

ВКЛАД ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УЧЕНЫХ В ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

© 2005 г. Г. С. Иванов-Холодный, доктор физ.-мат. наук

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троицк, Московская обл.

Дан анализ достижений отечественных ученых в области гелиогеофизических исследований за период после первого (1957–1958 гг.) Международного геофизического года, опыт которого был учтен в организации и проведении комплекса работ в области солнечно-земной физики. Использование первых геофизических ракет, а затем и научных спутников в изучении ионосферы показало необходимость кардинальных усовершенствований теории образования ионосферы. Потребовалось заново построить эмпирические и теоретические модели спектров и потоков солнечного коротковолнового излучения от рентгеновского до ультрафиолетового диапазона. Для этого была создана модель верхней атмосферы Солнца, в которой особая роль принадлежит переходной области между хромосферой и короной.

Коды OCIS: 350.5400, 1000.10000, 010.1280.

Поступила в редакцию 11.03.2005.

Введение

В период работ по программе Международного геофизического года (МГГ) и Международного года спокойного Солнца (МГСС) группа международных научных союзов организовала и провела беспрецедентный по своему масштабу комплекс мониторингов многих солнечных и геофизических процессов. Активное участие в этих работах приняли и наши ученые. Благодаря значительным успехам в выявлении многочисленных признаков воздействия солнечной активности на геофизические процессы, после окончания МГГ и МГСС встал вопрос об усилении внимания к развитию солнечно-земной физики (СЗФ). Поэтому интересно проанализировать успехи и недочеты организации МГГ, с тем чтобы в преддверии обсуждения планов проведения нового МГГ можно было учесть опыт первого. Для обсуждения в целом этого большого и сложного вопроса необходимо участие многих специалистов.

В нашу задачу не входит рассмотрение общих организационных вопросов. Предполагается отразить те проблемы СЗФ, которые оказались тесно связанными с результатами конкретных исследований коротковолнового излучения Солнца, верхней атмосферы и теории образования ионосферы, в проведении которых принимал участие и автор. При этом одновременно будет отражен и вклад наших ученых в эти исследования.

Ионосфера

В планах проведения МГГ исследования ионосферы занимали значительное место. Была существенно расширена наземная сеть станций вертикального зондирования. Около 200 таких станций работали на всех континентах, из них 23 станции Советского Союза,

включающие две в Антарктике и две на дрейфующих станциях в Арктике. Одной из главных ставилась задача выяснения более точной закономерности вариаций (годовых, суточных, в зависимости от геомагнитных возмущений) ионосферы в различных пунктах земной поверхности, а также в зависимости от солнечной активности, что важно знать при составлении радиопрогнозов. Программа МГГ по ионосферным исследованиям включала наблюдения не только регулярных ионосферных слоев, но и спорадических слоев разного типа, неоднородных перемещающихся структур и ветров (а также дрейфов) в ионосфере. Большое внимание уделялось также измерениям различных эффектов ионосферного распространения радиоволн, в частности поглощения в ионосфере на различных радиотрассах, появления атмосфериков и атмосферных помех.

Основным центром исследований ионосферы в стране по программе и МГГ, и в период после МГГ был ИЗМИРАН, в котором исследования проводились под руководством Н.В. Пушкова, Н.П. Беньковой, Ю.В. Кушнеревского, Я.Л. Альперта, Я.И. Лихтера, М.Н. Фаткуллина, М.Г. Деминова, О.П. Коломийцева, Б.С. Шапиро, Н.В. Медниковой, Р.А. Зевакиной, Г.В. Васильева, М.Д. Флигеля и других. В Томске работами руководили В.Н. Кессених, А.И. Лихачев, А.Г. Колесник; в Иркутске – В.М. Поляков, В.Д. Кокоуров, Н.М. Ерофеев, Э.С. Казимировский; в Нижнем Новгороде – Б.Н. Гершман, В.В. Беликович, Е.А. Бенедиктов, В.Ю. Трахтенгерц; в Крыму – Н.А. Савич, Н.Н. Ерюшев, И.Н. Одинцова, А.С. Дворяшин, Ю.М. Нешпор; в Ростове – С.С. Чавдаров, Н.П. Данилкин, Ю.К. Часовитин; в Харькове – В.И. Таран; в МГУ – В.Д. Гусев; в Институте прикладной геофизики (ИПГ) – А.Д. Данилов, А.В. Михайлов и Ю.К. Калинин; в Санкт-Петербургском государственном университете – сотрудники лаборатории М.И. Пудовкина и кафедры Г.И. Макарова; в НИИ Арктики и

Антарктики – А.С. Беспрозванная, А.В. Широчков; в Ашхабаде – О.Г. Овезгельдыев, Н.М. Ерофеев, Л.П. Корсунова, Е.В. Дубровская, Е.В. Непомнящая. Хотя приведенный список центров и активных ученых-исследователей ионосферы, естественно, не полный, он показывает, что замечательные намерения и деловые подходы в программе МГГ, а главное, успешное осуществление программы исследования ионосферы вызвало по всей стране активное научное участие большой когорты выдающихся специалистов. Благодаря их плодотворной работе в течение нескольких лет было завершено научное осмысление основной массы полученных во время МГГ и МГСС данных и результатов, что привело к существенному совершенствованию всей ионосферной науки. Для того чтобы яснее представить достигнутые успехи на этом этапе, сравним их с состоянием экспериментальных и теоретических исследований до начала МГГ.

Начиная с тридцатых годов, почти единственным способом получения наблюдательной информации об ионосфере было использование метода вертикального радиозондирования, впервые примененного в 1925 г. Эпплтоном и Барнетом в Англии и Брайтом и Тьювом в США. Этим методом удавалось измерить и высоту, и электронную концентрацию в максимуме слоев. Было получено представление о различных характерных вариациях этих ионосферных параметров в течение суток и в течение года с изменением широты места и во время солнечных затмений, а также в зависимости от солнечной активности, геомагнитных возмущений и др. Исследования были проведены для трех основных слоев ионосферы: *E*, *F1* и *F2*. Поэтому в программе МГГ основной задачей при наблюдениях на станциях вертикального зондирования являлись определение и уточнение полученных морфологических закономерностей. Без дополнительной теоретической интерпретации полученные результаты этих наблюдений сами по себе не способны выявить механизмы и физические процессы, определяющие поведение ионосферы.

Из прежних теоретических исследований в первую очередь следует назвать теорию образования ионосферного слоя (“теорию простого слоя”) под действием солнечного монохроматического ионизирующего излучения, созданную С. Чепменом в 1930 году. В последующие годы, в основном плеядой английских теоретиков, были созданы теоретические модели распределения температуры и плотности газа по высоте в верхней атмосфере, теоретические представления о протекающих в ионосфере процессах взаимодействия положительных и отрицательных ионов между собой и с нейтральными частицами, которые позволяли дать объяснение наблюдаемым вариациям основных слоев ионосферы. Многие из этих исследований и их результаты со-

гласованы между собой, и вместе они давали цельное непротиворечивое представление о картине процессов в ионосфере и верхней атмосфере. Эти представления, по которым проходили учебу в университетах многие наши специалисты по ионосфере, получили международное признание и просуществовали до начала ракетных исследований.

После окончания МГГ ситуация с ионосферной наукой существенно изменилась. Однако радикальное изменение произошло не только и не столько благодаря проведенным исследованиям на сети ионосферных станций вертикального зондирования, которые, как отмечалось выше, позволяли лишь уточнять установленные ранее представления о вариациях ряда ионосферных параметров. В то же время другими методами исследования были обнаружены неожиданные новые свойства ионосферы, что коренным образом меняло ситуацию.

Незадолго до МГГ начались ракетные исследования верхней атмосферы и ионосферы, которые в 1961 г. дополнились измерениями со спутников. Благодаря этому впервые в результате прямых физических измерений, проведенных приборами непосредственно в ионосфере, были получены не предполагаемые (косвенные), а истинные параметры ионосферы и верхней атмосферы на различных высотах. В начале эти измерения осуществлялись не профессиональными специалистами по исследованию ионосферы, поэтому их реальное значение было понято не сразу. Оказалось, что полученные данные не просто расходились с имевшимися тогда представлениями об ионосфере, но и пришли в противоречие с принятой теорией по принципиальным вопросам. Нечего и говорить о том, что далеко не все специалисты по ионосфере и не сразу сумели по достоинству оценить эти результаты. Сомневающихся и закоренелых сторонников общепринятых тогда представлений сначала, естественно, было большинство, а результаты ракетных измерений они объявили недостоверными и ошибочными. Наиболее решительные представители из числа уверенных в правильности ракетных данных, свидетельствовавших о кризисе существовавших тогда теорий, призывали разрабатывать теорию заново. Особое положение занимали сибиряки: ионосферные школы В.Н. Кессениха и А.И. Лихачева (Томск) и В.М. Полякова (Иркутск). Они не просто призывали, но почти сразу приступили к разработке новой теории. Более подробно о результатах наиболее трудных первых шагов на этом пути и пойдет речь далее.

Один из первых неожиданных результатов, полученных на ракетах, касался просто распределения концентрации электронов с высотой. Оказалось, что вместо отчетливо выраженных трех чепменовских слоев обычно наблюдался почти непрерывный рост

концентрации от слоя E , расположенного на высоте около 100 км, до высоты максимума слоя F . В области высот, на которых происходило появление слоя F_1 , иногда наблюдалось лишь изменение градиента роста концентрации электронов. Эти результаты были получены в ракетных экспериментах в Институте космических исследований РАН под руководством К.И. Грингауза.

Еще один неожиданный результат относился к определению ионного состава. Оказалось, что отрицательных ионов в основной части ионосферы нет, они наблюдаются только на малых высотах, в слое D . На высотах 100–200 км молекулярных ионов обнаружено больше, чем атомных, и среди них неожиданно наиболее обильным оказался ион NO^+ , несмотря на низкую концентрацию NO в атмосфере. Эти результаты были получены при масс-спектрометрических измерениях в ракетных экспериментах в ИПГ под руководством В.Г. Истомина.

Указанные два экспериментальных факта определенно свидетельствовали о необходимости пересмотра как теории образования первичных ионов, так и теории преобразования их во вторичные ионы, т. е. целиком всего механизма ионообразования в ионосфере. Следует особо подчеркнуть отличие данных ракетных измерений, относящихся к непосредственным физическим свойствам среды, от данных ионосферного зондирования, дающих лишь косвенную информацию о таких свойствах. Выходило, что результаты, полученные в период МГГ при радиозондировании, только подтверждали выводы существовавшей теории, а результаты прямых ракетных измерений им явно противоречили. Стоит особо подчеркнуть, что это расхождение – знаменательное, так как оно обусловлено не столько различием природы полученных данных, сколько различием характера двух противоположных подходов: одного, относящегося к солнечно-земным связям (СЗС), а другого – к СЗФ.

Следует отметить, что при разработке новой теории, адаптированной к учету новых данных, полученных в ракетных измерениях, в том числе и данных о ионном составе на разных высотах, пришлось решить одновременно целый комплекс задач: построить новую модель верхней атмосферы, заново рассчитать как величину и распределение с высотой скорости ионообразования под действием солнечного ионизирующего излучения, так и кинетику нейтрализации электронно-ионного газа в ионосфере. Однако наиболее существенным элементом при построении новой теории образования слоя F явился учет действия процесса диффузии электронно-ионного газа. Для характеристики значимости выбранного пути достаточно кратко рассмотреть постановку вопроса и полученные решения по упомянутым выше задачам.

Большим сюрпризом, связанным с анализом результатов ракетных измерений о распределении плотности атмосферы с высотой и поглощения в ней ионизирующего излучения Солнца, было то, что основной максимум скорости образования первичных ионов приходился на высоты $h \approx 200$ км, а не на высоту максимума слоя F . Это противоречило следствиям общепринятой теории образования простого слоя. Возник серьезный вопрос о необходимости развития совершенно новой теории образования максимума в слое F . Именно на решение этой задачи и направил в первую очередь В.М. Поляков свои усилия и усилия своих учеников [1, 2]. В результате была создана диффузионная теория образования слоя F . Аналогичные разработки развивались и за рубежом [3].

Согласно вновь развитой теории получили, наконец, объяснение давно установленные своеобразные изменения слоя F в течение дня, в течение года и с широтой, которые не соответствовали выводам теории простого слоя и поэтому были названы “аномальными” [3]. Такое название не решало задачи, а только отодвигало ее решение на неопределенное будущее. Новая же теория В.М. Полякова и его сотрудников разрешила эту старую проблему. Оставались нерешенными многие другие проблемы, но в переломный момент был сделан первый шаг, оказавшийся успешным, и он определил дальнейшее значительное развитие работ в нужном направлении. Полученных на первом этапе результатов было достаточно для написания в 1966 г. В.М. Поляковым докторской диссертации [1]. А спустя два года вышла в свет книга [2] с более развернутым изложением всех проделанных руководителем и его соратниками работ.

Умение мобилизовать необходимые силы на решение новых, трудных, но актуальных задач характеризует В.М. Полякова как выдающегося стратега и организатора развернутых исследований на новом неизведанном научном направлении. Несомненные достижения и успехи проделанной на этом пути работы, потребовавшей огромного труда, свидетельствуют об исключительных способностях В.М. Полякова как крупного ученого. Надо было суметь в условиях неприятия многими необычных результатов ракетных измерений правильно отнестись к этим новым результатам, увидеть в них прогрессивные и перспективные элементы для создания новых представлений об ионосферных процессах. Сейчас мы видим, что был выбран правильный путь.

Коротковолновое излучение Солнца

А.В. Яковлева (ГОИ им. С.И. Вавилова) первая у нас в стране получила в ракетном пуске ультрафиолетовый спектр солнечного излучения [4]. В последующих экспериментах на ИСЗ, начатых группой С.Л. Ман-

дельштама (ФИАН), а затем и группой академика А.А. Лебедева (А.И. Ефремов, А.М. Тютиков, М.М. Мирошников, Б.А. Ермаков (ГОИ)), неоднократно регистрировались спектры Солнца в рентгеновском диапазоне и потоки в линии L_{α} водорода. Одновременно изображения Солнца и солнечной короны в коротковолновой области спектра получены с помощью аппаратуры ФИАН, разработанной под руководством И.А. Житника. Все эти результаты оказали плодотворное влияние на развитие физики солнечной атмосферы и учитывались при разработке моделей спектра солнечного коротковолнового излучения [3].

В программе работ МГГ заранее не планировались исследования ионизирующего солнечного излучения, они стали возможны благодаря развитию ракетных исследований.

Хотелось бы в дополнение к сказанному выше отметить проявленные В.М. Поляковым внимание и поддержку одновременно со своими работами по моделированию ионосферных процессов и наших работ в ИПГ по ракетным исследованиям солнечного коротковолнового излучения, вызывающего ионизацию верхней атмосферы. В этих работах активное участие принимали сотрудники нашей лаборатории Т.В. Казачевская, В.В. Катюшина, А.А. Нусинов. В то время особенно важно было определить главные задачи исследований.

Дело в том, что по ракетным измерениям, в которых принимала участие и наша лаборатория, было обнаружено, что коротковолновое излучение Солнца отнюдь не монохроматично (как принималось в теории простого слоя), а занимает широкую спектральную область от 1000 Å до рентгеновского диапазона. Поэтому оно образует в ионосфере не отдельные слои, а обширную область ионизации, простирающуюся от области D до области F с максимумом на высотах $h \approx 200$ км. Кроме того, измеренный поток ионизирующего излучения был почти на два порядка выше, чем тогда принималось в теории ионизации ионосферы.

При интерпретации этого экспериментального результата возникла проблема объяснения его происхождения процессами на Солнце. Известные по оптическим наблюдениям корона и хромосфера не позволяли объяснить ни наблюдаемые величины потока энергии, ни, главное, спектр излучения. Основываясь на результатах своих исследований солнечной атмосферы, мы с Г.М. Никольским [3] выдвинули гипотезу о существовании определенной переходной области между короной и хромосферой, которая не проявляет себя в видимых лучах, но дает мощное коротковолновое излучение, содержащее в спектре линии излучения ионов с промежуточной температурой ионизации, лежащей между температурами хромосферы и короны. Нами была построена модель переходной области, подтвердившая спра-

ведливость выдвинутой гипотезы. Кроме того, построенная модель позволяла на основе выясненных физических механизмов ставить вопрос о возможности разработки прогноза изменений потока и спектра излучения с изменением солнечной активности. Предстоит усовершенствовать методику составления такого прогноза. В сочетании с моделью ионосферы (построенной, например, В.М. Поляковым с соавторами) это позволяет осуществлять прогнозирование изменений состояния ионосферы в зависимости от солнечной активности.

Переход от морфологии солнечно-земных связей к солнечно-земной физике

Среди общих проблем отметим, что возникает желание понять, например, причины и условия провозглашения после МГГ и МГСС нового раздела науки – СЗФ. Напомним, что в программе работ МГГ и МГСС был намечен ряд мониторингов, направленных на проведение морфологических исследований и нацеленных в первую очередь на установление и изучение корреляционных связей.

Делали это в угоду господствовавшей тогда во многом описательной науки СЗС. Главным для нее было получить ряды наблюдений, провести статистическое сопоставление между собой различных рядов и выявить имеющиеся между ними статистические связи. Поэтому управляющий и координирующий орган в период МГГ назывался STR-комиссией (Solar-Terrestrial Relationships).

По итогам МГГ и МГСС (см. предисловие и циркулярное письмо Г. Фридмана [7]) выяснилось, что мониторинг не решает всей проблемы, так как описывает только “синоптику” и морфологию и не дает понимания физических процессов, действующих в верхней атмосфере и межпланетном пространстве. Но все сказано очень осторожно.

Однако суть дела более ясно и определенно была выражена в самом факте смены имени координационной комиссии: с STR на STP (Solar-Terrestrial Physics).

Трудно себе представить, что название СЗФ придумано случайно, что не имелось в виду нацелить исследования на выяснение физических процессов и механизмов.

Наверное, поэтому 15 ноября 1967 г., т. е. после МГГ и МГСС и накануне планирования работ на предстоящий период 1968–1970 гг. – “Международный год активного Солнца” (МГАС, или IASY), Международным комитетом научных союзов было решено преобразовать существовавшую Координационную комиссию по солнечно-земным связям в Комиссию по солнечно-земной физике. Тем самым

изменялась суть дела. Ранее планировалось проведение лишь мониторинга, позволяющего решать только задачи набора и описания первичных данных наблюдений. Теперь приобретал больший вес такой анализ данных, который поднимался до уровня выяснения также причин и механизмов, регулирующих изучаемые процессы, что возможно осуществить только при использовании точной физической науки. Поэтому важно понять, благодаря чему произошло вышеупомянутое преобразование комиссий STR в STP и было ли вызвано это преобразование какими-либо особенностями проведения МГТ и МГСС, которые обусловили несколько неожиданное появление науки СЗФ, поскольку заранее, в период планирования МГТ, оно не предполагалось. Тем более что почти аналогичный случай произошел с физической теорией образования ионосферы, возникшей после МГТ на месте прежней общей теории, в которой физические основы были недостаточно обоснованы экспериментально. В настоящее время полезно понять причины таких преобразований, с тем чтобы учитывать их при рассмотрении новых планов.

В связи с образованием новой науки – СЗФ, наследницы старой СЗС, могут возникнуть различные вопросы. С какой целью и для чего сделан переход? Чем по существу было вызвано преобразование, и означает ли оно смену не только названия и подхода, но и методики исследования и целей? Последний вопрос вызван тем, что многие продолжают по сути ту же линию, что была и раньше, но формально под другим именем. А физики-то у них как не было, так и нет! Действительно, название СЗФ было дано лишь по факту перехода на физические исследования в отдельных случаях (например, в теории образования ионосферы), а не повсеместно. Поэтому такой акт изменения названия может служить общим призывом к переходу на физику и в других возможных случаях. Но одного призыва, как оказалось, недостаточно. Наш обзор ситуации и призван к тому, чтобы попытаться понять, что мешает или чего не хватает для перехода к физике в тех случаях, когда желание у исследователей уже есть или возникло, а каких-то условий нет.

В связи с этим попробуем более внимательно оценить возникшую после МГТ ситуацию с ионосферой. Важным было появление и успешное развитие измерений при вертикальных запусках ракет, а в дальнейшем и на спутниках. Переломным оказалось получение в ракетных измерениях комплекса физических параметров ионосферной среды вместо ограниченных и косвенных, получаемых при ионосферном радиозондировании. Вопрос расхождения между измеренными параметрами и данными, следующими исходя из существующей теории,

был успешно решен путем развития новой теории, объяснившей результаты ракетных и спутниковых измерений [3, 5, 6]. Хорошо, что решение теоретических проблем оказалось подготовленным в ряде предварительных работ и нашлись талантливые теоретики, способные построить новую теорию.

Как следует из вышеизложенного, сходная ситуация произошла с интерпретацией новых данных о потоке и спектре коротковолнового излучения Солнца. Эти данные значительно отличались от того, что давали существовавшие теории, но, к счастью, вскоре была построена новая теория переходной области в атмосфере Солнца, расположенной между хромосферой и короной, в частности, объясняющая и новые результаты измерений [3].

Аналогичная картина наблюдалась и в ряде других направлений СЗФ. Например, история неожиданного открытия с помощью спутников радиационных поясов Земли и последующего объяснения их особенностей и происхождения имеет схожие черты (см. работы наших ученых С.Н. Вернова, Б.А. Тверского, В.П. Шабанского [8]). Наряду с этим можно указать на существование многих процессов СЗФ, которые пока ждут своего физического объяснения.

Большой вклад внесен отечественными учеными также и в оптику верхней атмосферы. Основные результаты этих работ, включая исследования советских космонавтов, изложены в предисловии выпускающего редактора этого выпуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков В.М. Динамическая модель области F ионосферы. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Иркутск, 1966.
2. Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968.
3. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. М.: Наука, Физматгиз, 1969. G.S. Ivanov-Kholodny, G.M. Nicolskii. Sun and the ionosphere: short-wave solar radiation and its effect on the ionosphere. Jerusalem, Israel, 1972. 366 p.
4. Яковлева А.В., Ведешин Л.А. Первые исследования коротковолнового излучения Солнца // Вестник АН СССР. 1978. № 2. С. 105–113.
5. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 190 с.
6. Данилов А.Д., Власов М.Н. Фотохимия ионизированных и возбужденных частиц в нижней ионосфере, Л.: Гидрометеиздат. 1973. 190 с.
7. STP NOTES. 1967. № 1.
8. Вернов С.Н., Вакулов П.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И. Радиационные пояса Земли и космические лучи. М.: Просвещение, 1970. 128 с.