

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/S0044394823060038

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 цепи¹. Это поставило на повестку дня вопрос об искусственном воздействии на окружающую среду, в том числе на

¹ 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 P-2A и P-5A 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 переклассных 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 ракетах². 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 среды³.

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 Земли⁴. 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 спутниках⁵.

РАКЕТНАЯ АТАКА

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

² Велешин 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.

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

⁴ 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.

⁵ 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 км⁶. Почти одновременно с ними начались эксперименты по ионизации, стимулируемой напуском газа и сопровождаемой генерацией альвеновских волн⁷. 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.)

⁶ 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 газовыделения 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.

⁷ Поперечные магнитогидродинамические волны плазмы, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля Земли, они называются 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_{α}	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 выплыванием 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 «Аэроби», которая достигла высоты 270 км. Ускоритель электронов с максимальным током 0.5 А и энергией 10 кэВ был направлен вниз и инжестировал 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 м². 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 станциями⁸. 13 августа

⁸ 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 осуществлялось лабораторией ИЗМИРАН⁹. Ускоритель электронов был поднят на ракете на высоту 160 км и на высоте 100 км «электронная пушка» начала инжекцию 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 МГц¹⁰. 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)¹¹.

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

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

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

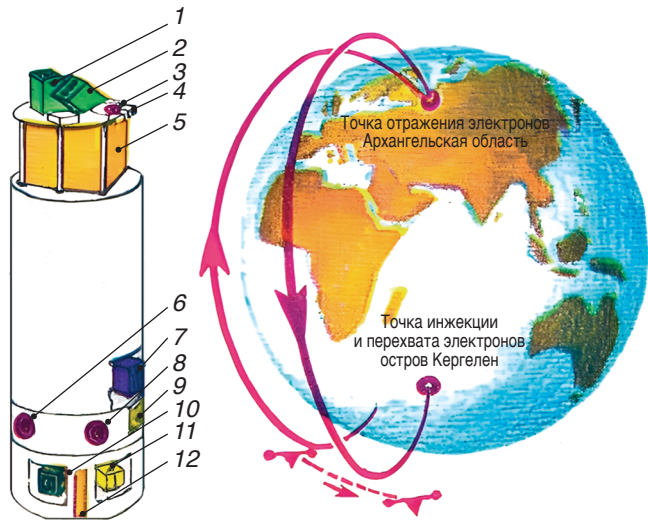
В подготовке и осуществлении эксперимента «Аракс» участвовали многие научно-технические коллективы СССР и Франции, были организованы наземные наблюдения в Архангельской области и на о. Кергелен. Руководителями эксперимента с советской стороны были директор ИКИ АН СССР академик Р. З. Сагдеев и заместитель 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 инъекцию 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 инъекции 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. Э. Активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере



ный восток, изучался азимутальный дрейф электронов и электрическое поле Земли. С помощью радиолокационных установок удалось определить истинное положение магнитоспряженной 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 пространства¹². В ходе второго запуска французский радиоспектрометр вышел из строя, и информация об излучениях электронного пучка принималась только с помощью аппаратуры «Спектр»¹³. Комплексные спектрограммы высокочастотных излучений, зарегистрированных во время первого и второго за-

пусков ракеты «Эридан» аппаратурой «Спектр».

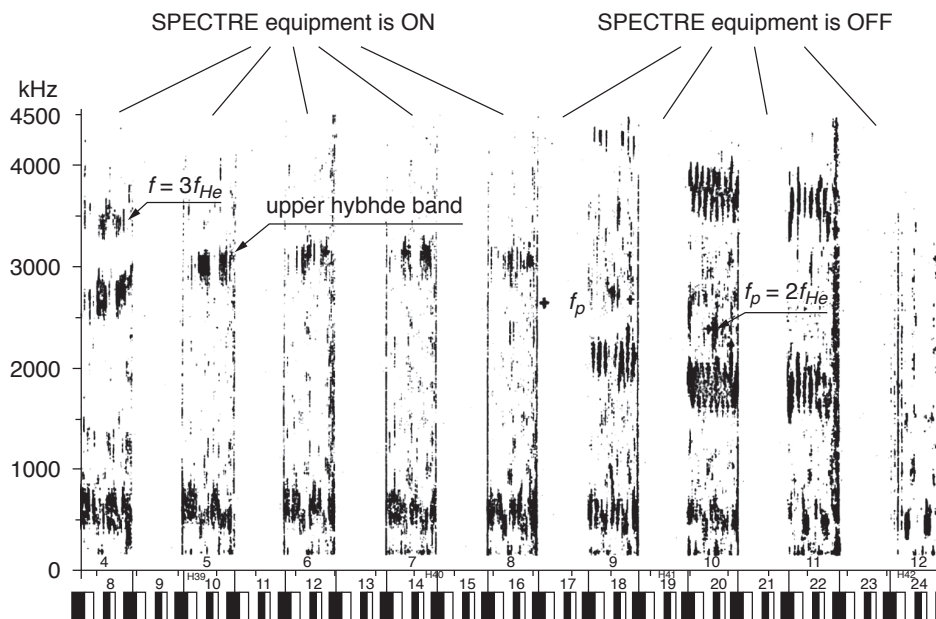
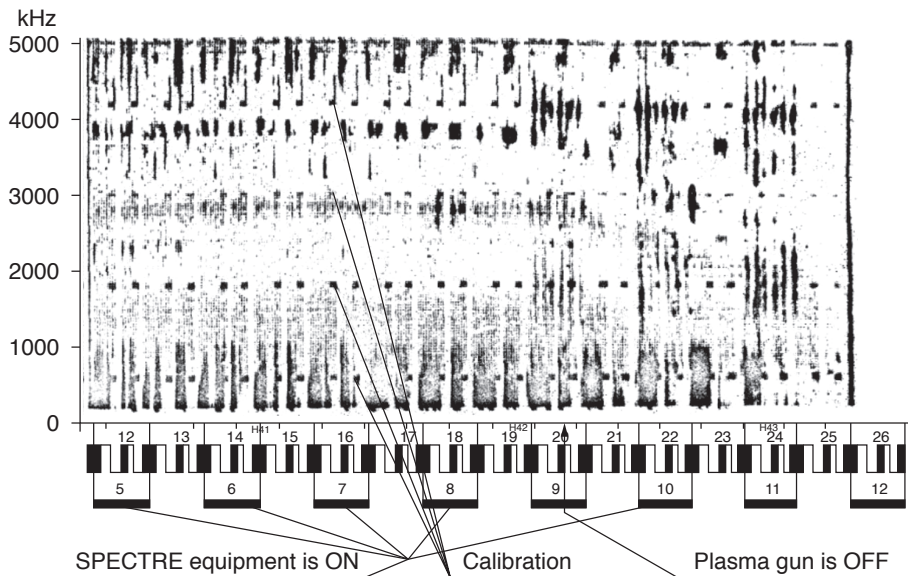
Через два года был осуществлен немецкий эксперимент «Porcupine» (дикобраз) с международным участием. Выполнены три ракетных запуска, первый в марте 1977 г. и два остальных в марте 1979 г. В экспериментах от основной ракеты отделялись уже не один, а четыре контейнера: с инжектором ионов ксенона и три с диагностической аппаратурой¹⁴. Одним из основных результатов эксперимента стало возбуждение колебаний на водородных гиро-частотах (частотах вращения протонов вокруг геомагнитной силовой линии), что показало, что инъекция 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

¹² 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.

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

¹⁴ 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° к направлению трассирования радиоволн через ионосферу на расстоянии 450 км от области разряда¹⁵.

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 процессов¹⁶.

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.

¹⁵ 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.

¹⁶ 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 206×1200 км, наклонением 48.4° 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 области¹⁷. Подробную информацию о научных результатах программы «Интеркосмос» можно найти в публикации¹⁸.

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

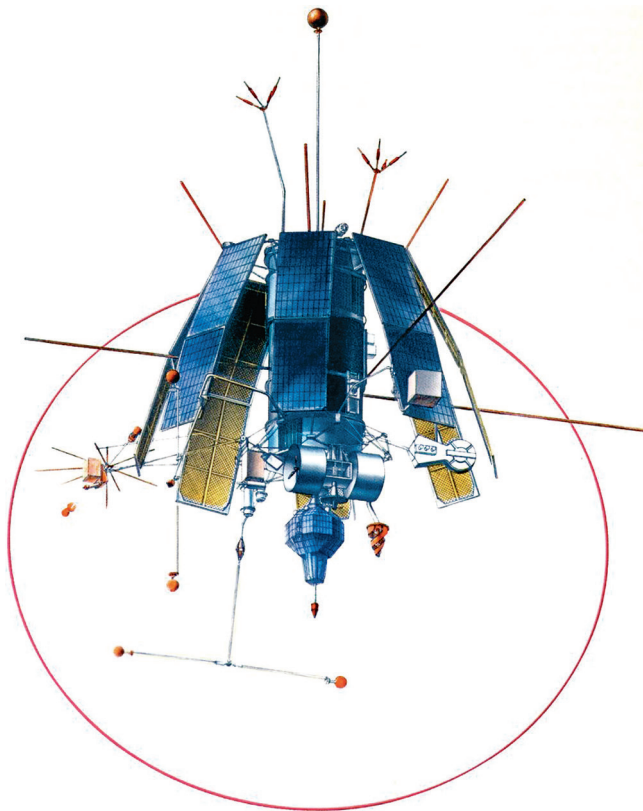
ветра с магнитосферой Земли. Он был осуществлен на спутнике «Интеркосмос-23» («Прогноз-10») с набором советско-чехословацкий научной аппаратуры, запущенном 26 апреля 1985 г. с космодрома Байконур ракетой-носителем «Молния-М». В эксперименте «Интершок» были получены уникальные научные данные, существенно расширившие представления о магнитосфере Земли и солнечно-земных связях. Результатом, выполненных экспериментов стала реализация комплексной программы исследования бесстолкновительных ударных волн на всех ее этапах¹⁹.

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 500×2500 км, наклонением 82.5° 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».

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

¹⁸ 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.

¹⁹ 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 кэВ²⁰. На спутнике

²⁰ Михайлов Ю. М., Ершова 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 ультранизкочастотных (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.

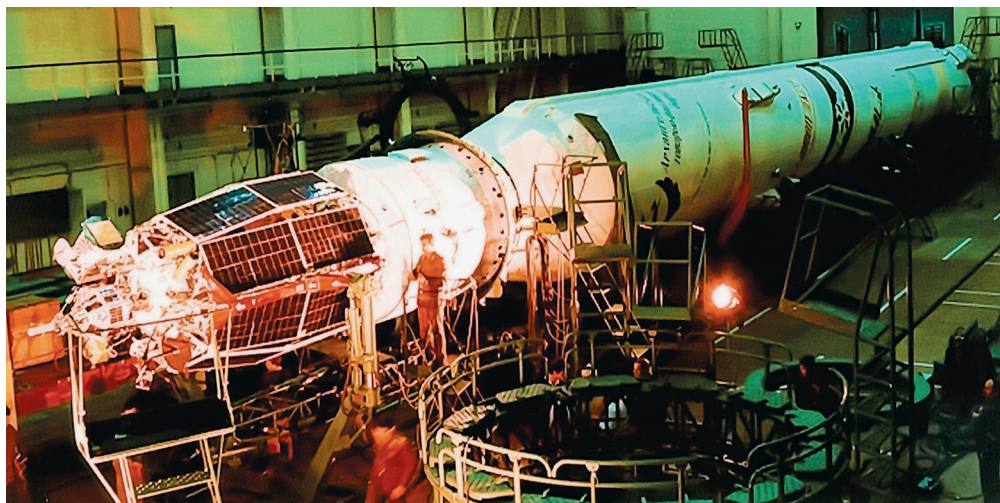
измерения на спутнике «Интеркосмос-24» // Геомагнетизм и аэрономия, 1994. Т. 34. № 2. С. 68–77.

Ученые рассчитывали оценить, как на околоземной плазме сказываются многочисленные процессы: возмущение от магнитных бурь, влияющих на самочувствие человека, выпадение 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 «Интеркосмоса-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 440×3080 км, наклонением 82.5° 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 «Интеркосмоса-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 поля²¹.

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 бури²². 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 одновременно²³.

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

²² Васьков В. В., Будько Н. И., Гдалевич Г. Л., Канустина 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.

²³ 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.

²¹ 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 продолжались²⁴. 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.

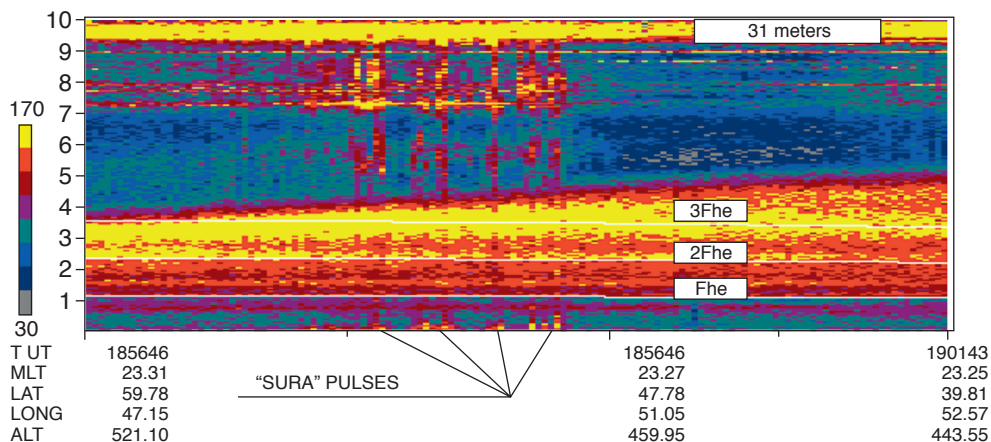
МОЖЕМ ЛИ МЫ НАГРЕТЬ ИОНОСФЕРУ?

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. Мигулин²⁵. 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

²⁴ 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.

²⁵ 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 З. Возникновение плазменных шумов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы по данным спутника «АПЭКС»

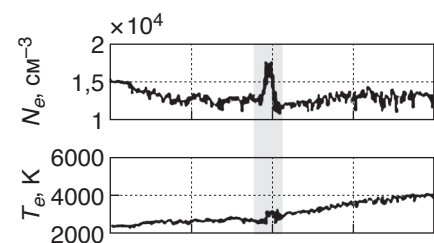
излучения стенда²⁶. Одним из наиболее интересных результатов, полученных на спутнике АПЭКС при его пролете над нагревным стендом «Сура», явилось обнаружение широкополосного радиоизлучения при воздействии на ионосферу мощного излучения на частоте ниже критической частоты ионосферы²⁷. Излучения ниже критической 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.

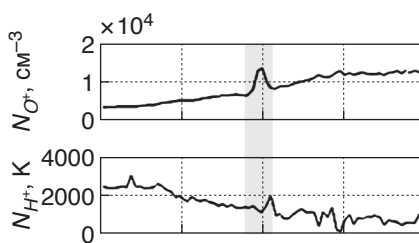
В 1994 г. при пролете спутника «Коронас-И» над работающим стендом «Сура» были зарегистрированы излучения на 3 и 5 гармониках гирочастоты электронов. Результат, полученный на спутнике АПЭКС, был подтвержден более чем через 10 лет на французском спутнике DEMETER (запущен 29 июня 2004 г.), о том, что излучение, 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-

²⁶ Васьков В. В., Будько 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.

²⁷ Васьков В. В., Комраков Г. П., Ораевский В. Н., Прутенский И. С., Пулинец С. А., Кирага А., Клос З. 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»²⁸.

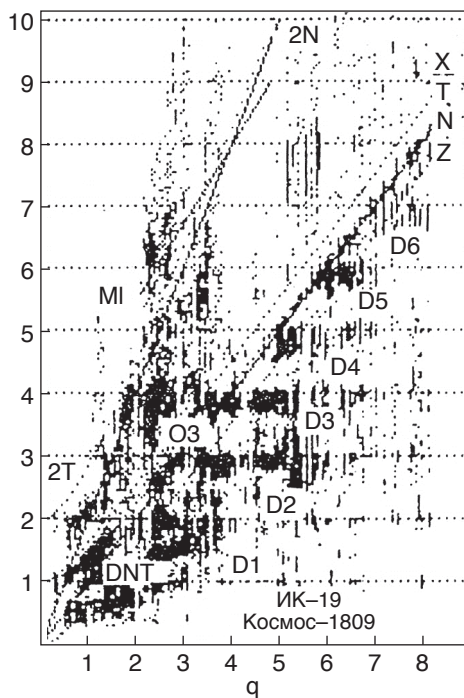
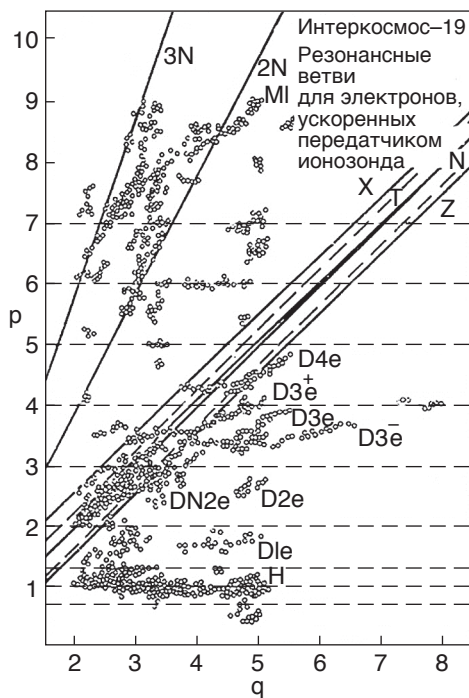
Отвлекаясь от экспериментов с нагревными стендами, хотелось бы остановиться еще на одном интересном результате, полученном в эксперименте АПЭКС, – ускорении электронов при искусственной инжекции со спутника до величин нескольких кэВ в очень узком питч-угле (менее 10°)²⁹. Окончательно механизм создания 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-338³⁰. Оказалось, что резонансное воздействие мощных импульсов спутникового ионозонда тоже приводит к резонансному ускорению частиц до энергий порядка 1 кВ. Ускоренные электроны реги-

²⁸ 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.

²⁹ 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.

³⁰ 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.

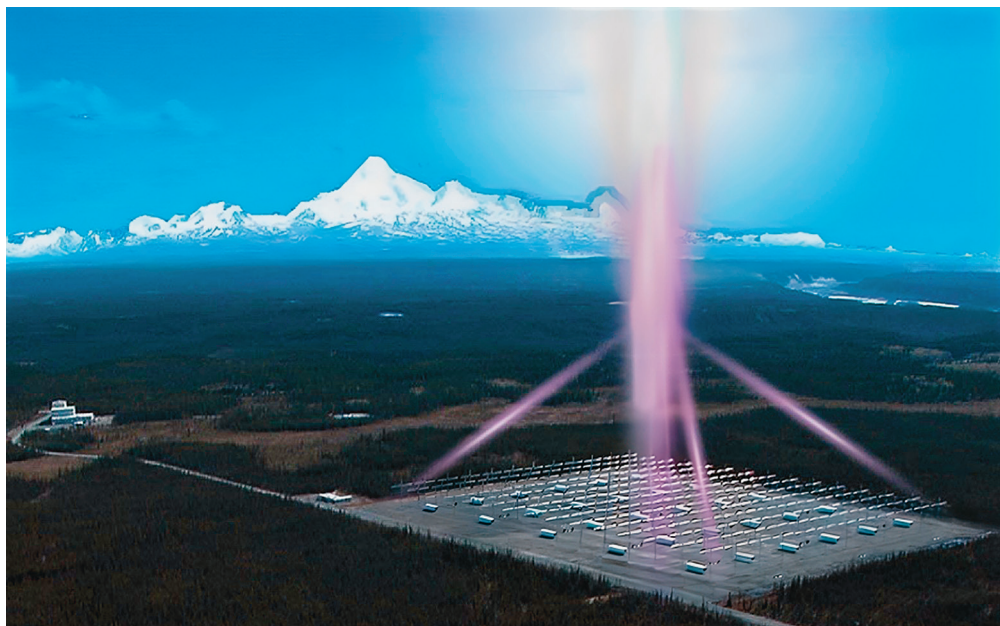
Источник: Пулинец С. А., Селегей В. В. Модификация ионосферной плазмы вблизи ИСЗ при внешнем зондировании ионосферы мощными радиоимпульсами // *Космические исследования*, 1985. Т. 23. № 1

стрировались с помощью спектрометра мягких электронов СФ-3 на спутнике АПЭКС³¹.

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

³¹ 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 Interkosmos-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»³². Изготовление спутника «Ионосфера-М» производится ВНИИЭМ³³. 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-

³² 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.

³³ 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»), государственная регистрация № 122042500031-8.