</sup> за 17 лет.

Заметим, что такой подход удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям: адаптор генерируется большой выборкой (число участников форума под сто тысяч), эффективно разнесенной в пространстве (на dxdu пишут как жители всего бывшего СНГ, так и переселенцы в гораздо более удаленные государства).

Скажем вот что еще. Этот форум оказался нам удобной площадкой для тестирования гипотезы, поскольку есть интуитивное убеждение, что психика регулярно пишущих на форумах (и где бы то ни было) индивидов сильно отличается от среднестатистической «нормы». Более того, именно на форуме, изначально созданном для отстраненных и логически выверенных обсуждений прежде всего естественнонаучных вопросов, особенно ярко выделяются любые эмоционально окрашенные тексты (об этом подробно напишем ниже), и их сравнительно легко отлавливать при помощи алгоритмов машинного обучения.

---

## СЕМАНТИЧЕСКОЕ ЯДРО

---

Обычно настроения текстов делят на три класса: положительный, отрицательный и нейтральный. Однако для наших целей больше подходит другое деление – удобно выделить три класса сообщений, условно отвечающих опре-

деленным разделам форума (классы индексируются буквой  $\alpha$ ):

- $\alpha = 1$  неврастенические сообщения – это (скажем так, по нашему определению) текстовый контент, написанный в моменты, когда эмоции сильно доминируют над разумом;

- «свободный полет» – спокойные и логически выверенные беседы на темы, не имеющие непосредственного отношения к науке;

- $\alpha = 3$  чисто научные дискуссии.

Тексты раздела 1 вполне могут содержать положительную эмоциональную окраску (радость от изобретения «вечного двигателя»), а 2 или 3 (например, трезвое и спокойное описание трудностей решения задачи в чисто научном сообщении) – отрицательную.

Понятно, что модераторы распределяют темы по разделам 1, 2, 3 либо оставляют тему в том разделе, где она находилась изначально, если таковой раздел кажется им подходящим, на основе самого первого сообщения. Но, даже если в теме будут появляться сообщения, явно не соответствующие по духу стартовому посту, вероятность того, что тема спустя энное количество сообщений переместится в другой раздел, близка к нулю.

Отсюда следует, что неврастенические сообщения могут в любой момент появиться в разделах 2–3, и для их распознавания потребуется алгоритм машинного обучения (в нашем случае он базируется на аппарате *семантических ядер*). В качестве обучающей выборки неврастенических сообщений для такого алгоритма подойдут сообщения из раздела 1 (обратим особое внимание на различие в терминологии: сообщение принадлежит разделу  $\alpha$ , если оно в нем находится, и классу  $\alpha$ , если бы оно, будучи стартовым, было помещено в раздел  $\alpha$  достаточно объективным модератором).

Семантическое ядро – это множество лексем (в нашем случае пусть будет – слов), отвечающих за один из стилей речи, характерных для некоторого класса сообщений. Понятно, что одно-

---

<sup>7</sup> <https://dxdu.ru/search.php>, год обращения: 2023.

му классу может соответствовать несколько ядер, но при этом одному ядру должен соответствовать только один класс. Множество семантических ядер ищется на основе исходного распределения сообщений по разделам форума. Далее, исходя из наполнения текста словами, принадлежащими к ядрам разных классов, сообщению присваивается вектор признаков (его длина равна общему количеству ядер), который вместе с классом текста составляет *прецедент* (эту операцию будем называть *векторизацией* сообщения). На выборке векторизованных сообщений далее обучается нейронная сеть.

Таким образом, неупорядоченные данные типа текстов совершенно разной длины становятся точкой в пространстве вполне определенной размерности. Затем уже обученная на прецедентах нейросеть применяется ко всем векторизованным сообщениям форума, после чего ищется зависимость между моментами появления всплесков солнечной активности, характеризующихся рентгеновскими вспышками, и моментами появления неврастенических сообщений, на которые достаточно «бурно» реагирует нейросеть.

Для создания семантических ядер используется метод *иерархической кластеризации*. Последний итеративно объединяет пару наиболее близких друг другу кластеров предыдущего уровня для создания кластера следующего уровня (кластерами нулевого уровня являются исходные объекты, т. е. слова). Заметим, что таким образом метод требует определения расстояния между кластерами. Построение расстояния между объектами (словами и кластерами) происходит в два этапа:

- все слова приводятся к своей нормальной (словарной) форме (лемматизация), и среди них отбираются те, которые встречаются не менее чем в ста сообщениях любого класса;

- расстояние между словами вычисляется через нормированный на диапазон  $[0, 1]$  коэффициент согласования частот их появления в разделах  $\alpha = 1, 2, 3$ .

- расстояние между кластерами определяется через расстояние входящих в кластер слов по формуле Ланса-Вильямса<sup>8</sup>, см. [10].

Примеры наиболее далеких в смысле согласования частот появления в разделах 1, 2, 3 слов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Пары наиболее удаленных друг от друга слов (в смысле частот встречаемости в сообщениях разного типа)**

| Слово i        | Слово j     | Расстояние (i, j) |
|----------------|-------------|-------------------|
| уравнение      | человек     | 0.395041708       |
| задача         | наука       | 0.320511867       |
| равный         | философия   | 0.29011972        |
| интеграл       | реальность  | 0.258734941       |
| спасибо        | сознание    | 0.249179403       |
| коэффициент    | тема        | 0.242616652       |
| переменный     | научный     | 0.236006642       |
| скорость       | Россия      | 0.227450882       |
| нуль           | философский | 0.224783839       |
| квадрат        | жизнь       | 0.213895966       |
| координата     | страна      | 0.207937706       |
| производный    | объективный | 0.201283919       |
| линейный       | форум       | 0.198027591       |
| матрица        | философ     | 0.192458908       |
| величина       | причина     | 0.189298668       |
| модуль         | ученый      | 0.183363359       |
| точка          | жить        | 0.181937688       |
| преобразование | слово       | 0.18052512        |

<sup>8</sup> См. *Ah-Pine J. An Efficient and Effective Generic Agglomerative Hierarchical Clustering Approach. Journal of Machine Learning Research. Vol. 19, no. 42, P. 1–43, 2018.*



Видно, что большинство слов в левом столбце относятся к естественно-научным текстам, а в правом – к философским. Заметим, что к «естественнонаучному» ядру относится слово «спасибо» – это вполне понятно, так как результаты научных обсуждений в дальнейшем конвертируются во вполне материальные ценности, такие как индекс Хирша или технические решения для коммерческих проектов. Да и, в целом, его можно назвать вполне естественным для научного дискурса – «спасибо моему уважаемому оппоненту».

---

## ВЕКТОРИЗАЦИЯ ТЕКСТА

---

Для того чтобы не ограничивать себя рамками чисто линейных эффектов, вместо поиска корреляций временных рядов мы ищем связи между появлениями определенных событий: в качестве драйвера рассматривается момент появления рентгеновской вспышки на Солнце, а в качестве отклика – момент появления надпорогового сигнала на выходном нейроне нейросети, отвечающем за класс неврастенических сообщений (сайт dxdu позволяет получить время отправления сообщений с точностью до минуты).

Иными словами, в данной задаче нейронная сеть – это инструмент генерации адаптора. Веса нейросети предварительно настраиваются на наиболее точную классификацию всех полумиллионов исходных сообщений с форума, а в качестве вектора входных признаков, попадающего на вход нейросети, выступает набор так называемых *коэффициентов покрытия* семантическими ядрами. Покрытие сообщения – это доля встречающихся в нем элементов семантического ядра – оно равно единице (100%), если все слова, принадлежащие данному ядру, присутствуют в тексте сообщения, и равно нулю, если таковые полностью отсутствуют.

Для эффективного разделения векторизованных сообщений на два класса (неврастенические и все остальные) соответствующие им векторы коэффициентов покрытия должны занимать все доступное им пространство, а не «ютиться» вблизи начала координат, поэтому перед нами стояла еще одна оптимизационная задача по тонкой подстройке функционала расстояния Ланса-Вильямса, при которой алгоритм кластеризации будет генерировать набор семантических ядер, наиболее равномерно «размазывающий» выборку векторизованных текстов по пространству.

Сотня слов от шести полученных в результате решения данной оптимизационной задачи ядер с наиболее «интересным» составом продемонстрированы в табл. 2.

---

## ТЕСТИРОВАНИЕ СВЯЗИ ПОЯВЛЕНИЯ НЕВРАСТЕНИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

---

Получая на вход предварительно векторизованное сообщение, нейросеть выдает на выходе число от нуля до единицы (к 0 стремится значение сообщений, которые нейросеть относит к «обычным», к 1 – «неврастеническим»). Экспертная граница, отделяющая низкие значения на выходе сети, сигнализирующие о принадлежности входного сообщения к классу неврастенических, называется *порогом срабатывания*.

Будем варьировать порог срабатывания нейросети  $p^*$  от 0.5 до 0.95. Назовем событием-драйвером появление рентгеновской вспышки и событием-откликом – появление надпорогового срабатывания выходного нейрона, ассоциированного с классом  $\alpha = 1$ : неврастенические сообщения. Понятно, что если между ними есть связь, то от-

**Фрагменты состава шести наиболее ярких семантических ядер с указанием предполагаемой тематики покрываемых ими сообщений**

| ФИЛОСОФИЯ     | ФИЗИКА + ФИЛОСОФИЯ | ПОЛИТИКА    | ФИЗИКА БЕЗ ФИЛОСОФИИ | МАТЕМАТИКА  | КОНСПИРОЛОГИЯ |
|---------------|--------------------|-------------|----------------------|-------------|---------------|
| человек       | теория             | страна      | координата           | уравнение   | экономика     |
| наука         | физика             | жить        | вектор               | функция     | игра          |
| философия     | определение        | деньги      | матрица              | задача      | американский  |
| реальность    | объект             | сейчас      | поле                 | интеграл    | смерть        |
| сознание      | материя            | оффтоп      | энергия              | нуль        | политика      |
| научный       | модель             | ребенок     | ускорение            | решение     | Китай         |
| философский   | эксперимент        | образование | импульс              | квадрат     | рынок         |
| жизнь         | квантовый          | государство | плотность            | сумма       | борьба        |
| объективный   | явление            | власть      | расстояние           | неравенство | купить        |
| себя          | наблюдение         | никто       | двигаться            | разность    | запад         |
| философ       | система            | статья      | параметр             | многочлен   | политический  |
| причина       | тело               | СССР        | константа            | плоскость   | любовь        |
| учёный        | взаимодействие     | общество    | конечный             | теорема     | Ленин         |
| слово         | механика           | народ       | постоянный           | отрезок     | медицинский   |
| знание        | теоретический      | большинство | частота              | базис       | идиот         |
| мочь          | объяснение         | население   | оператор             | сходимость  | международный |
| мозг          | наблюдатель        | город       | бесконечность        | разложение  | нефть         |
| существование | гипотеза           | российский  | магнитный            | кривая      | исторический  |

клик будет появляться непосредственно после драйвера гораздо чаще, чем драйвер – непосредственно после отклика, и таким образом, проверка гипотезы об отличии медианных расстояний между ближайшими откликом и драйвером слева и справа (скажем, при помощи одностороннего непараметрического критерия Вилкоксона) должна дать положительный результат.

В качестве критерия биотропности можно использовать отношение средней дистанции от отклика до непосредственно следующего за ним драй-

вера к средней дистанции от драйвера до непосредственно следующего за ним отклика. (Пример: после появления вируса гриппа в городе, персистирующего, допустим раз в год, сферический в вакууме индивид заболевает через одну неделю; таким образом, в среднем между появлением вируса и заболеванием проходит примерно 7 дней, а между заболеванием и следующим появлением вируса – 358 дней, и биотропность вируса примерно  $358/7 = 51.14$ .)

Результат наложения зависимости уровня значимости Вилкоксона и биотропности как отношения вышеописанных средних изображен на рис. 2.

Видно, что, во-первых, отношение средних значений монотонно растет и при  $p^* = 0.95$  достигает значения более полутора. Вблизи этого порога отсека перестает работать непараметрический критерий Вилкоксона вследствие недостаточной статистики откликов (при больших порогах нейросеть слишком часто отказывается от принятия решений). Однако, вплоть до  $p^* \approx 0.95$  уровень значимости критерия (уровень значимости – это вероятность получить столь же или даже более «впечатляющие» с точки зрения биотропного эффекта результаты при полном отсутствии связей между сообщениями и космической погодой) практически монотонно снижается вплоть до нуля, что явно указывает на связь между моментами вспышек и моментами появления неврастенических сообщений. Иными словами, уровень значимости критерия – это вероятность получить результаты эксперимента в условиях, когда искомая связь отсутствует. Понятно, что чем такая вероятность ниже, тем связь более «выпукла».

**Заключение:** полученный нами вывод о существовании значимой связи между космической погодой и эмоциональным состоянием по крайней мере некоторой хорошо очерченной группы людей, весьма многочислен-

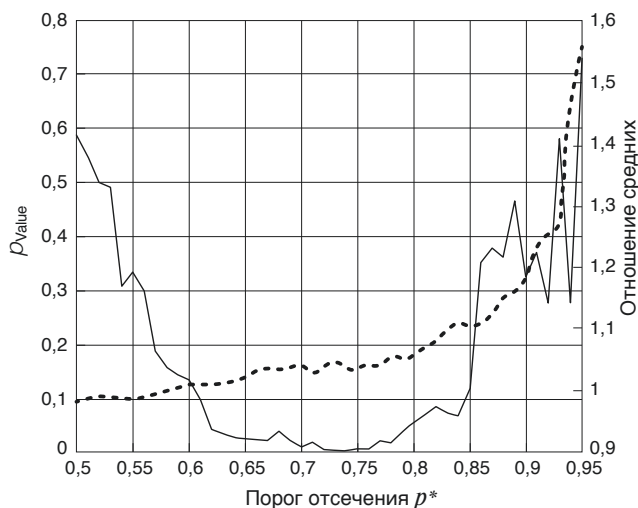


Рис. 2. Зависимость уровня значимости  $p_{Value}$  непринятия гипотезы о равенстве медианных расстояний между ближайшими откликом и драйвером слева и справа (левая ось, сплошной график) и отношения среднего расстояния между откликом и ближайшим к нему драйвером и драйвером и ближайшим к нему откликом, играющее роль биотропности параметра космической погоды (правая ось, прерывистый график) от порога срабатывания выходного нейрона  $p^*$

ной и рассредоточенной на значительной части земной поверхности, позволяет, во-первых, подтвердить вывод Чижевского о связи поведенческой психологии человека и солнечной активности на популяционном уровне, и во-вторых – вплотную приблизиться к созданию методов прогноза массовых психологических срывов. Позволим себе завершить изложение несколько вольно – такие прогнозы (как и любые другие) могут использоваться как во благо человечества (планирование дополнительных выходных дней, внеурочные акции в магазинах), так и во вред ему (например, обрушение в нужный момент котировок некоторых финансовых инструментов). Но это уже, как говорится, совсем другая история.

## ТЕМНОЕ И СПОКОЙНОЕ НЕБО

ШУСТОВ Борис Михайлович,

член-корреспондент РАН

Институт астрономии РАН

DOI: 10.7868/50044394823060087

**В** последние годы большое внимание в мире уделяется проблеме влияния технологий на перспективы развития астрономических наблюдений с поверхности Земли и из околоземного космического пространства. Эта проблема, получившая название проблемы темного и спокойного неба (точнее Dark and Quiet Sky, D&QS), имеет глобальный характер. Этой проблеме было посвящено несколько крупных международных конференций и совещаний. (Dark and Quiet Skies I (2020), Report of the conference held 5–9 October, 2020, Dark and Quiet Skies II (2021), Report of the conference held 3–7 October, 2021 – читатели могут найти материалы этих конференций в интернете). Чтобы не перегружать эту статью ссылками на источники таблиц, рисунков и других данных, рекомендую обратиться к моей недавней статье (Б.М. Шустов, Спутниковые мега-созвездия и проблема темного и спокойного неба // Астрономический журнал. Том 99. № 8. С. 694–704. 2022).

Выделяют три категории искусственных помех, отрицательно влияющих на астрономические наблюдения:

а) искусственное освещение в ночное время;

б) оптические/инфракрасные следы на астрономических приемниках излучения от спутников на низких околоземных орбитах;

в) передача радиосигналов наземными и космическими излучателями, особенно со спутников на низкой околоземной орбите.

### ПРОБЛЕМА ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ В НОЧНОЕ ВРЕМЯ

Помехи астрономическим наблюдениям от искусственного освещения в ночное время (в англоязычной литературе обычно используется аббревиатура ALAN – Artificial Light at Night) обсуждаются мировым астрономическим сообществом уже не менее двух десятков лет, а на локальном уровне гораздо дольше. Она стала острой в связи с появлением светодиодов, особенно излучающих интенсивный синий свет. Международный астрономический союз (МАС) установил рекомендуемый максимально допустимый порог светового загрязнения для мест расположения астрономических обсерваторий на 10 процентов выше естественного фонового уровня. А что это такое – естественный фон? В табл. 1 показаны средние вклады в яркость ночного неба в зените для широты, равной 40° с.ш.

Таблица 1

| Компонент                    | Вклад (%) |
|------------------------------|-----------|
| Свечение атмосферы           | 47.7      |
| Зодиакальный свет            | 27.5      |
| Звездный свет                | 21.7      |
| Диффузный галактический свет | 2.9       |
| Внегалактический фон         | ~0.2      |

Как обычно, в астрономии рассматривается фоновое излучение с одной квадратной секунды неба. Считается, что яркость ночного неба на обсерва-

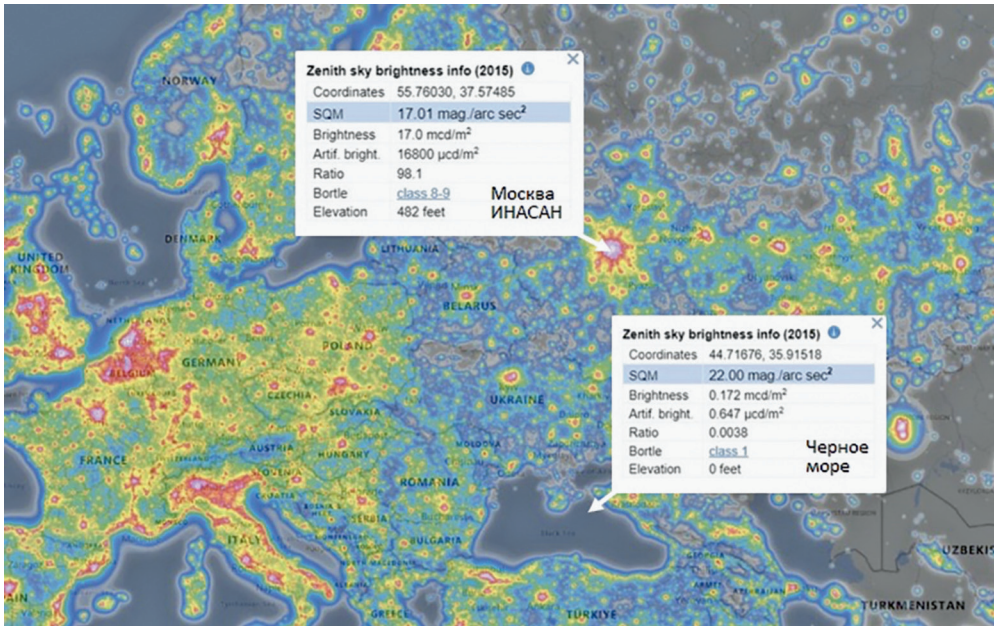


Рис. 1. Яркость ночного неба в избранных местах нашей планеты

тории, расположенной в лучшем для астрономическом наблюдений месте, составляет в полосе V около 22 м/кв. сек. Используя известный онлайн сервис для расчета яркости ночного неба The World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness (см. <http://www.lightpollution.it/worldatlas/pages/fig1.htm>), можно оценить среднюю яркость в различных местах нашей планеты. На рисунке приведен пример использования этого сервиса.

Как видно из табл. 1, естественное свечение атмосферы на указанной широте создает почти половину фона. Выход за пределы атмосферы улучшает ситуацию, уменьшает фон, но не так сильно, как обычно представляют. Здесь существенный вклад в фоновую засветку вносит зодиакальный свет, создаваемый рассеивающим излучением Солнца окосолнечным пылевым диском. Фоновая яркость существенно зависит от углового расстояния до Солнца. На рисунке показано

распределение яркости зодиакального света в видимом диапазоне согласно. Яркость принимает минимальные значения в области полюсов эклиптики. Распределение яркости звездного фона (третья строка в табл. 1 также неоднородно. Звездный фон создается звездами Галактики и, естественно, дает наименьший вклад в области галактических полюсов. В целом, встречающееся в литературе минимальное значение фоновой яркости в 25m на квадратную угловую секунду может встречаться в весьма ограниченных областях небесной сферы.

Уровень светового загрязнения во всем мире ежегодно возрастает на 2–6%, и многие места расположения обсерваторий уже находятся в зонах неприемлемо высокого светового загрязнения. Помимо влияния на астрономию, искусственное освещение в ночное время может оказывать значительное биологическое воздействие на флору и фауну.

Вредное воздействие ALAN значительно больше для синей компоненты света. Согласно представлениям медиков, синий свет подавляет выработку мелатонина. Наша система сбалансирована так, чтобы подавлять выработку в течение дня, позволяя при этом вырабатывать его в темные часы ночи. Поскольку мелатонин может играть определенную роль в подавлении раковых опухолей, синий свет ночью может способствовать увеличению риска для здоровья. В мире как раз отмечается рост производства экономичных светодиодных (LED) ламп, имеющих значительную синюю ( $1 < 500$  нм) компоненту излучения.

Экономика определяет многое, если не все. Было довольно много попыток использовать даровой солнечный световой поток для освещения больших площадей на Земле (особенно в северных районах) с помощью размещенных в космосе гигантских зеркал. Такой проект («Знамя») был и в России. Планировалось добиться освещения в пятне диаметром 7–8 км в 5–10 раз выше освещения от полной Луны. Таким «солнечным зайчиком» можно было бы управлять, перемещая его или подолгу удерживая на месте. Эксперимент был проведен в 1993–1994 гг. Первый пробный запуск в 1993 г. оказался удачным, но во время раскрытия зеркала на орбите в 1994 г. произошел сбой. Спутник затопили, а проект закрыли.

Помехи астрономическим наблюдениям от искусственного освещения в ночное время становятся (в ряде мест уже стали) острой проблемой. Астрономы пытаются решать эту проблему как на уровне МАС, так и на локальном уровне. В России астрономы РАН и вузов также пытаются обратить внимание государственных органов на проблему.

В последнее время есть признаки того, что российские органы власти начинают обращать внимание на обращения ученых, но успокаиваться нельзя.

---

## ПРОБЛЕМА ВЛИЯНИЯ МЕГА-СОЗВЕЗДИЙ ИСЗ НА АСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

---

Крупные группировки спутников (т.н. мега-созвездия) представляют собой новую проблему для астрономии ввиду огромного количества ИСЗ, яркости на фоне неба (вследствие оптического отражения или теплового излучения), расположения повсюду в небе (по сравнению со спутниками на геостационарной орбите, находящимися в пределах одного «пояса»). Проблемы б) и в) из приведенного выше списка все более обостряются в связи с интенсификацией запусков мега-созвездий ИСЗ. Примеры таких спутниковых созвездий, реализация которых идет полным ходом, известны всем. Это мега-созвездия *Starlink*, *OneWeb*, *Amazon*, *Samsung* и др., включая отечественный проект «Сфера».

По различным оценкам из интернет-источников, за три года с начала 2019 г. число активных спутников в околоземном пространстве (ОКП) увеличилось с ~2000 до ~7000 (см. также рис. 2). Кроме того, в ОКП насчитывается ~3000 неактивных спутников. Согласно данным Международного союза электросвязи (МСЭ, международное название – *ITU*, *International Telecommunication Union*) и другим источникам, в ближайшее десятилетие на низкую околоземную орбиту могут быть выведены около 100 000 спутников, и несколько компаний уже приступили к созданию и запуску гигантских спутниковых группировок. В табл. 2 перечислены некоторые часто упоминаемые мега-созвездия ИСЗ и приведены их основные параметры: количество ИСЗ, диапазон высот, диапазон наклонений.

Рис. 2. Распределение яркости зодиакального света в видимом диапазоне в эклиптических координатах ( $\lambda$ ,  $\beta$ ). Числа на рисунке – яркость в звездных величинах на квадратную угловую секунду

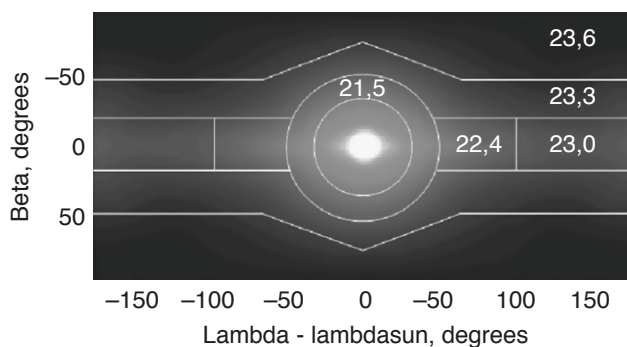


Таблица 2

### Некоторые спутниковые мега-созвездия

| Название группировки   | Диапазон высот км | Диапазон наклонений град. | Количество ИСЗ |
|------------------------|-------------------|---------------------------|----------------|
| Starlink Generation 1  | 335–560           | 42–97                     | 11 926         |
| Starlink Generation 2  | 328–614           | 30–148                    | 30 000         |
| Amazon Kuiper          | 590–630           | 33–52                     | 3236           |
| OneWeb Phase 1         | 1200              | 88                        | 1980           |
| OneWeb Phase 2 revised | 1200              | 40–88                     | 6372           |
| GuoWang GW-A59         | 508–1145          | 30–85                     | 12 992         |
| Общее количество       |                   |                           | 66 506         |

Основная цель этих спутниковых созвездий – обеспечить связь и интернет с низкой задержкой в любом регионе земного шара. Хотя эти усилия могут принести огромную пользу обществу, влияние полностью развернутых созвездий на профессиональные астрономические наблюдения пока что не было должным образом изучено и учтено. Из-за низких орбит значительное число спутников может быть видно даже невооруженным глазом, особенно на малых высотах над горизонтом в сумерках и на рассвете. Новые спутники будут ярче, чем 99% объектов, находящихся сейчас на орбите!

На рис. 3 показаны типично представляемые конфигурации мега-созвездий *One-Web* и *Starlink* [8]. Конечно, детальная конфигурация выглядит сложнее. ИСЗ запускаются группами по различным орбитальным плоскостям и/или по различным оболочкам.

В табл. 3 приведены типичные характеристики ИСЗ из мега-созвездий: блеск и приведенный размер. Типичные размеры спутников – несколько метров, а типичное альbedo ~0.25.

Значения альbedo и размеров в табл. 3 приведены как оценочные (усредненные). Структура и отражающие свойства конкретных ИСЗ разнообразны. На рис. 4. показан как пример технический облик космического аппарата *Starlink*.

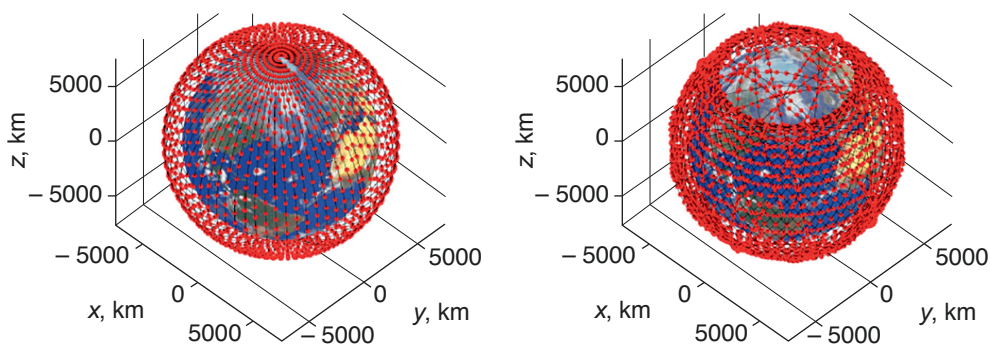


Рис. 3. Примерный вид конфигураций мега-созвездий Starlink (справа) и OneWeb (слева)

Таблица 3

### Характеристики ИСЗ некоторых мега-созвездий

| Название ИСЗ      | Рабочая высота (км) | Звездная величина на рабочей высоте | Разброс звездных величин | Звездная величина на высоте 1000 км | $pr^2$ (м <sup>2</sup> ) | $p$  | $r$ (м) |
|-------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------|---------|
| Starlink original | 550                 | 4.6                                 | 0.7                      | 5.9                                 | 0.085                    | 0.25 | 0.58    |
|                   |                     | 4.0                                 |                          | 5.3                                 | 0.152                    | 0.25 | 0.78    |
|                   |                     | 4.2                                 |                          | 5.5                                 | 0.125                    | 0.25 | 0.71    |
| Starlink DarkSat  | 550                 | 5.1                                 |                          | 6.4                                 | 0.056                    | 0.08 | 0.71    |
| Starlink          | 550                 | 6.2                                 | 0.8                      | 7.5                                 | 0.023                    | 0.25 | 0.30    |
| VisorSat          |                     | 5.8                                 | 0.6                      | 7.1                                 | 0.028                    | 0.25 | 0.33    |
| OneWeb            | 1200                | 7.6                                 | 0.7                      | 7.2                                 | 0.027                    | 0.25 | 0.33    |

Примечание:  $p$  – примерное альbedo;  $r$  – оценочный радиус

КА *Starlink* – это тонкая прямоугольная шина  $3.0 \times 1.5 \times 0.2$  м, изготовленная в основном из алюминия со многими конструктивными особенностями, такими как двигатели и плоские антенны, обращенные к надиру, и большая (длинная) солнечная панель, состоящая из 12 сегментов  $3.0 \times 0.8$  м каждый. Доступная информация о массе дает оценку в  $\sim 260$  кг. На центральной панели рис. 4 основной корпус КА показан в двух вариантах: обычном (вверху) и *DarkSat* (внизу). Модификация *DarkSat* была реализована корпорацией *SpaceX* в ответ на обращения астрономов с просьбой уменьшить отража-

тельную способность КА в оптическом диапазоне. *DarkSat* отличается темным покрытием на панелях антенн, обращенных к надиру, которые ранее были белыми. Для *DarkSat* альbedo  $\sim 0.08$ . Темное покрытие уменьшает отраженный свет, видимый наблюдателям на Земле. Однако в последнее время большее предпочтение отдано показанному на правой панели варианту *VisorSat* (КА со светоблокирующими козырьками). Введение козырьков позволило существенно снизить блеск КА.

Звездная величина ИСЗ зависит не только от параметров самого КА, но и от расстояния между наблюдателем



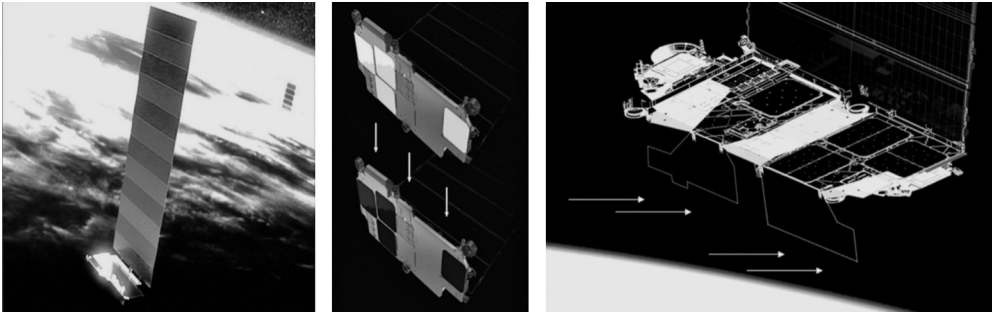
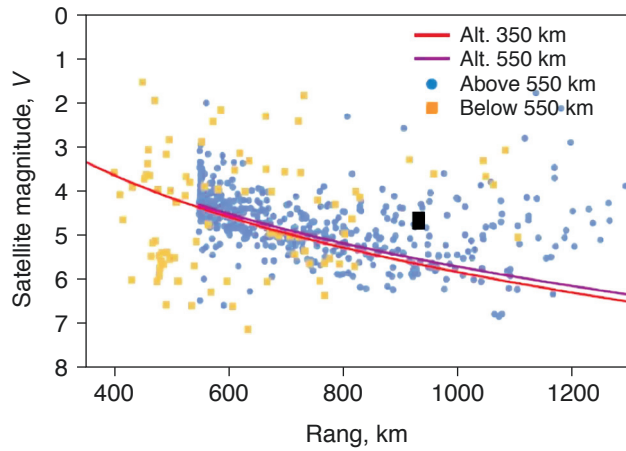


Рис. 4. Слева – общий вид КА Starlink. В центре – корпус КА в двух вариантах: обычный (вверху) и DarkSat (внизу). Справа – вариант КА VizorSat

Рис. 5. Блеск ИСЗ Starlink в зависимости от расстояния между наблюдателем и ИСЗ. Линии получены с использованием упрощенной модели сферы Ламберта для двух высот



и ИСЗ и от условий освещенности. На рисунке показан наблюдаемый блеск ИСЗ *Starlink* и расстояние до наблюдателя. Наблюдения проводились в Аризоне на мобильном роботe-телескопе *Pomenis* апертурой 180 мм, с полем зрения 4.2. Теоретические кривые получены с использованием упрощенной модели сферы Ламберта для двух высот. Неизвестный фазовый угол Солнца вносит свой вклад в разброс измерений.

Количество следов ИСЗ в кадре зависит от параметров камеры, длительности экспозиции, параметров группировки ИСЗ и условий видимости. Условия видимости зависят, естественно,

от конфигурации группировки ИСЗ, от даты и времени наблюдений и от географической широты обсерватории.

Для мега-созвездий количество ИСЗ, находящихся над горизонтом в данной местности, примерно постоянно, т.к. большое количество ИСЗ с квазиравномерным распределением по небесной сфере усредняют общую картину. Какая часть всего населения ИСЗ находится над горизонтом, зависит от высоты орбиты. В табл. 4 приведены оценки относительного числа ИСЗ, находящихся над горизонтом или имеющих высоту  $h > 10^\circ$  над горизонтом (наблюдения на более низких высотах наблюдения, как правило, сильно затруднены),

Таблица 4

**Параметры видимости  
мега-созвездий ИСЗ**

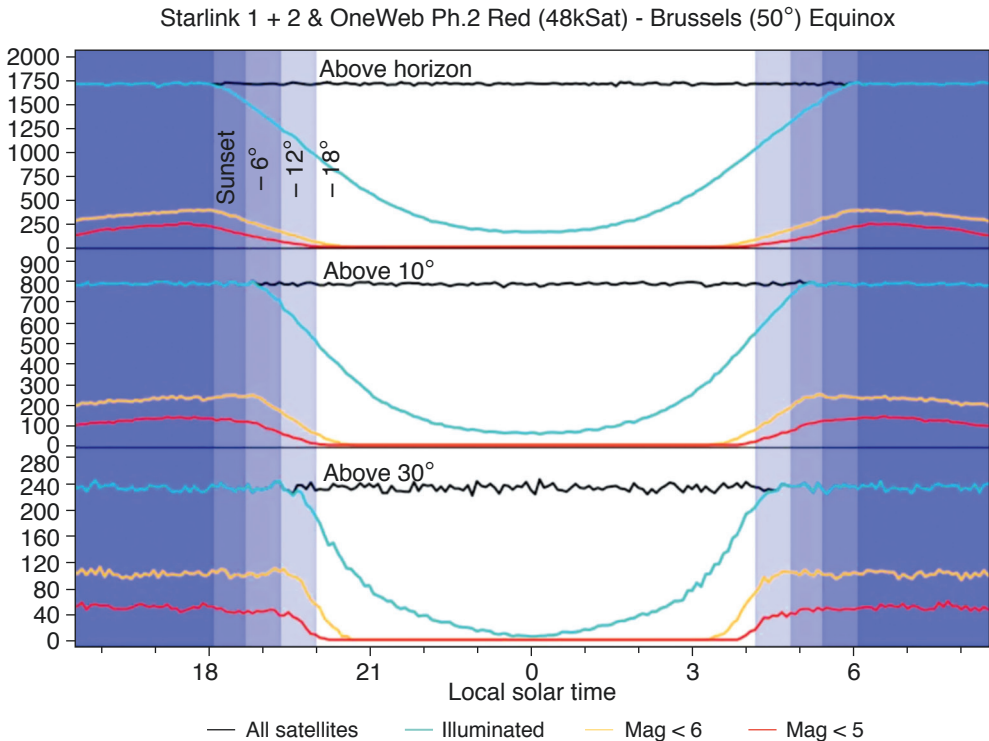
| Высота орбиты ИСЗ, км | Доля ИСЗ над горизонтом, % | Доля ИСЗ при $h > 10^\circ$ , % |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 350                   | 2.6                        | 0.9                             |
| 550                   | 4.0                        | 1.8                             |
| 780                   | 5.5                        | 3.2                             |
| 1200                  | 7.9                        | 4.3                             |
| 1325                  | 8.6                        | 5.0                             |
| 2000                  | 11.9                       | 7.0                             |

от их общего числа. Как видно из этой таблицы, при полном разворачивании спутниковых созвездий число находящихся одновременно над горизонтом ИСЗ может достигать нескольких тысяч. Это может создать серьезные по-

мехи и перед наземной астрономией, и даже для космических телескопов на низких околоземных орбитах.

Для оптических наблюдений важно не вообще количество ИСЗ над горизонтом, а количество освещенных Солнцем ИСЗ. ИСЗ, не освещенные Солнцем, не создают оптических помех. Условия освещения зависят от времени года и широты места наблюдения. На рис. 6 (адаптирован с сайта <https://www.eso.org/ohainaut/satellites/>) показано, как на момент равноденствия в течение ночи в географическом пункте с широтой  $50^\circ$  (Благовещенск, Брюссель и т.д.) изменяется количество освещенных ИСЗ группировок Starlink и OneWeb (промоделирован вариант с 48 тыс. КА). Особо выделена динамика количества ярких ИСЗ ( $< 5-6m$ ). Хорошо

Рис. 6. Изменение количества освещенных ИСЗ группировок Starlink и OneWeb в течение ночи в географическом пункте с широтой  $50^\circ$  на момент равноденствия



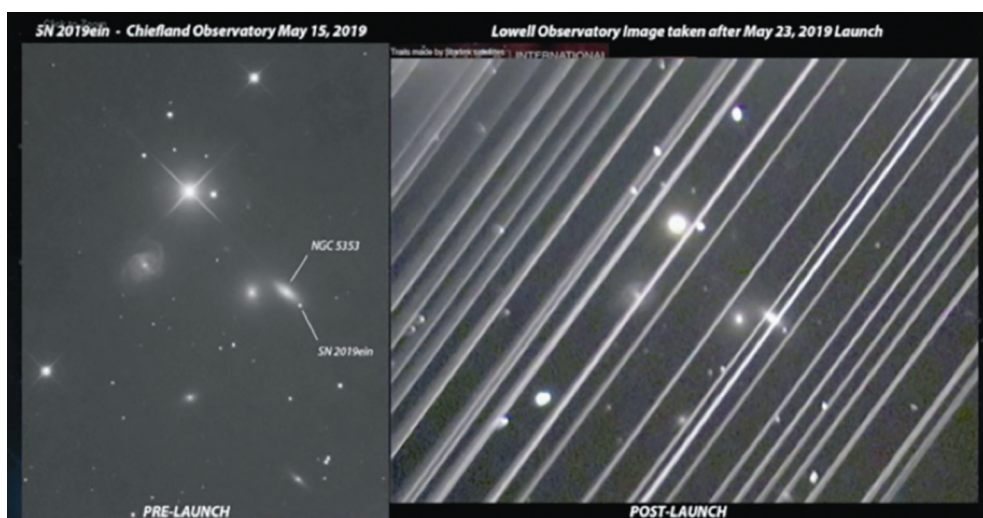


Рис. 7. Изображение группы галактик NGC5353/4, сделанное в обсерватории Лоуэлла в Аризоне в ночь на 25 мая 2019 г. Диагональные линии показывают 25 из 60 недавно (на тот момент) запущенных спутников Starlink

видно, что наибольшее количество ИСЗ будет видно в часы близ астрономических сумерек, а посередине ночи оно будет минимальным.

Довольно часто для иллюстрации серьезности проблемы оптического загрязнения новыми созвездиями ИСЗ приводят кадр с изображением группы галактик NGC5353/4, сделанный в обсерватории Лоуэлла в Аризоне (США) в ночь на 25 мая 2019 г. Диагональные линии показывают 25 из 60 недавно (на тот момент) запущенных спутников *Starlink*. Эта «ужасающая» картина показана на рис. 7. Однако нужно иметь в виду, что плотность следов и блеск спутников значительно выше в первые дни после запуска (как показано здесь), пока ИСЗ находятся на парковочных орбитах. В последующем блеск спутников будет уменьшаться по мере достижения их конечной орбитальной высоты. Так что этот случай не показателен.

Считается, что для большинства классических узкопольных астрономических

телескопов проблема светового загрязнения мегасозвездиями не столь остра. Мешающее воздействие заметнее для телескопов с большим полем зрения, таких как инструменты для обнаружения движущихся объектов, например, инструменты поддерживаемой ООН Международной сети предупреждения об опасных астероидах (IAWN). По оценкам, до 30–40% снимков, сделанных с помощью самого крупного доступного ученым на данный момент обзорного оптического телескопа PanSTARRS (США) или такого широкоугольного телескопа, как будущий обзорный телескоп LSST, может оказаться непригодным для использования. LSST – это 8 метровый обзорный телескоп с очень большим полем зрения, который находится в обсерватории имени Веры Рубин (США), и который должен заработать в ближайшее время. На рис. 8 приведена проекционная карта Моллвейде всего неба, показывающая полосы следов, которые ИСЗ созвездия *Starlink* могло бы сделать

10,0 minutes, 74708 sats, sunAlt = -18,4 degrees

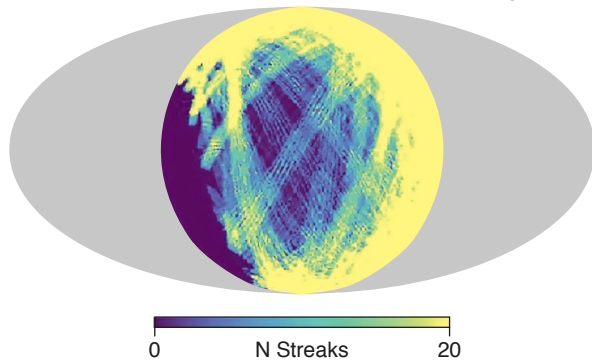


Рис. 8. Количество полос (следов ИСЗ), которые созвездие Starlink могло бы оставить в кадре на телескопе LSST за 10-минутную экспозицию в случайно выбранную дату (11 октября 2022 г.), сразу после вечерних сумерек.

за 10-минутную экспозицию в случайно выбранную дату (11 октября 2022 г.) сразу после вечерних сумерек при наблюдениях на телескопе LSST. Зенит находится в центре, север – вверху, а восток – слева. Изображения следов сгруппированы, потому что группы ИСЗ заполняют орбитальные плоскости. Область, свободная от следов, обусловлена тенью Земли. Серые области находятся ниже горизонта.

В случае узкопольных инструментов проблема конечно же не так остра, но даже и в этом случае в некоторых условиях может проявиться световое загрязнение следами ИСЗ.

Количество следов – лишь одна из характеристик. Важна еще ширина следа. Если она существенно шире одного пикселя, то, соответственно, число «засвеченных» пикселей может быть большим. В современных оптических системах размеры оптического пикселя (определяется качеством оптики) и пикселя приемника излучения согласованы. Но это выполняется только для использования в наблюдениях (бесконечно) далеких источников. Для достаточно длиннофокусных современных

телескопов ИСЗ, находящиеся на расстояниях в сотни километров, оказываются «не в фокусе». Даже для камер с коротким фокусом такая ситуация имеет место, если наблюдаются близкие объекты (например, метеоры).

На рис. 9 показана зависимость углового размера (полуширины пика распределения энергии) изображения ИСЗ, полученного с помощью телескопа *Subaru*, от расстояния до ИСЗ и размера ИСЗ.

Рассмотрим теперь проблему помех, вызванных передачей радиосигналов со спутников на низкой околоземной орбите.

Как известно, весь радиодиапазон поделен в частотном отношении между различными группами пользователей. За радиоастрономами зарезервировано несколько участков. Частотные участки, выделенные для радиоастрономии, показаны вертикальными полосками на рис. 10. Стрелки указывают участки частот для радиосвязи со спутниками *Starlink* (левая пара стрелок) и *OneWeb* (правая пара стрелок). Направления стрелок в каждой паре соответствуют направлениям передачи (downlink и uplink). В *Starlink* и *OneWeb* предполагается использовать Ku диапазон (10.7–12.7 и 14–14.5 ГГц) и Ka диапазон (17.8–19.3 и 27.5–30.0 ГГц).

Формально участки для связи с ИСЗ и радиоастрономии разнесены. Однако самые амбициозные радиоастрономические проекты связаны с наблюдениями в широком диапазоне частот. Поэтому такие мега-проекты, как SKA, реализуются в так называемых радиоспокойных зонах (Radio Quiet Zone – RQZ).

RQZ зоны есть в наименее населенных регионах планеты, но с появлением мега-созвездий ИСЗ радиоспокойных зон не будет нигде на земном

шаре. Радиоастрономы в других проектах также ведут наблюдения в RQZ и уже сталкиваются с проблемами. Излучение со спутников создает, например, проблемы для всех радиотелескопов и телескопов СМВ в Чили и на Южном полюсе. Проблемой могут стать внеполосные и паразитные излучения и в защищенных радиоастрономических диапазонах. Боковые лепестки диаграмм направленности также будут создавать заметный фон. Так что суть проблемы радиопомех в том, что десятки тысяч ИСЗ из обсуждаемых коммуникационных спутниковых созвездий будут активно излучать в радиодиапазоне. С 50 000 спутниками на орбите в среднем один ИСЗ будет находиться (и излучать на Землю) в пределах  $1.3^\circ$  от линии наведения наземного радиотелескопа, где бы этот телескоп ни находился и куда бы он ни наводился. Кстати, примерная полуширина главных лепестков передающих антенн ряда спутников составляет примерно такую же величину, так что ни один радиотелескоп не избежит влияния мегасозвездий.

Уже есть данные о том, что спутники Starlink и другие подобные группировки

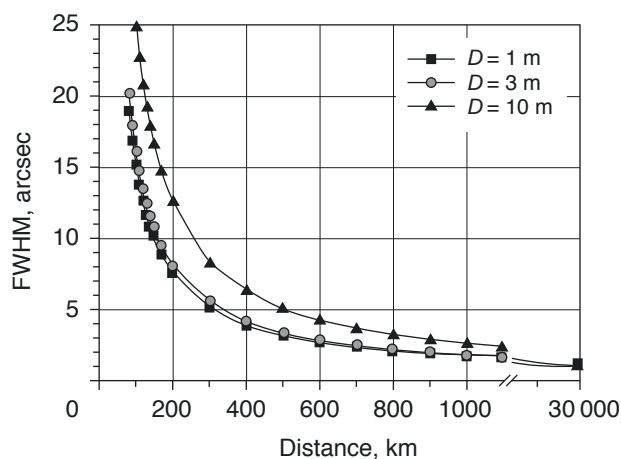


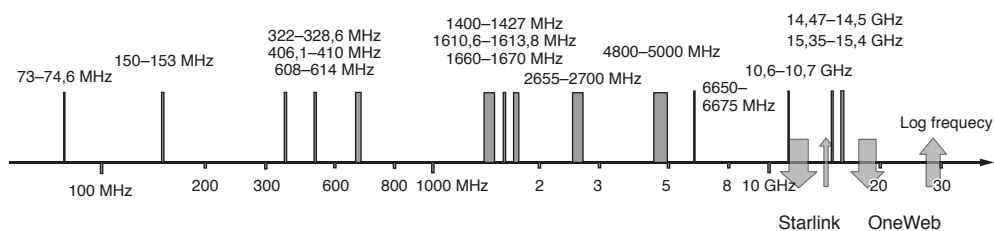
Рис. 9. Размер изображения относительно близкого объекта диаметром  $D$  на камере SuprimeCam, полученный на телескопе Subaru с типичным качеством изображения  $0.8''$

спутников создают помехи на радиочастотах, на которых работают многие крупнейшие радиоастрономические обсерватории мира.

## МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ОСТРОТЫ ПРОБЛЕМЫ

Относительно конкретных технических рекомендаций можно отметить, что нет универсальных рецептов по смягчению последствий спутниковых следов для всех типов научных приборов и всех научных задач. Что касается конкретики выработанных рекомендаций,

Рис. 10. Частотные диапазоны, выделенные для радиоастрономии (желтые полосы). Зелеными стрелками показаны участки частот для радиосвязи со спутниками Starlink (левая пара стрелок) и OneWeb (правая пара стрелок)



то они простые (по формулировке), но иногда противоречивые и даже взаимоисключающие.

В отношении наблюдений в оптическом диапазоне производителям ИСЗ, запускающим и эксплуатирующим организациям рекомендуется:

- делать спутники как можно более темными ( $V > 7m$ );
- свести к минимуму общее количество спутников;
- выбирать предпочтительные высоты орбиты <600 км;
- управлять положением ИСЗ, чтобы не отражать свет на обсерватории;
- учитывать условия изменения видимости при орбитальных маневрах (сход, подъем и т.д.);
- предоставлять общедоступные данные высокой точности о местоположении спутника с тем, чтобы можно было оптимизировать программы наблюдений.

В отношении наблюдений в радиодиапазоне:

- избегать прямого освещения передатчиками ИСЗ радиобсерваторий (согласно результатам интенсивного обсуждения среди экспертов вряд ли возможно «сжечь» приемник на радиотелескопе, но прямая засветка точно приводит к сбою в настройках этих очень чувствительных и сложных устройств);
- придерживаться предельных значений эквивалентной плотности потока мощности, рекомендуемых МСЭ для электромагнитных помех;
- минимизировать внеполосные, паразитные излучения. Радиопередатчики на спутниках должны иметь уровни излучения в боковых лепестках достаточно низкие, чтобы не прямое освещение ими радиотелескопов и зон радиомолчания не создавало помех ни по отдельности, ни в совокупности.

Общая рекомендация вполне естественна. Она формулируется просто – развивать сотрудничество астрономического и спутникового сообществ.

Уже отмечалось, что проблеме D&QS было посвящено несколько недавних крупных международных конференций и совещаний и что тема стала одной из обсуждаемых на трибуне ООН. Международный астрономический союз учредил Центр по защите темного и спокойного неба от воздействия спутниковых группировок (IAU Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference), который приступил к работе на базе исследовательской лаборатории NOIRLab и обсерватории SKAO с 1 апреля 2022 г. Основная работа центра включает разработку программных инструментов для помощи астрономам, работу над национальной и международной политикой в сфере спутниковых группировок, работу с общественностью и промышленностью над технологиями для устранения воздействий спутников на астрономические наблюдения. Центр уже установил связь с Amazon, OneWeb и SpaceX. Также отмечалось, что, к сожалению, Россия пока что остается несколько в стороне и ее вклад в общую активность незначителен. Но ситуация меняется. 18–21 апреля 2022 г. в Москве состоялась Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием «Околоземная астрономия – 2022». Конференция была организована Институтом астрономии РАН и Институтом космических исследований РАН. Конференция была посвящена тематике космических угроз. Было уделено внимание и проблеме темного и спокойного неба. Обсуждение этой темы на большом общероссийском форуме состоялось впервые. По итогам конференции были приняты решения, одно из которых сформулировано так: «...поддержать инициативу Международного астрономического союза о продолжении серьезного профессионального рассмотрения глобальной проблемы темного и спокойного неба на площадке ООН».

## Литературный космос

Продолжаем публиковать подборку стихов Михаила Исааковича Синельникова, посвященных космосу. Начало в *ЗиВ* №1, 2, 2023.

### Михаил СИНЕЛЬНИКОВ

\* \* \*

Любовь вращает звезды беспрестанно,  
Миры сближает, души пламенит,  
Бурливо зыблет волны океана,  
Укладывает глыбы пирамид.

И движет всем, куда я взгляд ни кину, –  
Сырой землей и солнцем огневым,  
И гневно мне метнувшим камень в спину  
Соперником моим.

\* \* \*

А небо внятно говорит о том,  
Что чудно на рассвете золотом,  
Что на закате горестно багряном,  
Что синева сияет за туманом,  
Что звезды не угаснут никогда,  
Что есть своя у каждого звезда,  
Что сверху веет возвращённым раем,  
Что на земле о небе забываем.

\* \* \*

Отнюдь не радости и горести,  
Не диск с известием  
Летят от нас на малой скорости  
К иным созвездиям.

Не гимны, не стихотворения,  
Чья пылкость грянула, –  
Лишь ответ нашего горения  
И жизни гранула.

Её пылинки, занесённые  
На астероиде...  
– Потомки их сине-зелёные,  
Вы всё усвоите.

\* \* \*

Но, может быть, и в этот поздний час,  
Пробирок разбирая груды,  
В лаборатории испытывают нас,  
И тянет гарью отовсюду.

Как видно, третий загасить пожар –  
Ведь прошлый опыт бесполезен –  
Вся облепившая огнеопасный шар  
Не в силах мыслящая плесень.

\* \* \*

Рождались звезды, не было им счёта,  
И все дневные таяли печали.  
Сияла ночь, в траве шуршало что-то,  
Миры летели, мотыльки летали.

Ещё не знал утрат, исчезновений,  
Ещё обид от жизни было мало.  
Всё было сном, и ничего блаженной  
Сна под открытым небом не бывало.

Всё было сном и повторится снова,  
И, расставаясь, не страшись разлуки.  
Ведь всё это так просто и не ново –  
Закрывать глаза, свет отстранив и звуки.

\* \* \*

Всё ускоряется природа.  
Прибрежный пожелтел камыш.  
Ты стар, за временами года  
Теперь почти не уследишь.

Свой Судный день даётся всем.  
И может быть, исчезнет эта  
Непостижимая планета.  
Всё ближе ад или эдем.

Но в том зелёном буераке,  
Где шёл ты столько лет назад,  
Опять запыляют маки  
И вновь жуки затарахтят.

*Журнал «Земля и Вселенная» — лауреат Литературной премии им. А.Р. Беляева 2023 года в номинации «Журнал года — за наиболее интересную деятельность в течение года»*



Торжественное вручение премии состоялось 22 октября в помещении районного Дома культуры в городе Пушкин. От редакции журнала Премию приняли О.В. Закутняя, канд. филол. наук, заместитель главного редактора, и А.Ю. Обод, заведующая редакцией.

Старейшая отечественная фантастическая мемориальная премия названа в честь Александра Беляева, первого профессионального писателя-фантаста в Советском Союзе, который работал и в области научно-художественной литературы.

Идея премии возникла в 1984, когда Союз писателей отмечал столетие

со дня рождения Беляева, впервые она была вручена в 1990 году секцией фантастической и научно-художественной литературы Ленинградской писательской организации Союза писателей СССР. Вскоре, уже в 1992 году, статус премии был пересмотрен, и она превратилась в ежегодную, присуждаемую теперь от имени Литературного благотворительного Беляевского фонда и Союза писателей Санкт-Петербурга. В таком качестве она просуществовала по 1997 год. Затем, вследствие самоликвидации Беляевского фонда, в ее деятельности наступил четырехлетний перерыв.



В 2002 году вновь созданный Оргкомитет Беляевской премии вторично пересмотрел ее статус и отказался от присуждения ее премий за фантастику, поскольку различных наград в этой области литературы существовало достаточно много, тогда как произведения научно-популярной, научно-художественной или, шире, просветительской литературы лишь изредка отмечались в составе многожанровых литературных премий.

Первоначально Жюри из семи человек ежегодно формировалось Беляевским фондом, а впоследствии – Оргкомитетом из числа членов Союза писателей Санкт-Петербурга. С 2006 года жюри формируется из лауреатов премии прошлых лет.

Премия состоит из бронзовой нагрудной медали и диплома, для дважды лауреатов – бронзовой настольной медали на яшме и диплома.

**Академик Лев Матвеевич Зелёный, научный руководитель Института космических исследований Российской академии наук, главный редактор журнала «Земля и Вселенная»:**

*«Для нашего журнала присуждение премии имени Александра Романовича Беляева – знаковое событие. Именно Александр Беляев исключительно много способствовал популяризации идей и теорий Константина Циолковского, основоположника практической космонавтики. В 1936 г. вышла книга Беляева «Звезда “КЭЦ”» – не только описание путешествий молодого биолога Лени Артемьева по Солнечной Системе, но и вполне добротна написанная романтическая история. Но лично у меня самая любимая книга Беляева – “Ариэль”. Научной ее не назовешь – только Воланд смог бы дисциплинировать хаотическое броуновское движение. Но, прочитав в детстве эту книгу, я, как и многие другие, до сих пор по ночам иногда летаю во сне.*

*Наш журнал в меру возможностей старается рассказывать о науке образно и увлекательно. Науку и фантастику ведь связывает общий для них дух поиска.*

*Лучше всего об этом сказал великий Станислав Лем в “Сумме технологии”: “Без сомнения, ученым потребуется сначала воспитать целое поколение руководителей, которые согласятся достаточно глубоко залезть в государственный карман, и при том для выполнения целей, столь подозрительно напоминающих традиционную научно-фантастическую тематику”. Хочется верить, что “Земля и Вселенная” движется в этом направлении, и мы благодарны жюри, высоко оценившему не только наши достижения, но и цели, к которым мы стремимся».*

### **Лауреаты Литературной премии им. А. Р. Беляева 2023 г.**

- *Лучшая оригинальная просветительская книга года*

Алексей Михайлович Семихатов «Все, что движется: Прогулки по беспокойной Вселенной от космических орбит до квантовых полей» (М: Альпина нон-фикшн, 2022)

Олег Ивик (Ольга Колобова и Валерий Иванов) «История и зоология мифических животных» (М: Альпина нон-фикшн, 2022)

- *Лучший перевод просветительской книги на русский язык*

Елена Дмитриевна Быкова за перевод книги Меган Розенблюм «Темные архивы. Загадочная история книг, обернутых в человеческую кожу» (М.: Бомбора, 2022)

Оксана Викторовна Григорьева за перевод книги Карлоса Л. Дельгадо «Невидимый мозг. Как мы связаны со Вселенной и что нас ждет после смерти» (М.: Бомбора, 2022)

- *Журнал, периодическое издание – за наиболее интересную деятельность в течение года*

Журнал «Земля и Вселенная»

- *Специальная премия Жюри*

Елена Владимировна Первушина «За столом с Пушкиным. Чем угощали великого поэта» (М.: Центрполиграф, 2022)

Михаил Никитич Охочинский «Николай Алексеевич Рынин. Его жизнь и работа в области межпланетных сообщений» (СПб: Политехника Сервис, 2022)

Лариса Михайловна Малькова за серию материалов, посвященных футурологии и развитию искусственного интеллекта

- *Специальная премия «Справедливость»*

Александр Валентинович Глушко за серию документально-исторических книг «Первопроходцы ракетостроения. История ГДЛ и РНИИ в биографиях их руководителей» (2010), «Неизвестный Лангемак. Конструктор “катуш”» (2012), «Маршал Тухачевский. Мозаика разбитого зеркала» (2014), «Валентин Глушко. Человек, проложивший дорогу в космос» (2021)

- *Просветительский или научно-популярный сайт – за наиболее интересную деятельность в предшествующий период*

Авторский сайт Павла Ивановича Волкова «Эволюция без границ» (<http://sivatherium.narod.ru>)

### **Состав Жюри Беляевской премии 2023 г.**

Павел Рафаэлович Амнуэль – кандидат физико-математических наук, прозаик, главный редактор литературного журнала «Млечный Путь». Лауреат Беляевской премии 2011, 2013 и 2021 гг. (Израиль).

Андрей Михайлович Буровский – кандидат исторических наук, доктор философских наук, член Санкт-Петербургского Союза ученых, Союза писателей СПб, Многонационального содружества писателей. Лауреат Беляевской премии 2010, 2012 и 2014 гг. (Санкт-Петербург).

Александр Борисович Железняков (председатель) – академик Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, член Федерации космонавтики России, Санкт-Петербургского Союза ученых, Союза писателей СПб, Многонационального содружества писателей, Российского Союза профессиональных литераторов, председатель Совета Беляевского фонда поддержки и развития литературы. Лауреат Беляевской премии 2005, 2012 и 2017 гг. (Санкт-Петербург).

Антон Иванович Первушин (секретарь) – магистр технических наук, член Федерации космонавтики России, Санкт-Петербургского Союза ученых, Союза писателей СПб, Многонационального содружества писателей, Российского Союза профессиональных литераторов, Совета по фантастической, приключенческой и научно-художественной литературе. Лауреат Беляевской премии 2002 и 2004 гг. (Санкт-Петербург).

Сергей Валентинович Рязанцев – доктор медицинских наук, профессор, член Санкт-Петербургского Союза ученых, Союза писателей СПб, Союза российских писателей. Лауреат Беляевской премии 1995 и 2010 гг. (Санкт-Петербург).

Людмила Алексеевна Синицына – член Союза писателей России, Московского Союза журналистов, заведующая Отделом научно-популярной литературы и фантастики журнала «Наука и жизнь», лауреата Беляевской премии 2009 г. (Москва).

Михаил Сергеевич Шавшин – инженер-механик, член Союза писателей СПб, Многонационального содружества писателей. Лауреат Беляевской премии 2021 г. (Санкт-Петербург).

*In memoriam*

## Михаил Яковлевич МАРОВ (28.07.1933—30.11.2023)



**30** ноября 2023 г. на 91-м году жизни скончался выдающийся советский и российский ученый, заведующий Отделом планетных исследований Института геохимии и аналитической химии им. В.А. Вернадского Российской академии наук, академик, доктор физ.-мат. наук **Михаил Яковлевич Маров**.

Михаил Яковлевич принадлежал к плеяде зачинателей и организаторов отечественных космических исследований. Он принимал непосредственное участие в разработке и осуществлении советской космической программы исследований Луны, Венеры и Марса. Под его руководством были осуществлены уникальные научные эксперименты – впервые в мире проведены прямые измерения параметров атмосфер Венеры и Марса, определены значения температур и давлений на поверхности этих планет, выполнены уникальные исследования

теплового режима и динамики атмосферы, освещенности поверхности, структуры и свойств облаков Венеры. Результаты этих исследований во многом способствовали решению сложнейшей задачи обеспечения работоспособности посадочных аппаратов «Венера» на поверхности, планеты и передачи на Землю панорам ее поверхности, и измерения состава пород. Эти достижения являются уникальными, и их не удалось повторить нигде в мире.

Михаил Яковлевич Маров внес основополагающий вклад в становление нового научного направления в планетологии и физике космоса – планетной аэрономии. Им был получен ряд новых результатов в изучении турбулентных реагирующих газов, самоорганизации и стохастического моделирования, развит оригинальный подход к решению ряда фундаментальных проблем звездно-планетной космогонии – происхождения и эволюции Солнечной системы и планетных систем у других звезд.

Михаил Яковлевич – автор и соавтор более 300 статей в рецензируемых научных журналах и свыше 20 монографий в отечественных и зарубежных издательствах. Полученные им результаты позволили разработать углубленный подход к изучению физико-химических процессов в космосе и ключевых природных механизмов на планетах и ядрах комет, а также способствовали более тесной интеграции космических исследований с механикой, вычислительной математикой и науками о Земле.

Михаил Яковлевич Маров вел большую педагогическую и научно-организационную работу, являясь профессором Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и Международного космического университета (ISU, Страсбург), Председателем Комиссии РАН по изучению научного наследия К.Э. Циолковского, заместителем Председателя Научного совета РАН по астробиологии, главным редактором научного журнала РАН «Астрономический вестник. Исследование Солнечной системы».

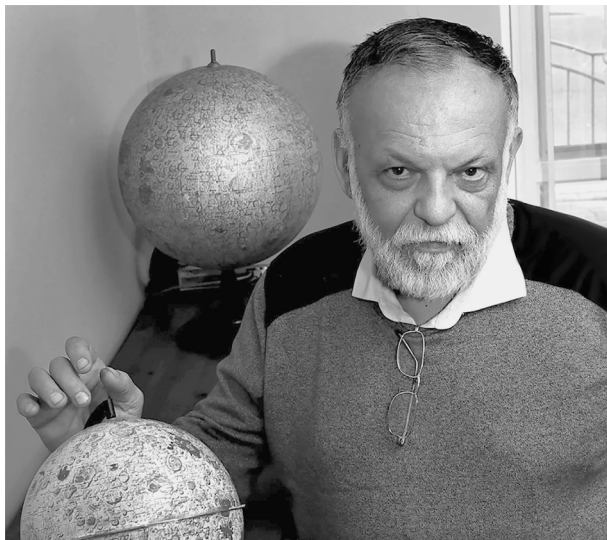
За свою выдающуюся научную деятельность М.Я. Маров был награжден орденами Александра Невского, Дружбы, Почета, Трудового Красного Знамени. Он Лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, ему были вручены диплом NASA за лидирующую роль в исследованиях Солнечной системы, премия Эдвина Сиффа за пионерские исследования планет, медаль Уильяма Нордберга Международного комитета по космическим исследованиям (COSPAR), Золотая медаль имени М.В. Келдыша и другие награды.

Уход из жизни Михаила Яковлевича Марова – невосполнимая потеря для всей отечественной науки. Благодарная память о нем навсегда сохранится в сердцах всех, кто имел счастье встречаться и работать с ним.

*Сайт памяти академика Михаила Яковлевича Марова (1933–2023), созданный д.ф.-м.н. С.В. Фортовой:*  
<https://memorycode.ru/page/18717698>

*In memoriam*

## **Александр Леонидович ГОЛОВАНОВ (25.05.1958–18.12.2023)**



**18** декабря 2023 года на 66-м году жизни скончался Александр Леонидович Голованов – основатель и президент Благотворительного фонда поддержки и пропаганды отечественного научного наследия «Гелиос».

А.Л. Голованов был одним из наследников учёного-биофизика А.Л. Чижевского. Так совпало, что они были и тезками. А.Л. Голованов был последним, кто общался с учёным. Эти встречи остались в памяти Александра Голованова до конца жизни. Он с теплом вспоминал об Александре Леонидовиче и его жене Нине Вадимовне, которая была для семьи Головановых близким другом, а сам Александр Голованов считал её заботливой бабушкой.

На протяжении многих лет Александр Голованов вёл активную работу по пропаганде научного, философского и художественно-поэтического наследия А.Л. Чижевского и уделял большое внимание пропаганде творчества К.Э. Циолковского.

Александром Головановым было опубликовано большое количество научных работ, художественных и поэтических произведений, а также воспоминаний А.Л. Чижевского.

Александр Голованов был большим другом Дома-музея А.Л. Чижевского, принимал активное участие во всех делах музея, помогал сотрудникам в работе, был одним из членов оргкомитета Международной научно-практической конференции, посвященной сохранению творческого наследия и развитию идей А.Л. Чижевского.

В последний год жизни Александр Голованов часто приезжал в Дом-музей А.Л. Чижевского, чтобы вместе с сотрудниками подготовить для передачи в фонды ГМИК им. К.Э. Циолковского архив ученого, принадлежащий семье Головановых.

Вклад А.Л. Голованова в популяризацию имени Чижевского трудно переоценить. Этой деятельности Александр Голованов уделял много сил, времени, душевного тепла и материальных ресурсов.

Александр Леонидович был награжден памятной медалью имени А.Л. Чижевского, учрежденной Федерацией космонавтики России и ИКИ РАН.

В нашей памяти останется светлый образ обаятельного, доброжелательного, умного человека, который снискал глубокое уважение друзей и близких.

Выражаем глубокое соболезнование родным и близким Александра Леонидовича.



# Указатель статей и заметок, опубликованных в 2023 году

|  |   |
|--|---|
| АКИМКИН В.В. Космический телескоп Джеймса Уэбба: год первый  | 4 |
| АСМУС В.В., КРАМАРЕВА Л.С., ФИЛЕЙ А.А. «Арктика-М» –<br>новый этап спутниковых гидрометеорологических наблюдений   | 3 |
| БАРТАЛЁВ С.А., ЛУКИНА Н.В. Новая методология космического<br>мониторинга углерода в лесах России   | 5 |
| ГАЧЕВА А.Г. Философия русского космизма образ будущего   | 1 |
| ГОВОРОВА А.Ф. Жизнь на Венере  | 3 |
| ЕМЕЛЬЯНОВ Н.В. Небесная механика на службе человечества  | 3 |
| ЗЕЛЁНЫЙ Л.М., КУЗНЕЦОВ В.Д. Наблюдение Солнца с близких расстояний   | 6 |
| КАЛАШНИКОВ Д.В., МИТРОФАНОВ И.Г. Гигантский ледник на Марсе  | 3 |
| ЛЕБЕДЕВА Е.В., ЗАВАДСКАЯ А.В. Долина гейзеров на Камчатке:<br>рельефообразование в условиях гидротермального воздействия   | 5 |
| МАККАВЕЕВ А.Н., ГУРИНОВ А.Л., АЛЕКСАНДРОВСКИЙ А.Л., ШВАРЕВ С.В.,<br>ЛУГОВОЙ Н.Н., КАРАБАЕВ В.А. Астроблемы на востоке Московской области   | 5 |
| МИТРОФАНОВ И.Г., ДЬЯЧКОВА М.В., КАЛАШНИКОВ Д.В., ЛИСОВ Д.И.,<br>ЛИТВАК М.Л., НИКИФОРОВ С.Ю. Эксперимент ДАН: Термоядерный<br>синтез для нейтронного зондирования поверхности Марса | 3 |
| МОРОЗОВА Л.Н. А.Л. Чижевский и С.П. Королёв  | 1 |
| МОРОЗОВА Т.И. Заряженная пыль на Луне  | 6 |
| ОНОСОВ А.А. Пространство-время идей В.И. Вернадского:<br>научные представления философии космизма  | 1 |
| ПЕТРОВА Е.Н. Космизм в российском искусстве первой половины XX века  | 1 |
| ПИЛИПЕНКО В.А., ГВИШИАНИ А.Д., СОЛОВЬЁВ А.А., РОЗЕНБЕРГ И.Н.<br>Космическая погода и железные дороги   | 6 |
| ПУЛИНЕЦ С.А., ВЕДЕШИН Л.А. Космос как природная плазменная лаборатория   | 6 |
| ПОСТНОВ К.А., СИЛЬЧЕНКО О.К. Вселенная от «Большого взрыва»<br>до образования галактик   | 3 |
| САЖИНА О.С. Открытые вопросы космологии: параметр Хаббла   | 4 |
| САХАРОВ Я.А. Танцующие сияния  | 6 |
| СЕЛЕМИР В.Д., ТРЕНЬКИН А.А. Магнитосфера Земли в лаборатории:<br>экспериментальное и расчетное моделирование электромагнитных<br>процессов и их влияния на наземную инфраструктуру | 6 |
| ФЛЕЙС М.Э., НЫРЦОВ М.В., КАЗАНЦЕВ Н.Н. Именные картографические<br>проекции  | 5 |
| ЧЕРЕПАШУК А.М. 60 лет рентгеновской астрономии:<br>первый прорыв в исследованиях черных дыр  | 4 |
| <b>Космическая физика</b>  |   |
| РЯЗАНЦЕВА М.О., ЗЕЛЁНЫЙ Л.М. «Спектр-Р» как инструмент<br>для исследования турбулентности  | 2 |
| <b>Космическое образование</b>   |   |
| ГОЛОВАНОВА А.В., МАГАРЯН К.А., НАУМОВ А.В. Третья всероссийская<br>викторина юных физиков Отделения физических наук РАН. Вопросы и ответы  | 2 |

## **Космонавтика XXI века**

ПЕСЛЯК А.М. Великий полет Китая 2

ШУБИН П.С. Третий «Лунный корабль» Индии достиг цели 5

## **Планетарии**

ЛОБАНОВ А.В., ЯЗЕВ С.А. К столетию планетария: миссия и проблемы 5

ЛОБАНОВ А.В. Эволюция оптико-механического проектора за 100 лет 5

ФЕСЕНКО А.В. «Изобретение слабой руки». Краткая история планетариев 5

## **Люди науки**

Роальд Зиннурович Сагдеев. К 90-летию со дня рождения 1

АРМАНД Р.П. Памяти легенды отечественной журналистики  
Владимира Губарева 4

ДАГКЕСАМАНСКИЙ Р.Д. 60 лет знакомства с Н.С. Кардашёвым  
и 30 лет работы под его руководством 2

КЕЛЛЕРМАНН К. Воспоминания о Николае Кардашёве: от астрофизики  
до инопланетян 2

КУРТ В.Г. Мой друг Николай Кардашёв 2

СОГЛАСНОВ В.А. Воспоминания о Н.С. Кардашёве. Камчатская экспедиция 2

## **История космонавтики**

МАРИНИН И.А. Многоликий «Интеркосмос» 4

СУДАКОВ В.С. Лаборатория Н.И. Тихомирова 1

## **История науки**

ГЕРАСЮТИН С.А. Юбилей марсианской армады 3

МАСЛИКОВ С.Ю. Три астронома-командора 3

ЯЗЕВ С.А. Транзиты Венеры: как определялось расстояние до Солнца 4

## **Симпозиумы, конференции**

ТРОФИЛЕВА И.Н., ТИХОМИРОВА Е.Н. Международная неделя планетариев  
в Ярославле. К 60-летию полета первой женщины-космонавта В.В. Терешковой 5

## **Досье любознательных**

СОЛОМОНОВ Ю.В. Планета Марс на монетах мира. Окончание 1

## **Любительская астрономия**

СОЛОМОНОВ Ю.В. Неприметный Заяц 4

## **Гипотезы, дискуссии, предложения**

ОЖЕРЕДОВ В.А. По стопам Чижесвского: влияние солнечной активности  
на агрессивность коммуникации в Интернете 6

ШУСТОВ Б.М. Темное и спокойное небо 6

## **Литературный космос**

СИНЕЛЬНИКОВ М.И. Стихи 1, 2, 6

СОЛОВЬЕВ А.А. Стихи 3

## **По выставкам и музеям**

МАСЛОВА Ю.В. «Человек идет сквозь звезды» 3

Премия имени Беляева журналу «Земля и Вселенная» 6

## **In memoriam**

ПУЛИНЕЦ С.А. Станислав Петрович Перов (25.04.1935–26.09.2022) 2

Михаил Яковлевич Маров (28.07.1933–30.11.2023) 6

Александр Леонидович Голованов (25.05.1958–18.12.2023) 6



# EARTH & UNIVERSE

6 (354), 2023

November–December

## TABLE OF CONTENT:

|   |     |
|---|-----|
| Lev M. ZELENYI Editorial  | 3   |
| Lev M. ZELENYI, Vladimir D. KUZNETSOV Studying the Sun from Close Distances   | 7   |
| Vyacheslav A. PILIPENKO, Alexey D. GVISHIANI, Anatoliy A. SOLOVYOV,<br>Igor N. ROSENBERG Space Weather and Railways   | 22  |
| Sergey A. PULINETS, Leonid A. VEDESHIN Space As a Natural Plasma Laboratory   | 35  |
| Yaroslav A. SAKHAROV Dancing Auroras  | 54  |
| Viktor D. SELEMIR, Alexey A. TRENKIN Earth Magnetosphere In the Lab:<br>Experimental And Computational Modelling of Electromagnetic Processes<br>And Their Impact Upon Terrestrial Infrastructure | 60  |
| Tatiana I. MOROZOVA Charged Dust On the Moon  | 76  |
| <b>Hypotheses, Discussions, Suggestions</b>   |     |
| Vadim A. OZHEREDOV Following Chizhevsky: Solar Activity Effect On the Aggression<br>Of Communication On the Web   | 82  |
| Boris M. SHUSTOV Dark and Quiet Sky   | 90  |
| <b>Literary Space</b>   |     |
| Mikhail I. SINELNIKOV Verses  | 101 |
| 2023 Alexander Belyaev Award to <i>Earth &amp; Universe</i>   | 102 |
| <b>In Memoriam</b>  |     |
| Mikhail Ya. Marov (28.07.1933–30.11.2023)   | 105 |
| Aleksander L. Golovanov (25.05.1958–18.12.2023)   | 107 |
| <i>Earth &amp; Universe</i> Index 2023  | 109 |

**Cover image:** Teriberka, Murmansk region. Photo by Anatoly Strebelev,  
Aurora Association Russia

Индекс 38808

## Земля и Вселенная, 6/2023

Заведующая редакцией *А.Ю. Обод*

Редакторы *С.А. Герасютин, Д.А. Кононов, О.С. Сажина*

Корректор *С.О. Розанова*

Верстка макета *Н.В. Мелкова*

**Просим обращаться**

**по вопросам публикации материалов:**

+7(495) 276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukapublishers.ru

**по вопросам сотрудничества:**

+7(495) 276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukapublishers.ru

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

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

*Все права защищены.*

*Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.*

*Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.*

*Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.*

*Ответственность за точность и содержание рекламных материалов несут рекламодатели*

12+

---

Сдано в набор 01.11.2023      Подписано к печати 11.12.2023

Дата выхода в свет 25.12.2023      Формат 70 × 100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Цифровая печать      Усл.печ.л. 9,1      Уч.-изд.л. 9,1      Бум.л. 3.5

Тираж 1000 экз.      Заказ № 39      Цена свободная

---

Учредители: РАН, ФГБУ «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 90

---

Отпечатано в типографии ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099 Москва, Шубинский пер., 6



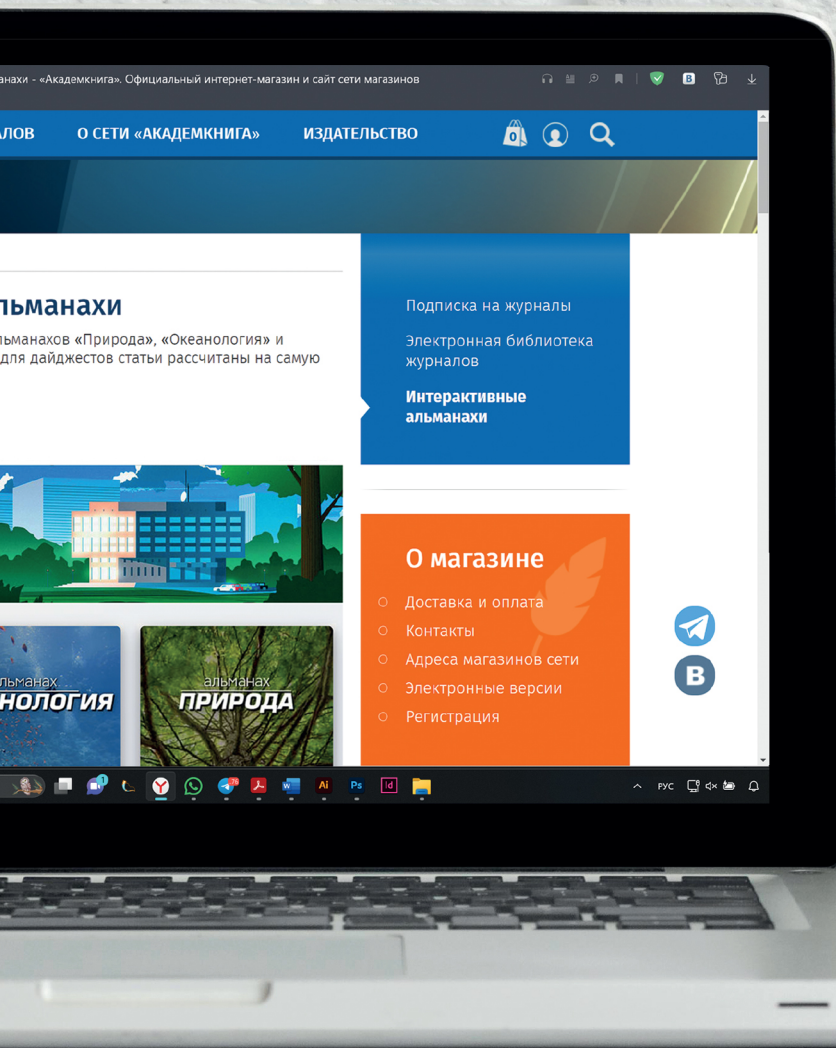
# ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»



КНИГИ



ЖУРНАЛЫ



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



НАУКА  
— 1727 —



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"  
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1  
тел.: +7 (495) 276-77-35  
info@naukapublishers.ru

**naukapublishers.ru**

ISSN 0044-3948



9 770044 394007