

## Нижняя ионосфера (натурные эксперименты)

С.П. ПЕРОВ,  
доктор физико-математических наук  
О.К. КОСТКО,  
доктор физико-математических наук

---

**Результаты ракетных, баллонных и зондовых экспериментов и наблюдений в средней атмосфере – стратомезосфере и нижней ионосфере (10–100 км) в различных климатических зонах Земли позволили установить значительную пространственно-временную изменчивость ряда ее параметров, их связь с характеристиками холодной газопылевой атмосферной**



**плазмы и потоками галактических космических лучей. Результаты экспериментов не потеряли актуальность до сих пор.**

### НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ

История открытия ионосферы – области заряженных частиц в средней и верхней атмосфере Земли длительна и интересна. Первое предположение о нем содержалось в письме М. Фарадея (1832) Королевскому обществу. Конечно, Фарадей не знал, что есть заряженные ча-

стицы (электрон открыт Дж.Дж. Томсоном в 1897 г.), речь шла о токовых системах в верхней атмосфере. Затем аналогичную идею предложил У. Томсон (Кельвин) в 1860 г., в 1839 г. вышла книга К.Ф. Гаусса и В. Вебера “Общая теория земного магнетизма”.

Первое упоминание об ионосфере приписывается английскому исследовате-

лю Б. Стюарту, который создал теорию суточных приливов геомагнитного поля (1878). Экспериментальные доказательства существования ионосферы получил в 1901 г. лауреат Нобелевской премии Г. Маркони, один из создателей беспроводной радиосвязи. Он принял в Ньюфаундленде (Канада) сигнал, переданный из Корнуолла (Англия).

Американские электро-техники А.Э. Кеннели и О. Хевисайд посчитали, что радиосигнал отклонился от проводящего слоя ионов на высоте около 80 км.

Против такого предположения возражали известные физики Д.У. Рэлей и А.И. Зоммерфельд, которые предпочли ошибочную, как выяснилось позже, теорию дифракции. В 1926 г. американские ученые Г. Брейт и М. Тьюв с помощью импульсного радиофизического способа измерили время задержки между посылкой импульса и приемом эхосигнала от отражающего слоя. Эти эксперименты не только доказали справедливость объяснения А.Э. Кеннели и О. Хевисайда, но и используются по сей день при изучении ионосферы с наземных станций. Отметим, что ранее академик М.В. Шулейкин, проанализировав данные по распространению коротких волн, пришел к заключению о существовании ионосферного слоя на высоте 260 км.

В 1930 г. выдающийся английский математик, физик и геофизик Сидней Чепмен, уже известный работами об атмосферных приливах и физике верхней атмосферы, разработал теорию простого (одиночного) слоя. Он описал в первом, но уже в весьма хорошем приближении формирование слоя озона (с максимумом концентрации в средней стратосфере – 25–30 км) и слоя атомарного кислорода с максимумом концентрации в нижней термосфере (90–100 км). В 1931 г. С. Чепмен с успехом применил свою теорию к описанию слоев ионосферы. В науке об атмосфере она называется теорией простого слоя Чепмена, согласно которой скорость образования за-

ряженных частиц (атомов кислорода) на заданной высоте под действием солнечного ионизирующего (диссоциирующего) излучения пропорциональна концентрации нейтральных частиц и интенсивности солнечного излучения на данной высоте. Коэффициент пропорциональности определенной зависимости физически означает поперечное сечение ионизации (диссоциации), которое зависит от длины волны ионизирующего (диссоциирующего) излучения и сорта нейтральных частиц. Интенсивность солнечного излучения и концентрация нейтральных частиц в верхней атмосфере ведут себя с изменением высоты противоположным образом. С уменьшением высоты концентрация нейтральных частиц нарастает, а интенсивность солнечного излучения до некоторого уровня остается постоянной, затем начинает падать из-за возрастания числа нейтральных частиц и, следовательно, увеличения поглощения радиации в атмосфере. В соответствии с теорией простого слоя, пока интенсивность солнечного излучения постоянна, с уменьшением высоты скорость образования заряженных частиц (атомов) растет. Это продолжается до момента снижения интенсивности и скорости образования частиц. Таким образом, на некоторой высоте образуется максимум скорости ионизации, создаваемой излучением данной длины волны в атмосфере и сортом частиц. Присутствие в атмосфере разных газов, а в спектре солнечного излучения разных длин волн приводит к тому, что реальные ионосферные слои представляют собой суммы простых слоев Чепмена в областях

ионосферы E и F1(150–200 км). В F2-области (200–400 км) ситуация осложняется за счет действия амбиполярной диффузии (совместное движение электронов и ионов, связанных электрическим полем поляризации, через нейтральный газ под действием силы тяжести и градиента давления). В результате по ряду признаков ионосферу разделили на слои: D (60–90 км), E (90–120 км) и F (150–320 км).

Заслуги и авторитет С. Чепмена в геофизике настолько велики, что при организации Международного геофизического года (Земля и Вселенная, 2007, № 4) он был избран председателем комитета (1953–1959). С. Чепмен немало способствовал созданию и расширению глобальной сети станций наблюдения за состоянием озонового слоя и ионосферы.

Концентрация электронов резко падает с уменьшением высоты ионосферы: от миллиона электронов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха (слой F) до единиц в  $1 \text{ см}^3$  (слой D). Низкая концентрация электронов в слое D затрудняет исследование в нем с помощью наземного радиозондирования.

Масс-спектрометрические ракетные эксперименты, проведенные в 1963–1965 гг., позволили определить ионный состав ионосферы на высоте 65–85 км. Концентрация положительных ионов (молекулярного азота, окиси азота, кислорода и других составляющих атмосферы) достигает сотен ионов в  $1 \text{ см}^3$ , а общая концентрация положительных ионов снижается с 10 тыс. (85 км) до 1 тыс. (65 км) в  $1 \text{ см}^3$ .

К началу 1960-х гг. осталось неизученным содержание заряженных частиц в

нижних слоях атмосферы – нижней и средней стратосфере. Источники ионизации атмосферного воздуха известны: ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, солнечные корпускулярные потоки и галактические космические лучи. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, а также солнечные корпускулы, поглощаются в слоях выше стратосферы. Галактические космические лучи могут создавать в нижней атмосфере заряженные частицы.

#### ПЕРВЫЕ ШАГИ

В начале 1960-х гг. директор Центральной аэрологической обсерватории доктор физико-математических наук, профессор Е.Г. Швидковский поручил молодым сотрудникам обсерватории Ю.А. Брагину и О.К. Костко разработать ракетную аппаратуру и методы измерения заряженных частиц в нижней атмосфере Земли.

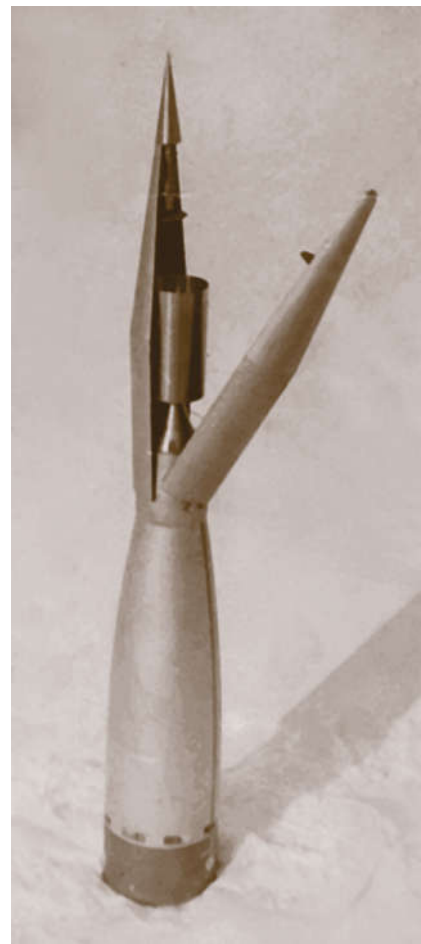
После необходимых расчетов и лабораторных исследований авторы остановились на методе измерений заряженных частиц с помощью конденсатора Жердьена. Такой цилиндрический конденсатор был установлен в головной приборной части метеорологической ракеты типа М-100 (Земля и Вселенная, 2008, № 1). К конденсатору Жердьена подключался электронный фильтр, который отделял электроны от ионов. Атмосферные ионы, движущиеся вместе с потоком воздуха сквозь цилиндр конденсатора Жердьена, создают ионный ток в коллекторе. Концентрацию положительных ионов рассчитывают по регистрируемому току, ско-

рости ионов в камере прибора, площади поперечного сечения цилиндра и коэффициенту газодинамического режима обтекания.

Как уже сказано, основной источник ионизации в нижних слоях атмосферы – космические лучи, ее скорость сильно зависит от широты (геомагнитной) и возрастает от экватора к полюсу. Чтобы проверить широтную зависимость измеряемой концентрации заряженных частиц, ракеты запускались с научно-исследовательских судов Гидрометеослужбы в различных широтных зонах.

Первые измерения концентрации положительных ионов и электронов (май – июнь 1965 г.) с борта научно-исследовательского судна “Ю.М. Шокальский” показали, что в стратосфере есть слой повышенной концентрации ионов, который можно считать глобальной характеристикой нижней ионосферы. До высоты около 70 км концентрация электронов оказалась значительно меньше концентрации положительных ионов. Днем между высотами 70 и 75 км присутствуют в соизмеримых количествах отрицательные ионы и электроны, выше 75 км мало отрицательных ионов, ниже 75 км ночью электроны практически отсутствуют. Дальнейшие измерения зафиксировали максимум стратосферного слоя повышенной концентрации ионов на высоте 10–40 км. Концентрация ионов в нем меняется в пределах  $1,4\text{--}2,8 \times 10^4 \text{ см}^3$ . В дневных измерениях выше этого максимума расположен второй максимум ионной концентрации меньшей величины. Ночью она плавно убывает.

Е.Г. Швидковский, Ю.А. Брагин и О.К. Костко за но-



*Приборная часть метеорологической ракеты с конденсатором Жердьена.*

ваторскую научную работу, высоко оцененную научной общественностью, получили диплом на открытие № 56 с приоритетом от 31 января 1965 г., в котором записано: “Экспериментально установлено ранее неизвестное свойство атмосферы Земли (10–70 км), заключающееся в существовании области повышенной ионизации (с максимумом ионов порядка  $10^4$  в  $1 \text{ см}^3$  на высоте 10–40 км) и области пониженной ионной концентрации (с минимальным количеством ионов  $0,5 \times 10^3$  в  $1 \text{ см}^3$ ) на высоте 50–70 км”. Экспери-





*Запуск метеорологической ракеты с борта исследовательского судна. 1970-е гг.*

ные публикации, изобретения и диплом на открытие молодой ученый был неисчерпаемым источником идей во многих областях физики, особенно в изучаемой им области – физике атмосферы. Обладая научной интуицией и удивительной способностью находить среди студентов кадры для научной работы, Ю.А. Брагин создал достаточно сплоченный и сильный в научном отношении коллектив, существующий и ныне как Отдел атмосферных исследований НГУ. В него входят лаборатории геоэлектричества, физики плазмы, сектор космического эксперимента, обсерватория атмосферного электричества, группа мультимедиа технологий.

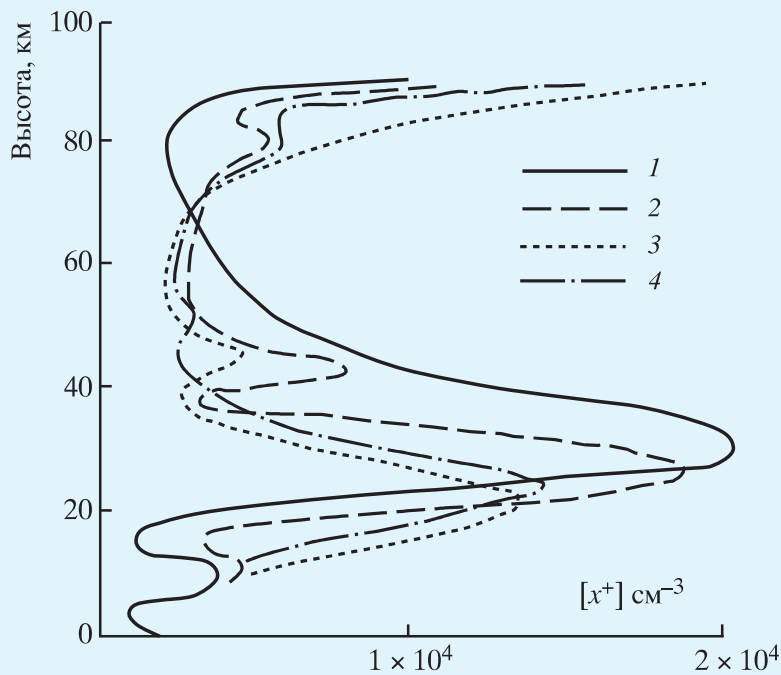
Ю.А. Брагин и его сотрудники с помощью приборов, установленных на ракете М-100, выполнили пионерские исследования объемных электрических зарядов, электропроводности и токов электрической проводимости атмосферы. Экспериментальные данные показали, что нет строго экспоненциального уменьшения электрических зарядов с увеличением высоты. Знак заряда с изменением высоты постоянно менялся. Было замечено, что если погода управляет электричеством тропосферы и стратосферы, то источник формирования электричества мезосферы лежит ниже стратопазы. Интенсивность потоков электронов с энергией меньше

ментальные результаты авторы открытия осмыслили и описали в последующих публикациях.

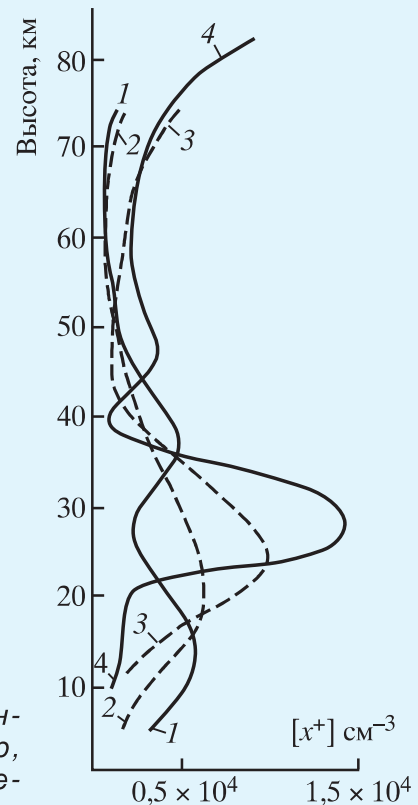
В проблемной записке Объединенной комиссии по физике солнечно-земных связей при Международном совете научных союзов, составленной видными зарубежными учеными и опубликованной в 1969 г., отмечается, что данные измерений ионной концентрации, полученные в Центральной аэрологической обсерватории, наиболее достоверны.

#### РАБОТЫ В НГУ

В 1966 г. известный советский ученый и организатор науки член-корреспондент АН СССР Р.И. Солоухин пригласил научного сотрудника Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) кандидата физико-математических наук Ю.А. Брагина для научной и педагогической работы на кафедру общей физики Новосибирского государственного университета (НГУ). Только что защитивший диссертацию, имевший многочислен-



Суточные изменения широтных вариаций ионной концентрации. Слева: 1 – ночь, 2 – утро, 3 – день, 4 – вечер, сплошные кривые – после полудня, пунктирные – перед полуднем; справа: 1 –  $0^\circ$  с.ш.,  $178^\circ$  в.д., 2 –  $1^\circ$  с.ш.,  $165^\circ$  в.д., 3 –  $35^\circ$  с.ш.,  $151^\circ$  в.д., 4 – средние широты.



20 кэВ выше, чем у потоков с большими энергиями. Масс-спектрометрические измерения положительных ионов до тысяч атомных единиц выявили, что ниже 80 км основные ионы не молекулярные, так как уменьшения массы ионов с увеличением высоты не наблюдалось. Один из важных электрических параметров атмосферы – ее электростатическое (квазистатическое) поле.

С помощью датчиков поля и других приборов было установлено, что вертикальное электрическое поле в мезосфере часто меняет свой знак, а горизонтальное поле по своей величине соизмеримо с вертикальным и, как правило, изменяется при смене направления ветра. Интенсивность ультрафиолетового и гамма-излучения ниже 50 км

имеет “слоистую” структуру, и рассчитанные распределения по высоте и массе концентрации аэрозолей не очень хорошо согласуются с экспериментальными данными. Дальнейшее развитие связано с важным организационным достижением научной школы Ю.А. Брагина – создание Обсерватории атмосферного электричества, предназначенной для “подспутниковых” одновременных с орбитальными наблюдений из космоса, с поверхности Земли и на ракетах (<http://www.phys.nsu.ru/oe/history5r.htm>).

#### РАКЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЦАО

Параллельно с работами в НГУ в 1960–1970 гг. по инициативе кандидата физико-математических наук Г.А. Ко-

кина в ЦАО были начаты и успешно развивались ракетные исследования нижней ионосферы (слой D). Для измерения концентрации электронов на шпигеле стандартной головной части ракеты М-100 устанавливался зонд постоянного тока. Была накоплена солидная база данных, сделан ряд интересных наблюдений и выводов (Г.А. Кокин, С.В. Пахомов, А.А. Ястребов, Ю.А. Рябов). Анализ показал недостаточную обоснованность представлений о доминирующей роли солнечного ультрафиолетового излучения совместно с космическими лучами для объяснения высоких концентраций заряженных частиц. В качестве дополнительного ионизирующего агента в литературе пред-



*Кандидат физико-математических наук Ю.А. Брагин. 1970-е гг.*

лагалось использовать потоки электронов и протонов, выпадающих из магнитосферы. В ЦАО в первую очередь измерялись потоки электронов с энергиями более 40 кэВ. В результате проведенных измерений с помощью ракет получены данные о них у верхней границы мезосферы в полярных областях и средних широтах северного полушария (В.Ф. Тулинов, В.М. Фейгин, Л.В. Шибалева, С.Г. Яковлев). В дальнейшем анализ базы данных продолжен в ИПГ им. Е.К. Фёдорова (А.Д. Данилов, Л.Б. Ванина) и в ИКИ РАН (Л.Б. Ванина-Дарт, Е.А. Шарков).

Достижения отечественных ученых высоко оценили за рубежом, возникли совместные проекты. В июле – августе 1991 г. в рамках международной кампании “Серебристые облака-91” был выполнен комплексный ракетно-радарный эксперимент, в котором участвовали специалисты NASA, Шведская космическая корпорация, Норвеж-

ский институт оборонных исследований, университеты Австрии, Германии, США, Швейцарии, Швеции, ЦАО, НГУ. На о. Хейса осуществлена серия запусков ракет М-100Б с оптической аппаратурой, предназначенной для регистрации света, рассеянного атмосферой. В двух пусках 31 июля 1991 г. обнаружено аномально сильное рассеяние света в верхней мезосфере, которое можно объяснить только наличием мезосферных облаков. Впервые были обнаружены мезосферные облака в столь высоких широтах (Г.А. Кокин и др., 1996). В это же время на ракетном полигоне Эсрендж (г. Кируна, Швеция) впервые были зарегистрированы сильные электрические поля в окрестности серебристых облаков (82–84 км) и получены первые экспериментальные доказательства присутствия субмикронных ледяных частиц (13–40 нм) на высоте летнего полярного мезосферного радарного эха (PMSE).

#### СВЯЗЬ С ТРОПИЧЕСКИМИ ЦИКЛОНАМИ

Анализ базы практически всеширотного охвата ракетных данных о концентрации электронов в слое D был продолжен в Институте прикладной геофизики им. Е.К. Фёдорова (А.Д. Данилов, Л.Б. Ванина), а затем в ИКИ РАН (Е.А. Шарков, Л.Б. Ванина-Дарт). В ИКИ РАН под руководством Е.А. Шаркова исследовано влияние солнечной активности на нижнюю экваториальную ионосферу в дни с тропическими циклонами и без них (Л.Б. Ванина-Дарт и др., 2008). Из базы данных ЦАО были ис-

пользованы результаты измерений на станции Тумба, Индия (8,5° с.ш., 77° в.д.) и спутникового мониторинга тропического циклогенеза в акваториях Индийского и Тихого океанов. В период всего солнечного цикла связь тропических циклонов с солнечной активностью ослабевает для дней с циклонами по сравнению с данными для дней без них. На высоте 70–75 км в дни с тропическими циклонами ионов становится меньше. На высоте 80 км влияние тропических циклонов на содержание электронов в нижней экваториальной ионосфере не выявлено.

Чтобы изучить возможное влияние тропического циклона с изменчивостью концентрации электронов с верхней ионосферой кандидат физико-математических наук Л.Б. Ванина-Дарт с коллегами проанализировали результаты томографического зондирования в 2007 г., которое проводилось над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° с.ш. и 142° в.д.), Поронайск (49° с.ш. и 143° в.д.) и Ноглики (52° с.ш. и 143° в.д.). Метод фазоразностной томографии в ионосфере на базе сигналов низкоорбитальных спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС и GPS) теоретически позволяет выявлять вариации электронной концентрации ионосферы, вызванные распространением сильных циклонов в тропосфере Земли. Сделанные ранее выводы за первую половину ноября 2007 г. свидетельствуют о том, что воздействие тропических циклонов на верхнюю ионосферу изменяет ее параметры до 40%. Влияние тропических циклонов, предполагаемого источника возмущения на



высотах слоя F2, начинает значительно уменьшаться на расстоянии 4–5 тыс. км от него в горизонтальном направлении. В направлении запад – восток в Северном полушарии прекращается его влияние около 50° с.ш. на расстоянии 6500 км по горизонтали. Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что тропический циклон – это “широкополосный” и долговременный источник возмущения.

Вернемся к слою D в тропической ионосфере. Индийский метеоролог К.С. Аппу проанализировал по ракетным данным изменения термической структуры в стратосфере – мезосфере над станцией Тумба при циклонических штормах в Бенгальском заливе и Аравийском море. Рассмотрены все 47 штормов в 1971–1982 гг., исследованные с помощью ракет. Температурный режим в нижней мезосфере в период депрессий, как перерастающих затем в штормы и сопровождающихся нагревом до 8° С, так и не превращающихся в штормы и сопровождающихся сильным охлаждением, резко отличается: первые переходят в штормы через 1–3 дня, вторые существуют еще 3–4 дня после прохождения длинного пути и затем диссипируют.

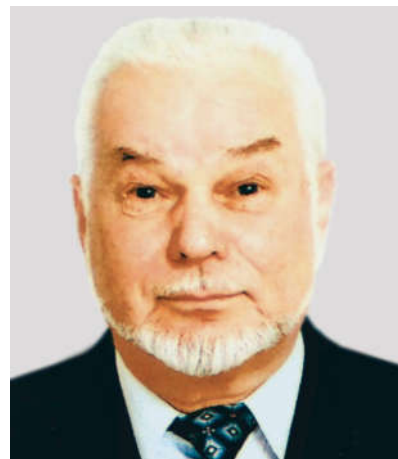
Термодинамический режим стратосферы – мезосферы меняется при штормах, следующих друг за другом в течение 2–3 недель. Около 65% штормов относятся к такой категории и сопровождаются потеплением в нижней мезосфере и стратосфере. Правда, в ряде случаев потепление в мезосфере сопутствует охлаждению стратосферы. Можно провести аналогию с

изменениями динамики, газового состава, фотохимии и заряженных частиц в стратосфере. Без детального комплексного рассмотрения всей совокупности элементарных процессов в газопылевой атмосферной плазме с переносом радиации и термодинамикой, включая вертикальные потоки и волны, решить проблему слоя D не удастся.

#### АЭРОЗОЛИ И НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА

Важнейшая характеристика атмосферы – аэрозоль внеземного, земного и атмосферного происхождения. Он играет ключевую роль в проблеме климата, поскольку облачные аэрозоли (в том числе капли) регулируют поток солнечной радиации к поверхности Земли и существенным образом определяют альбедо планеты. Аэрозоли, капли, кристаллы льда и пыль тесно связаны с электрическими процессами в атмосфере, формируя важную и сложную проблему газопылевой низкотемпературной атмосферной плазмы, включая грозовую активность в тропосфере, связанные с ней электрические разряды в стратосфере – мезосфере (джеты, спрайты, эльфы) и глобальную электрическую сеть (Земля и Вселенная, 2015, № 2).

Выдающуюся роль в развитии ракетного и аэростатного исследования атмосферного электричества с помощью зондов и баллонов в ЦАО сыграл кандидат технических наук В.И. Ермаков. Вся бортовая электронная аппаратура для стандартных и экспериментальных головных частей метеорологических ракет



*Кандидат технических наук  
В.И. Ермаков. 1990-е гг.*

М-100, ММР-06 и их модификаций, оригинальные аэростатные и баллонные (шар-зондовые) приборы для измерения электрических характеристик атмосферы разработаны и испытаны лично им или вместе со своими сотрудниками. В конце 1980 – начале 1990-х гг. под руководством В.И. Ермакова (ЦАО) и Ю.И. Стожкова (ФИАН им. П.Н. Лебедева) выполнены уникальные баллонные наблюдения в полярных, среднеширотных и тропических широтах обоих полушарий. Для измерений концентрации ионов использовался проточный конденсатор Жердьена, потоков космических лучей – стандартные счетчики Гейгера.

Это хорошо видно из таблицы, в которой наряду со средним распределением ионов по высоте специально приведены результаты измерений концентраций ионов 8 мая N<sub>1</sub>. В этот день тайфун изменил ситуацию, ветер поменял направление и скорость на разных высотах, температура по-

**СРЕДНЯЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ ИОНОВ N, СТАНДАРТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ДЛЯ N (D),  
ПОТОК КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ (I) И ОТНОШЕНИЕ N/I  
(TERLS, ТУМБА, ИНДИЯ, МАЙ–ИЮНЬ 1990 г.)**

H, км	N, см <sup>-3</sup>	N <sub>T</sub> , см <sup>-3</sup>	D, см <sup>-3</sup>	D/N, %	I, см <sup>-2</sup> /с	N/I, 10 <sup>3</sup> с/см
2	600	680	500	83	0,5	12
4	530	500	360	68	0,1	5,3
6	500	300	240	48	0,14	3,5
8	600	50	200	33	0,25	2,4
10	680	450	180	26	0,44	1,55
12	820	100	240	29	0,64	1,28
14	1040	500	300	29	0,78	1,34
16	1080	450	260	29	0,87	1,25
18	1140	1260	120	10,5	0,9	1,27
20	1120	1380	110	9,8	0,86	1,3
22	960	625	140	14,5	0,75	1,3
24	860	575	360	68	0,1	1,36
26	660	250	120	18	0,53	1,25
28	550	500	80	14,5	0,43	1,28
30	530	625	80	15	0,38	1,4

*Примечание.* Значение N<sub>T</sub> – 8 мая (влияние тайфуна).

высилась в тропосфере и стратосфере на 5–10 °С и содержание пыли и других аэрозольных частиц в теплом воздухе возросло, а концентрация ионов понизилась.

Сравнение средних высотных профилей ионной концентрации и кривых поглощения космических лучей на различных геомагнитных широтах в интервале 0–35 км позволило получить новое, неожиданное – линейное (а не квадратичное) соотношение между интенсивностью космических лучей и концентрацией ионов. На языке химической кинетики, например, при измерениях констант реакций в лабораторных реакторах, это означает существенное уменьшение роли рекомбинации ионов в объеме по сравнению с гибелью ионов на стенках реактора. Таким образом, привычная форма реакции рекомбинации

ионов (или ионов и электронов) по квадратичному закону (реакция 2-го порядка) пренебрежимо мала по сравнению с гибелью ионов на поверхности аэрозолей (реакция 1-го порядка), что дает возможность оценить эффективную среднюю поверхность атмосферных аэрозолей (профессор Б.Х. Суббарайя, С.П. Перов, В.И. Ермаков и др., 1998). Важную роль в этих по сути глобальных наблюдениях сыграли баллонные измерения концентрации ионов на геомагнитном экваторе на станции TERLS, Индия, в мае-июне 1990 г.

Сделанное открытие объяснило многие особенности профилей концентрации ионов, в частности их волновую структуру – за счет перераспределения аэрозолей при распространении внутренних гравитационных волн, возмущений из-за тропического урагана

и возрастание содержания ионов при усилении солнечной активности, сопровождающееся ослаблением вертикальных потоков в восходящих частях ячеек Хедли (С.П. Перов, С.П. Гупта, 2003) (Земля и Вселенная, № 1, 2005). Изменения концентрации аэрозолей, а следовательно, и ионов происходят при распространении внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере из-за противоположных вертикальных движений воздуха в разных частях волны. Концентрация аэрозолей, как правило, уменьшается с высотой, поэтому при динамических возмущениях с усилением вертикального переноса (ВГВ, приливы, волны Кельвина и Россби-смешанные, тайфуны) содержание аэрозольных частиц с высотой будет возрастать, а число ионов уменьшаться.



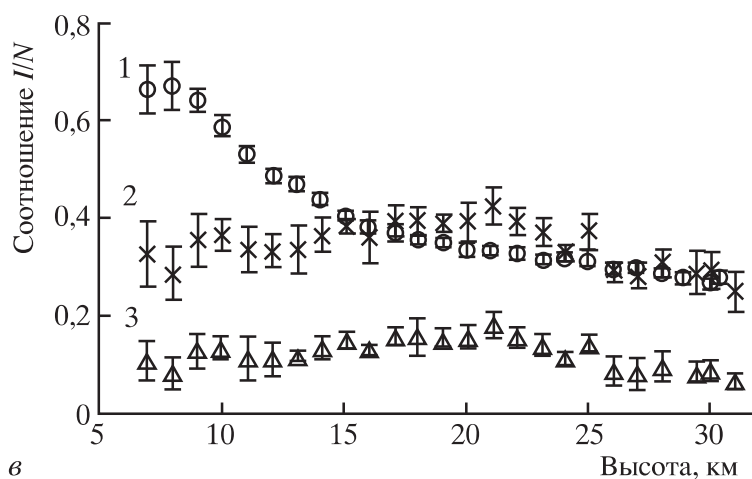
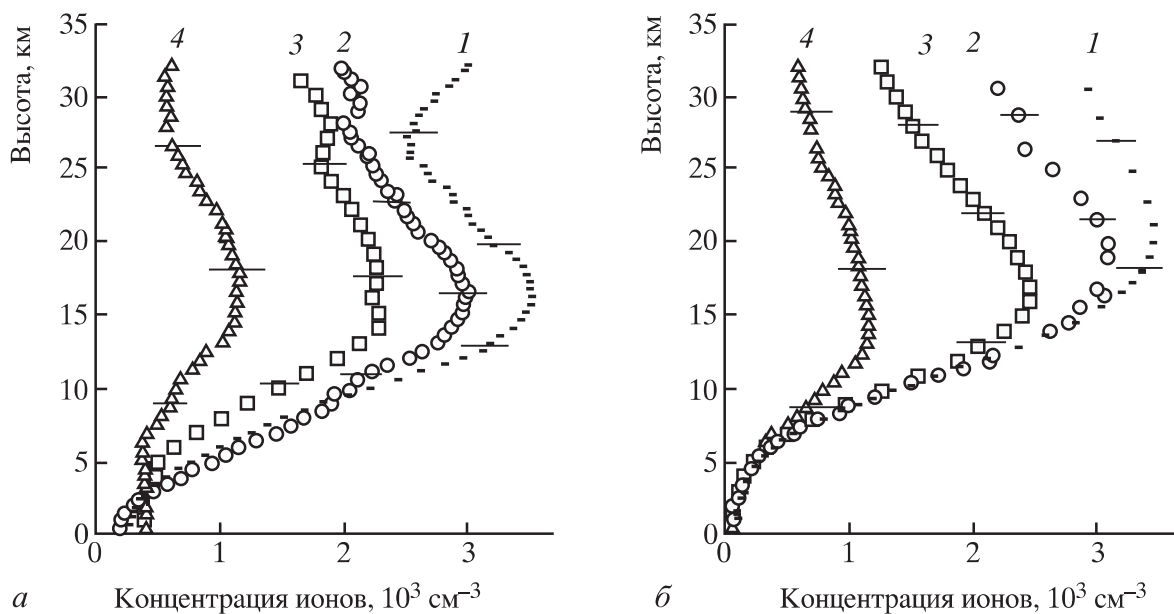


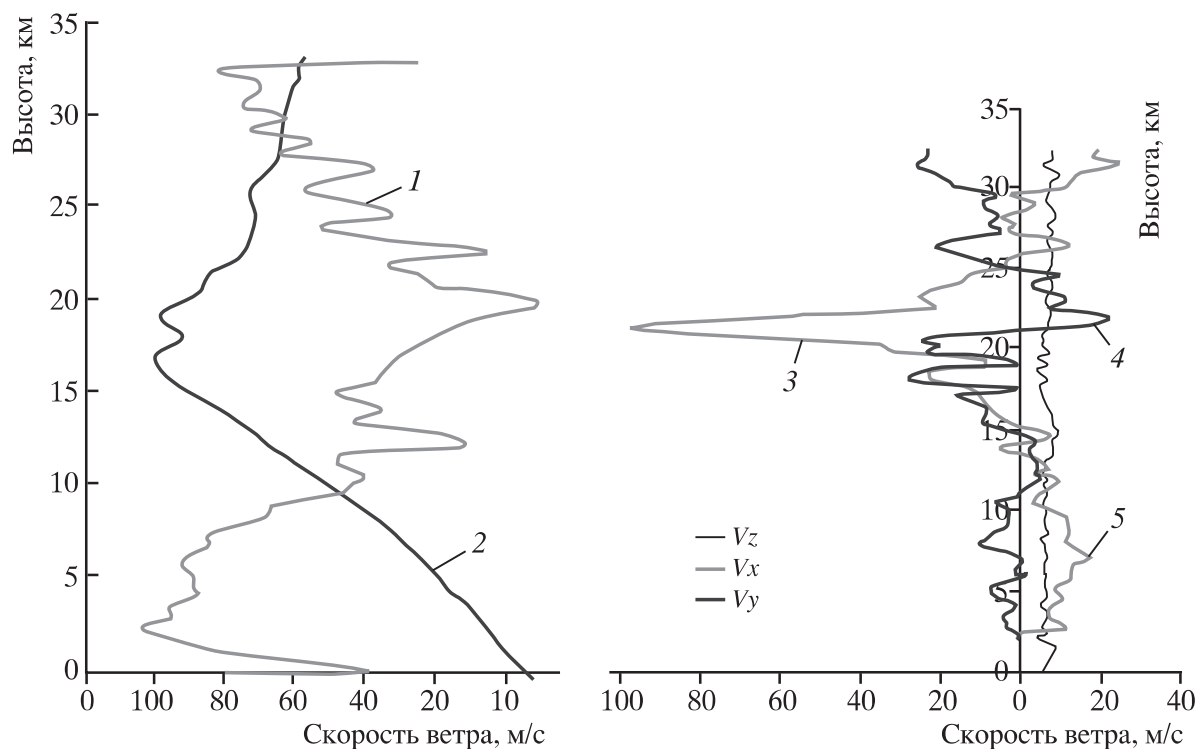
График высотных профилей концентрации ионов на станциях ракетного зондирования атмосферы (поток космических лучей снижается с уменьшением геомагнитной широты): а) 1 – Молодежная (0,4 ГВ), 2 – Рыльск (3,3 ГВ), 3 – Балхаш (5,3 ГВ), 4 – Тумба (17,3 ГВ); б) график высотного распределения потоков космических лучей на различных станциях: 1 – ФИАН им. П.Н. Лебедева, Мирный, Антарктида (0,03 ГВ), 2, 3 – среднеширотные станции с величинами жесткости геомагнитного обрезания для космических лучей (3,3; 5,2 ГВ), 4 – на магнитном экваторе, Тумба, Индия (17,3 ГВ); в) отношение  $I/N$  как функции высоты  $N$  для магнитного экватора (Тумба; 17,3 ГВ) и среднеширотной станции (Рыльск; 3,3 ГВ): 1 – отношение потоков космических лучей, 2 – отношение ионных концентраций, 3 – отношение квадратов ионных концентраций.

#### ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫЕ АЭРОЗОЛИ И КЛАСТЕРЫ

Благодаря высокой чувствительности разработанного В.И. Ермаковым

фотоприемника удалось зарегистрировать высвечивание энергонасыщенных аэрозольных частиц при их прохождении вместе с потоком воздуха через “теп-

лый” (выше 0 °С) реактор на траектории парашютирования головной части ракеты. Частицы попадали в реактор из холодной атмосферы (–40–80 °С) на высотах:



Графики волнового характера высотных профилей: 1 – ионной концентрации  $N$ , 2 – температуры (слева), 3 – зонального и 4 – меридионального ветра, а также 5 – скорости подъема зонд-баллона (справа) 9 мая в 0 ч 03 мин по Гринвичу.

70–90 км, около 50 км и в интервале 10–40 км. Такие частицы фиксировались днем и ночью практически во всех широтных зонах, но особенно в больших количествах в Антарктиде в период формирования озоновой аномалии – “дыры” (С.Ф. Тимашёв и др., 1993; С.П. Перов, С.Ф. Тимашёв, 2012). Анализ спектра электрических импульсных сигналов фотоприемника привел к важному выводу о высвобождении энергии в объеме аэрозольной частицы при ее попадании в теплый реактор и высвечивании, но не люминесценции с поверхности. В последнем случае распределение амплитуд сигналов было бы квадратичным, а не кубическим, как в нашем случае.

В экспериментах 1982–1984 гг. после извержения вулкана Эль-Чичон в Мексике в апреле 1982 г. такие частицы в значительном количестве были зафиксированы ракетными анализаторами на 30–40 км.

При разработке особо чувствительного (по сравнению с применявшимся ранее) каталитического калориметрического теплового метода измерения атомарного кислорода прибором КДАК обнаружены “энергo-активные агенты” в тех же слоях, где регистрировались “вспышки” энергoнасыщенных частиц. Прибор КДАК создан для измерения атомарного кислорода тепловым каталитическим методом с учетом опыта создания предшествующих датчиков и их испытаний в

различных географических районах и при различной гелиогеофизической обстановке.

Лабораторная метрологическая база, созданная для разработки хемилюминесцентного газофазного полетного анализатора озона и атомарного кислорода, использует метод химического титрования окислами азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) кислородно-воздушной смеси. В новом варианте датчик регистрирует нагрев двух полупроводниковых термopар, соединенных последовательно, за счет теплового эффекта рекомбинации атомов кислорода из атмосферы на специально подобранной каталитической поверхности. Новая конструкция прибора позволила снизить временную инерцию дат-

чика до величины менее 1 с. Чувствительность КДАК увеличена за счет усилителя с высоким коэффициентом усиления, малыми температурным дрейфом и уровнем собственных шумов, а надежность повышена датчиком-модулятором. Датчик позволил периодически прерывать поток атомов (или других энергонасыщенных частиц) и тем самым определять фоновый сигнал. В результате достигнута высокая чувствительность порядка 0,01 °С вместо 0,5–1 °С. В апогее траектории режим обтекания датчика был свободно-молекулярным (число Кнудсена > 10), что позволило оценить сверху величину концентрации атомов

кислорода –  $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Конструкция КДАК с тefлоновой крышкой обеспечивала максимально возможную чистоту эксперимента, особенно в момент вскрытия створок при взрыве пиропатрона в верхней части. Интересно отметить максимум в профиле на высоте около 15 км, что может говорить о возможном существовании “энергонасыщенных” аэрозолей, диффундирующих в полость прибора и распадающихся на чувствительном элементе с выделением энергии.

Впервые анализ прямого и косвенного воздействия заряженных частиц на атмосферный озон и полученный вклад галактических космических лучей в разру-

шение атмосферного озона на высоте 15–25 км провел член-корреспондент РАН В.Л. Тальрозе и доктор физико-математических наук И.К. Ларин. Они рассмотрели реакцию способность ионных кластеров, которые представляют собой ион, окруженный молекулами. Молекулы удерживаются силами поляризационного или ион-дипольного взаимодействия – теми же “ланжевенновскими” силами, которые обеспечивают большие сечения и константы скорости ионно-молекулярных реакций. Образуются ионные кластеры тем легче, чем ниже температура и выше плотность частиц. По этой причине решающую роль играют процессы

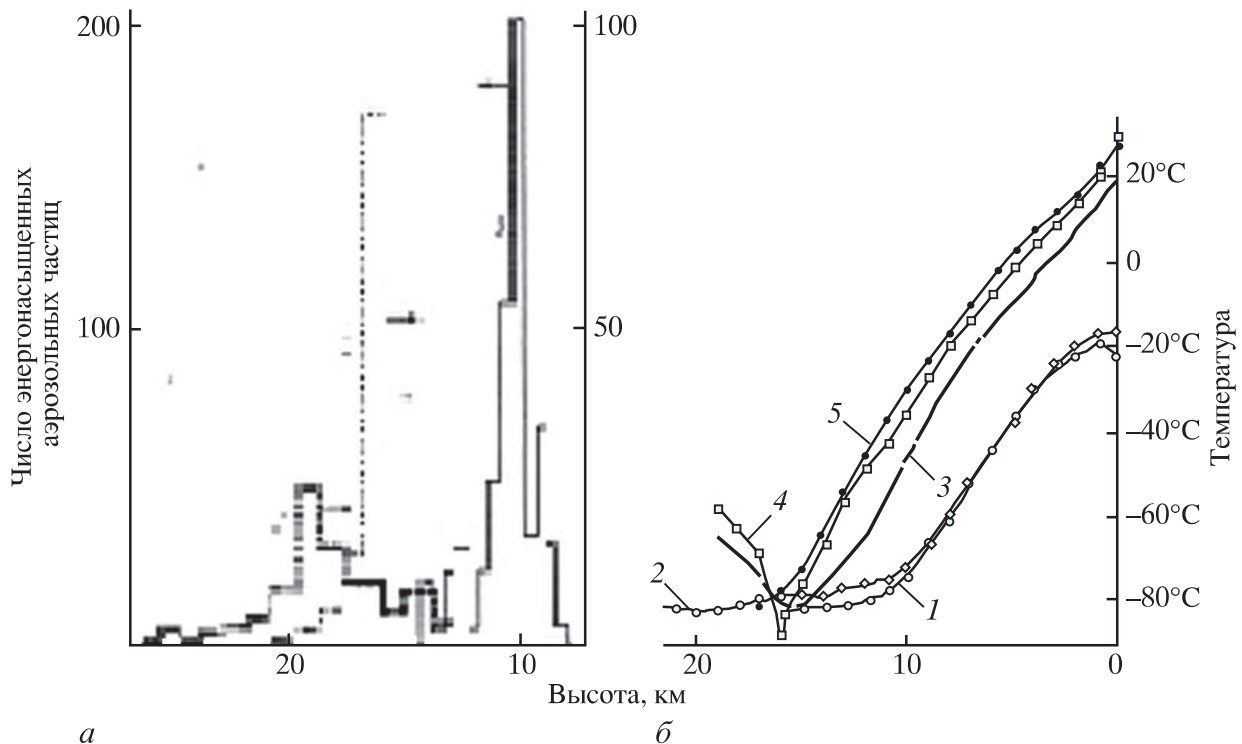


График распределения температуры по высоте по данным радиозондов (б) на станции Молодежная 19 и 26 августа 1987 г. (кривые 1 и 2) и на станции Тумба 25 ноября, 5 и 7 декабря 1987 г. (кривые 3, 4 и 5). а) график количества энергонасыщенных аэрозольных частиц  $N$ , прошедших через проточный реактор ГИАКО во время парашютирования головной части ракеты М-100 и рассчитанных на 1 км в свободной атмосфере: 1–3 декабря 1987 г. (день) и 2–5 декабря 1987 г. (ночь); эксперименты, проведенные на международном полигоне TERLS (Тумба). 3–25 августа 1987 г. (утро) на с. Молодежная.

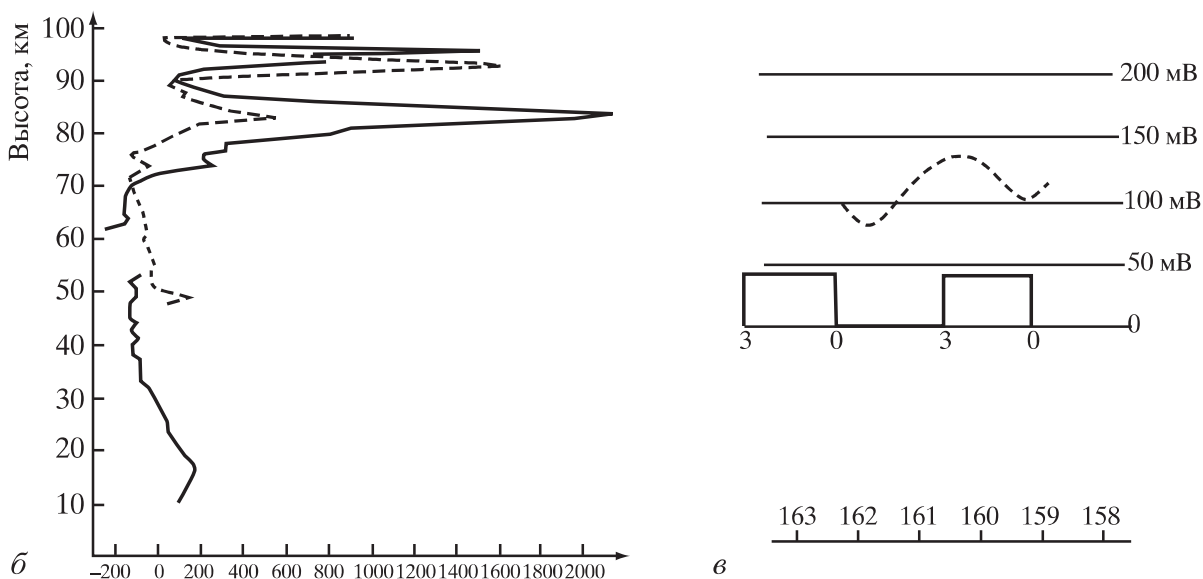




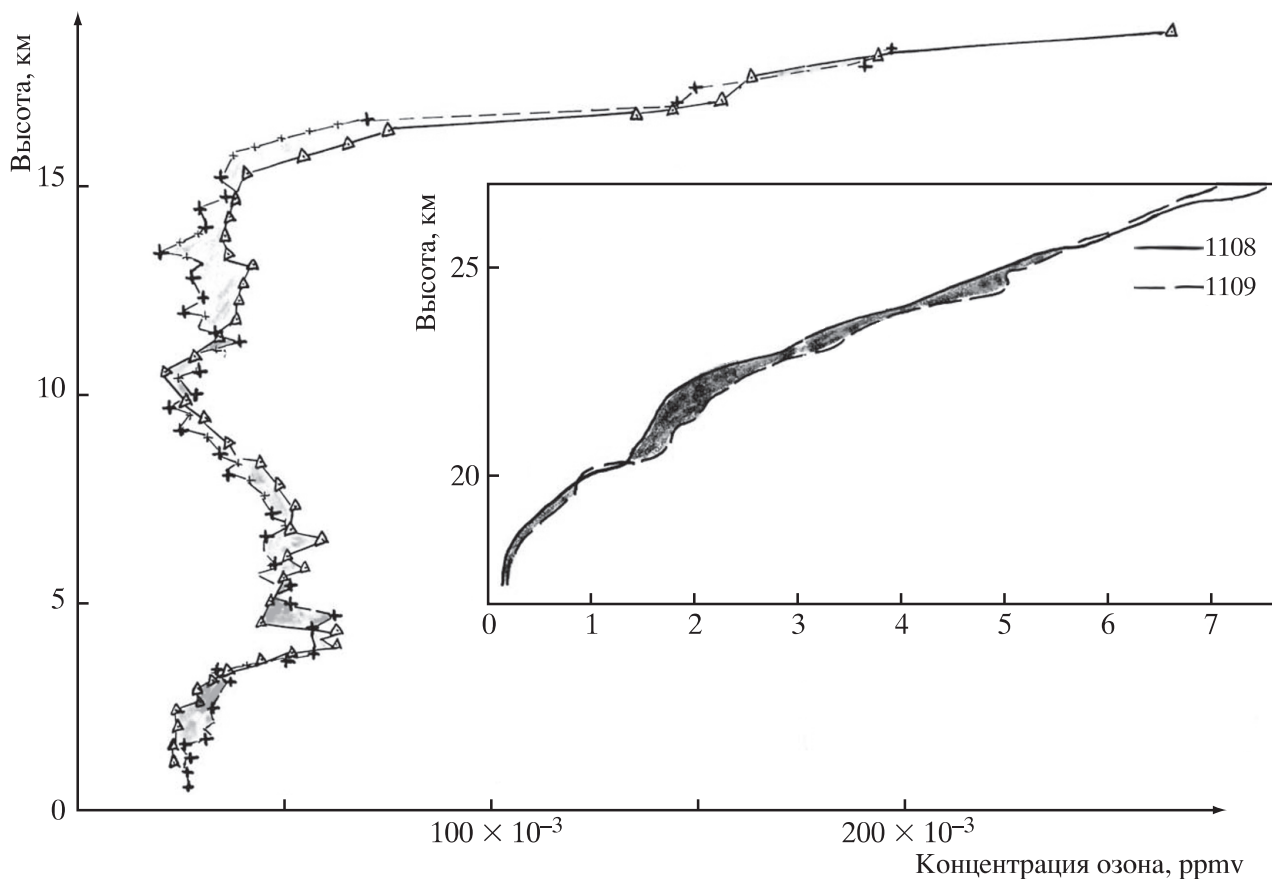
с участием ионных кластеров в холодной мезосфере, особенно в мезопаузе (80–85 км) – слое D ионосферы, и в холодных областях тропосферы и стратосферы выше и ниже тропопаузы. И.К. Ларин выдвинул гипотезу о возможности существования нерекombинирующих ионных кластеров, которая подтвердилась регистрацией энергонасыщенных частиц в ракетных экспериментах на экваторе и в Антарктиде (С.П. Перов, С.Ф. Тимашёв, Э.Е. Гутман, 1993 г.). По оценкам И.К. Ларина, слипшиеся ионные кластеры противоположного знака (до  $10^{10}$  в  $\text{см}^3$  на 10–15 км) – центры конденсации водяного пара – могут связывать за год количество воды, близкое к сумме осадков за то же время. Формирование ионных кластеров из простых ионов на высоте 15–25 км сопровождается рождением цепным

путем гидроксильных радикалов, разрушающих атмосферный озон. Такой механизм – единственный ночной цикл гибели озона, чей вклад в его суммарную скорость разрушения достигает 20–45%. Его подтвердили наши ракетные эксперименты в ночной влагонасыщенной атмосфере тропиков: максимальное уменьшение отношения смеси озон – воздух – 15–25% наблюдается в самой холодной части нижней атмосферы, выше и ниже тропической тропопаузы (12–15 км).

Мы предполагаем, что в механизме высотных электрических разрядов (спрайтов, голубых джетов, эльффов и др.) от грозовых облаков в нижнюю ионосферу важную роль могут играть энергонасыщенные аэрозоли, возможно представляющие “замороженную” плазму из непрорекомбинировавших атмосферных



Головная часть ракеты М-100Б с каталитическим датчиком (КДАК) энергетически насыщенными частицами (а). Видны детали эксперимента в момент вскрытия створок при взрыве пиропатрона в верхней части защитной системы. б) Высотные профили сигнала при подъеме (пунктир) и спуске (сплошная) 23 марта 1983 г.; в) пример записи телеметрического сигнала при открытом и закрытом датчике: буквами З и О обозначены положения модулятора: О – модулятор открыт, З – модулятор закрыт, видно, что сигнал при закрытом модуляторе уменьшается.



Графики высотных профилей отношения смеси озон – воздух. Ракетные измерения проведены ночью 24 мая 1990 г. (21 ч 00 мин и 23 ч 00 мин по Гринвичу) хемилюминесцентными анализаторами в головной части, спускавшейся на парашюте.

ионов, молекул воды и других атмосферных газов. На фотографии спрайта выше 25 км запечатлено яркое голубое свечение, обусловленное релейским (и/или нерелейским – аэрозольным) рассеянием атмосферы света от обычных молний.

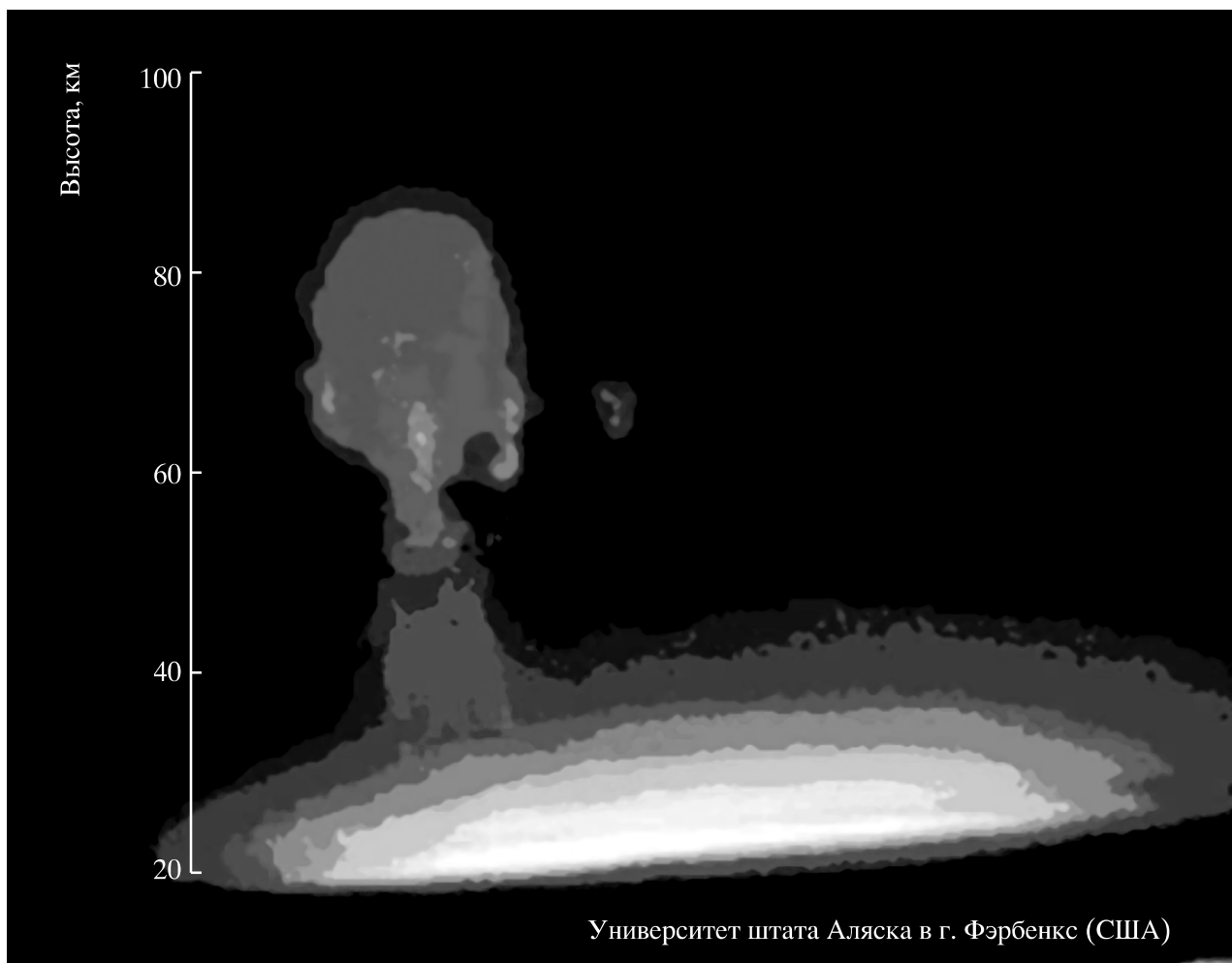
На станции “Восток” в Антарктиде профессором О.А. Трошичевым было обнаружено повышение температуры воздуха (~10°) во время зимних Форбуш-понижений. Возможная схема механизма такова: условия

в слое D приводят к увеличению электрического поля в стратосфере; количество ядер конденсации возрастает, и образуются полярные стратосферные облака, изменяющие радиационный режим всей атмосферы. Зимой 1989 г. ЦАО организовала полет летающей лаборатории Ил-18 “Циклон” к Северному полюсу. Во время полета произошло полярное сияние, и бортовой лидар зарегистрировал синхронное появление стратосферных облаков (С.П. Перов, А.Е. Тяботов). Возможно, такой эффект так же важен, как и вышеописанный, при анализе механизма формирования высотных разрядов.

#### ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Максимальная концентрация положительных ионов в ракетных экспери-

ментах Ю.А. Брагина приблизительно на порядок выше, чем концентрация отрицательных ионов в баллонных (аэростатных) экспериментах В.И. Ермакова. Это и есть подтверждение (еще одно!), что в атмосфере могут присутствовать энергонасыщенные частицы с замороженной плазмой. Двигаясь с потоком через горячий ракетный реактор, они распадаются и регистрируются коллектором как однозарядные ионы. Баллонный конденсатор Жердьена пропускает холодный воздух стратосферы, так как его стенки сделаны из тонкого металла, быстро принимающего температуру воздуха, скорость подъема (протока) – 5–6 м/с. По грубым оценкам в средней частице с замороженными ионами могут быть  $10^6$ – $10^7$  ионов (столько квантов света от одной средней частицы



регистрирует ФЭУ в ракетном полете), через реактор проходит при этом  $200 \text{ см}^3/\text{с}$ . Таким образом, получаем грубую оценку измеряемой максимальной концентрации ионов в ракетных экспериментах Ю.А. Брагина —  $5 \times 10^3$ – $10^4$  ионов в  $\text{см}^3$ .

Отметим, что термин “замороженная плазма” широко использован Л.М. Шульманом в его монографии “Ядра комет” (М.: Наука, 1987, 232 с.), в частности, при обзоре работ по проблеме ионно-молекулярных кластеров как резервуаре внутренней энергии.

Мы не касаемся результатов других натурных экспериментов, подтверждающих довольно неожиданные особенности газопылевой атмосферной плазмы и позволяющих лучше разобраться

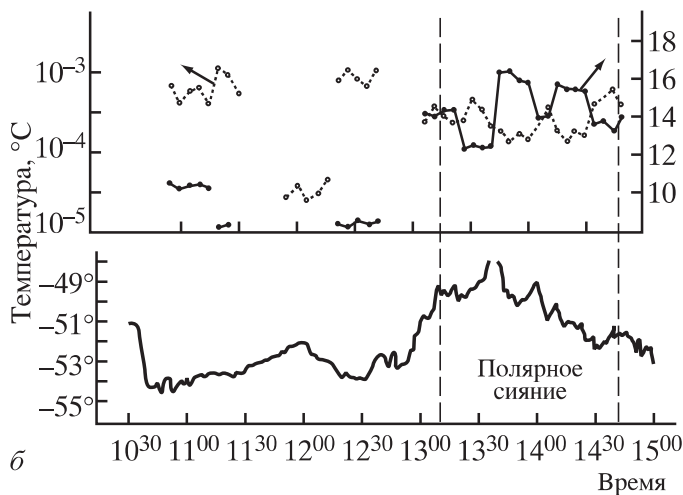
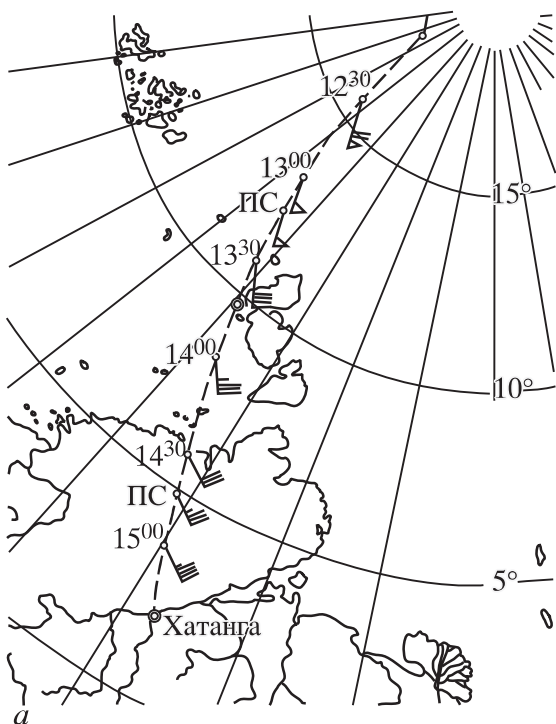
в сложной проблеме атмосферного электричества. Эта проблема связана с гелио-геомагнитной активностью, механизмами изменчивости погоды и климата, глобальной электрической цепью, магнитосферно-ионосферными электрическими токами и распространением электромагнитной и корпускулярной энергии в межпланетном пространстве. Важную, но не всегда учитываемую роль играют различного рода резонансные явления в геосферах и космосе. Астрономические осцилляторы (Солнце, планеты и их спутники), находящиеся в гравитационных и электромагнитных резонансах при взаимодействии с геодинамическими осцилляторами, определяют про-

*Первая фотография спрайта, сделанная 4 июля 1994 г. с самолета ВВС США. Видна тонкая структура разряда на высотах выше 60 км, яркое голубое свечение выше 20 км обусловлено релеевским (нерелеевским — аэрозолем) рассеянием атмосферы света от обычных молний.*

цессы в геосферах нашей планеты.

Фундаментальные научные достижения в области атмосферного электричества, полученные в нашей стране в последние десятилетия XX в., заставляют





Карта участка маршрута полета Ил-18 "Циклон" от Северного полюса в Хатангу. Показаны скорость и направление ветра на высоте 8000 м (а). Высотно-временной ход коэффициента обратного рассеяния (левая шкала) и высоты отражения лидарных импульсов (правая). Нижняя кривая – ход температуры воздуха на 8000 м. Период полярного сияния показан вертикальными пунктирными линиями (б).

ное значение для будущего прогресса рода людского. Одним из них является управление выпадением осадков... Энергия, необходимая для того, чтобы вызвать выпадение дождя, по сравнению с его потенциальной энергией, подобна искре, вызывающей взрыв заряда динамита. Если бы эта часть природного процесса сознательно регулировалась человеком, он мог бы преобразить весь земной шар. Для достижения этой цели предлагается немало проектов, ни один из которых, по моим сведениям, не дает ни малейшего шанса на успех. Но я убедился, что с соответствующим оборудованием это чудо осуществимо". Ученые уже решают задачу управления погодой и осадками.

В России готовится к запуску университетский спутник "Ломоносов" с аппаратурой для изучения электрических разрядов в ионосфере. Испытывается новая метеорологическая ракета "Мера", введена в строй летающая лаборатория на базе самолета Як-40 в дополнение к стратосферному самолету "Геофизика". Продуманный план действий, инициативы в международном научном сотрудничестве, участие и координация выполнения намеченной программы со стороны Президиума РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Росгидромета и других заинтересованных как государственных, так и частных организаций и структур должны обеспечить решение поставленных задач.

вспомнить работы выдающегося физика и инженера Николы Теслы. В 1919 г. он писал: "Мы пребываем накануне свершений, которые будут иметь колоссаль-