

Радиационные пояса Земли: открытие и первые исследования

Ю.И.Логачев

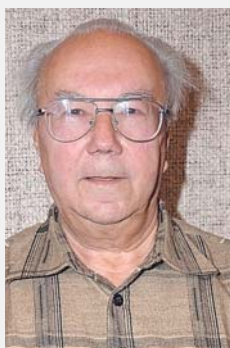
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Неожиданное открытие радиационных поясов Земли, кроме некоторой растерянности ученых, вызвало шквал объясняющих гипотез и анализ уже существовавших представлений о движении заряженных частиц в магнитных полях. Возникли попытки связать новое явление с давно известными полярными сияниями, магнитными бурями и солнечными частицами. Такой натиск не мог не привести к нахождению истины (захваченные магнитным полем Земли частицы действительно связаны с перечисленными явлениями), и буквально через месяц природа нового явления прояснилась. Кто внес основной вклад в разгадку тайны феномена и почему, к некоторому неудобству, открытию присвоили имя только одного участника эпопеи?

Ключевые слова: «Спутник-1», «Спутник-2», внешний и внутренний радиационные пояса Земли.

Нет сомнения, что созданные в войну 1939–1945 гг. ракеты рано или поздно полетели бы в космос. Начало этому положил «Спутник-1», запущенный в СССР 60 лет назад. Через месяц вывели на орбиту «Спутник-2», потом в дело вступили США («Explorer-1 и -3», а также «Vanguard-1»), затем были «Спутник-3», «Explorer-4», а впоследствии и многие другие. К настоящему времени в космосе побывало более 10 тыс. различных аппаратов — научных, военных и прикладных.

Про первый спутник написано немало, но гораздо менее известны следующие пять, результаты которых принесли важное открытие: были обнаружены радиационные пояса Земли. Неожиданно оказалось, что за пределами своей атмосферы Земля, находящаяся, как ожидалось, в совершенно пустом космическом пространстве, окружена интенсивными потоками заряженных частиц, которые захвачены магнитным полем планеты. Эти пояса радиации имеют сложную пространственную структуру и испытывают сильные вариации, связанные с активностью Солнца. К настоящему времени радиационные пояса хорошо изучены, понята физика явления, найдены источники частиц (это космические лучи; частицы, ускоренные во время вспышек на Солнце; частицы из ионосферы и атмосферы Земли), определена их важность и связанные с ними опасности для человечества. Пояса радиации исследовались многими различными аппаратами, в том числе и для реше-



Юрий Иванович Логачев, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Участник исследований радиации в космосе начиная с первых полетов искусственных спутников Земли, соавтор открытия внешнего радиационного пояса Земли.

ния прикладных задач, без которых мы уже не можем обойтись. Достаточно перечислить телеретрансляторы на геостационарной орбите, навигационные системы (GPS и Глонасс), метеоспутники, аппараты для поисков полезных ископаемых из космоса. Важная задача — обеспечение радиационной безопасности космических полетов, в частности при планировании освоения Луны и полетов человека на Марс.

Календарь первых космических событий

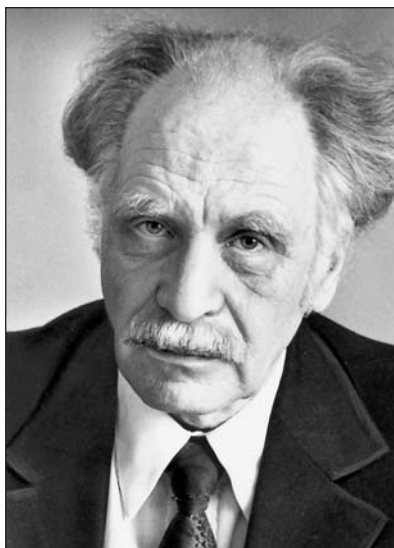
О том, что Земля постоянно облучается заряженными частицами высокой энергии — космическими лучами, ученые узнали в 1912 г. После открытия будущего нобелевского лауреата В.Гесса исследователи все время стремились забраться повыше — поближе к их возможному источнику. В 30-е годы для изучения космических лучей в стратосферу запускались аэростаты, шары-зонды, а сразу после окончания войны — ракеты (сначала немецкие

ФАУ, затем США и СССР стали делать свои ракеты). Интерес представляли не только космические лучи: для измерения ультрафиолетового излучения Солнца тоже нужно уйти выше слоя озона, эффективного УФ-поглотителя. Магнитное поле Земли и ионосфера также требовали измерений на больших высотах. Уже в 50-е годы идея создания искусственных спутников активно обсуждалась научным сообществом, особенно в связи с намечавшимися исследованиями в Международном геофизическом году (МГГ, 1957–1958).

В СССР подготовка экспериментов на спутниках началась в середине 1956 г. На совещании в Академии наук СССР ведущие специалисты по физике верхней атмосферы Земли, магнитного поля, ионосферы и космических лучей получили задание подготовить предложения-проекты экспериментов на искусственных спутниках Земли. Собранные заявки охватывали широкий спектр исследований от атмосферы до микрометеоров (и космической радиации в том числе), причем предполагалось все измерения проводить на одном аппарате. У каждого эксперимента были свои требования, и столь большой набор приборов нуждался в длительной подготовке спутника. Забегая чуть вперед, скажем, что запуск такого спутника (он оказался уже третьим) состоялся лишь 15 мая 1958 г.

Между тем было известно, что США также готовят к полету космический аппарат. В ситуации жесткой конкуренции возникло естественное желание быть первыми. Успешный запуск баллистической ракеты в СССР в августе 1957 г. подтолкнул руководителей спутниковой программы не дожидаться готовности основного научного аппарата, а запустить более простой, лишь бы обогнать США. Цель, как все знают, была достигнута, первым спутником в космосе стал советский.

На борту следующего, «Спутника-2», вышедшего на орбиту через месяц после «Спутника-1» (3 ноября 1957 г.), кроме научной аппаратуры находилась собака по имени Лайка. Она была гвоздем проекта, весь полет задумывался для ответа на вопрос: смогут ли летать в космос люди? Но была и научная программа, которая включала изучение ультрафиолетового излучения Солнца (под руководством С.Л.Мандельштама) и космических лучей (экспериментом руководил С.Н.Вернов). Хотя запуск «Спутника-2» был приурочен к 40-летию Великой Октябрьской революции, его работа освещалась менее шумно, а результаты были опубликованы только в научных журналах, причем значительно позднее.



С.Н.Вернов (1910–1982).



Дж.Ван Аллен (1914–2006).

Следующими успешными, как теперь говорят, миссиями, стали аппараты США «Explorer-1 и -3», запущенные 31 января и 26 марта 1958 г. с приборами для изучения космических лучей (научный руководитель эксперимента Дж.Ван Аллен). 15 мая наконец стартовал наш «Спутник-3» с большим набором измерительной аппаратуры. Полеты перечисленных спутников не только положили начало научным исследованиям космоса, но и помогли сделать важное геофизическое открытие — обнаружить радиационные пояса Земли.

Результаты полетов спутников «Explorer-1, -3» были представлены общественности 1 мая 1958 г. на заседании Академии наук США. В период с мая по август 1958 г. новое явление бурно обсуждалось, чему способствовала проводившаяся в Москве 29 июля — 9 августа V Генеральная ассамблея Международного геофизического союза, посвященная итогам МГГ. Доклады и обсуждения результатов полетов «Explorer-1, -3» и «Спутника-3» помогли выяснить в общих чертах картину захваченных магнитным полем Земли энергичных заряженных частиц, обсудить их источники. Эксперименты «Спутника-3» показали, что повышенная радиация характерна для двух четко разделенных областей: экваториальной и приполярной, названных впоследствии внутренним и внешним радиационными поясами. Радиация в экваториальной области, по данным «Спутника-3», состоит главным образом из протонов с энергией 100 МэВ (приборы американских спутников «Explorer-1, -3» не могли идентифицировать природу частиц), приполярные районы заполнены в основном электронами с энергией 100 кэВ (спутники «Explorer-1, -3» на эти широты не залетали, наклон их орбит был не очень большим, рис.1).

В период заседания Ассамблеи МГГ научный лексикон обогатился новыми понятиями: захва-

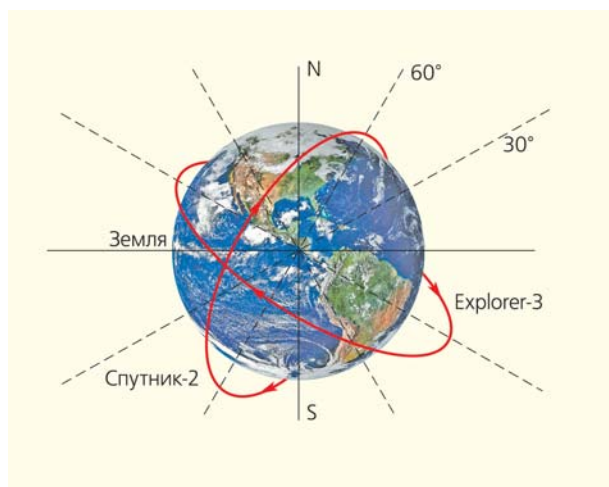


Рис.1. Орбиты двух спутников Земли — советского и американского. Наклон плоскости орбиты «Спутника-2» к плоскости экватора Земли — 65°, спутника «Explorer-3» — 33°. Перигеи орбит находятся на широтах места запуска, апогеи — в противоположном полушарии. Масштабы орбит и Земли почти соблюдены.

ченные магнитным полем заряженные частицы, нейтроны альbedo космических лучей, проникновение солнечных частиц в магнитное поле Земли и их захват; именно тогда был введен общепринятый ныне термин «радиационные пояса Земли». И это несмотря на то, что ученым еще не были известны данные следующего американского спутника «Explorer-4» (запущенного 26 июля 1958 г.), который был укомплектован более широким набором аппаратуры по сравнению с предыдущими. Впереди было и очень важное событие — создание искусственных поясов радиации в магнитном поле Земли с помощью атомного взрыва небольшой мощности (американский эксперимент «Argus» в августе 1958 г.).

Первые полеты — первые неожиданности

При подготовке наших экспериментов на спутниках сроки были сжатыми, дело новым, а ракетчики выдавали очень жесткие лимиты на вес, габариты и энергопотребление приборов. В этих условиях, естественно, нам пришлось ограничиться простейшими устройствами, способными регистрировать заряженные частицы: детекторами служили газоразрядные счетчики; электроника в то время уже появилась более легкая — полупроводниковая. На первых спутниках США были практически такие же приборы. Особенность газоразрядных счетчиков (счетчиков Гейгера) состоит в том, что они не различают вид частиц (их заряд или массу), вызвавших разряд, а регистрируют только факт попадания частицы в счетчик, делая это непрерывно и сообщая исследователям число

разрядов в единицу времени. «Мертвое время» счетчиков, пока идет разряд, составляет десятки микросекунд, так что счетчик может надежно считать до 10^4 частиц/с.

Значительная разница в экспериментах Вернова и Ван Аллена состояла в траекториях запущенных спутников и, соответственно, в обследованных областях пространства. Прибор Вернова был установлен на «Спутнике-2» с наклоном орбиты к земному экватору около 65°, тогда как американские «Explorer-1, -3» имели около 33° (рис.1). Информация с советского аппарата передавалась каждый день с трех витков, проходящих над территорией СССР. «Спутник-2» совершал каждый день 14 оборотов вокруг Земли, период обращения составлял 103 мин, на каждом витке аппарат смещался по долготе на 26°, так что витки покрывали всю поверхность Земли. Передатчики на «наших» витках работали непрерывно, но их сигнал регистрировался советскими приемными станциями, расположенными только в пределах границ страны, а поскольку запоминающих устройств на спутнике не было, данные с остальной, большей, части витков были нам недоступны. На остальных 11 витках спутник молчал.

Как потом стало ясно, это несовершенство эксперимента лишило нас очень важной информации, фактически приоритета обнаружения повышенной радиации на больших высотах над значительной частью поверхности Земли.

На «Спутнике-2» было установлено два идентичных прибора, которые показывали практически одинаковые результаты, согласующиеся с имеющимися представлениями о потоках космических лучей на различных широтах и высотах до 300–600 км. Было ощущение полного восторга: все отлично работает и дает ожидаемый результат. Но 7 ноября 1957 г. на одном из витков были зарегистрированы флуктуационные возрастания скоростей счета приборов (рис.2). Участок повышен-

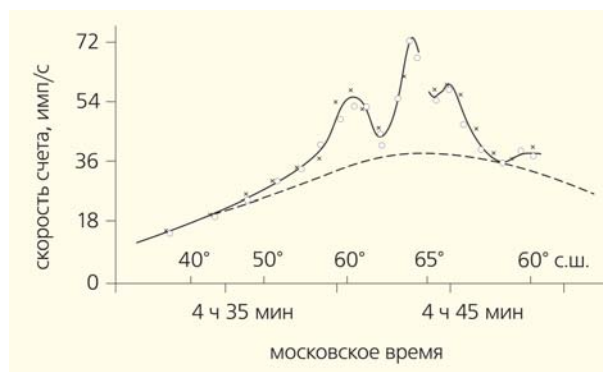
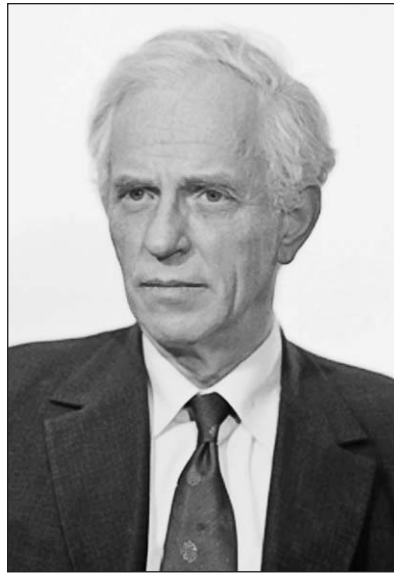


Рис.2. Данные «Спутника-2». Интенсивность космической радиации на одном из витков при пролете над северными районами СССР 7 ноября 1957 г. Как теперь ясно, это был сброс частиц из внешнего радиационного пояса во время слабого магнитного возмущения.

ного счета продолжался 13 мин и приходился на высокие геомагнитные широты (в районе перигея орбиты спутника, на высоте до 300 км). Мы пообсуждали различные, вплоть до фантастических, источники зарегистрированной повышенной радиации и остановились на протонах от слабой солнечной вспышки. Но в первой публикации результатов полета «Спутника-2» [1] даже этого сказано не было, упоминался только сам факт: надежно зарегистрировано 50%-е возрастание скорости счета приборов на одном из витков полета спутника на высоких широтах. То, что в статье не обсуждалось обнаруженный эффект, можно объяснить узкой целенаправленностью наших устремлений: все, что в стороне от главного направления — изучения космических лучей, — откладывалось на потом... Все были перегружены «неотложными» проблемами, и мелкие неожиданности отвлекали внимание. Поэтому мы и ограничились вариантом солнечных космических лучей, которые в принципе могут проникнуть на высокие широты, особенно при возмущенном магнитном поле. О возможностях ускорения частиц в магнитосфере Земли серьезно не говорили, а о сбросе захваченных частиц даже не упоминали. Обнаруженное возрастание потока было небольшим, длилось недолго. Сильных вспышек в это время не наблюдалось, поэтому решили, что оно вызвано небольшой вспышкой на Солнце, о наличии которых к тому времени было уже хорошо известно.

Приборы Ван Аллена сразу после запуска оказались в экваториальных областях повышенной радиации, скорость счета частиц быстро нарастала и даже попадала в режим перегрузки, приборы зашкаливали, счетчики переставали работать. Ван Аллен с коллегами правильно интерпретировали ситуацию и зафиксировали наличие потоков радиации в экваториальных районах Земли на высотах, больших 500 км. О его докладе 1 мая 1958 г. [2] мы тогда не знали, в СССР эти результаты на первых порах стали известны только по краткой публикации в «Scientific American» (май 1958 г.); более подробные сведения приведены в работах [3–5]. В этих сообщениях, как и в советских, нет никакого упоминания о частицах, захваченных магнитным полем Земли. Авторы предполагали: зарегистрированные ими частицы имеют авроральное происхождение, проникая каким-то образом от высоких широт в экваториальную область.

Ошибочная интерпретация авторами первых измерений энергичных заряженных частиц на спутниках говорит о том, что обе группы, совет-



А.Е.Чудаков (1921–2001).

ская и американская, были не готовы к восприятию обнаруженного нового явления. Однако результаты, доложенные Ван Алленом, всколыхнули научную общественность, начались бурные обсуждения в различных научных коллективах, в основном на Западе (в Советский Союз в те времена информация, даже чисто научная, просачивалась с трудом). Результаты же полета «Спутника-2» стали известны специалистам только в июне 1958 г. (когда вышла статья [2]), да и то в основном русскоязычным читателям. Такое катастрофическое отставание в популяризации своих достижений было характерно для советского периода, оно объясняется рядом причин, среди которых секретность стоит не на последнем месте.

Важный этап в понимании нового явления приходится на май 1958 г., когда был запущен наш «Спутник-3». На нем установили более информативный по сравнению с предыдущим прибор для изучения радиации в космосе. Необходимость такой модификации осознал А.Е.Чудаков. Он усомнился, что зарегистрированное на «Спутнике-2» возрастание обусловлено протонами. Счетчик там находился под алюминиевым кожухом и обложкой аппарата общей толщиной $\approx 2\text{--}3$ г/см², и до него, по идее, могли добраться лишь протоны с энергией $>30\text{--}50$ МэВ. Для солнечных событий небольшой мощности такие протоны маловероятны, а электроны не очень больших энергий (≤ 1 МэВ) тоже тормозятся, не достигают счетчика. Их тормозное излучение счетчиком хотя и регистрируется, но с очень малой эффективностью. Получается, что мы засекали космические лучи (энергичные протоны) и небольшое добавочное число тормозных квантов от значительного потока электронов с энергией <1 МэВ.

Чтобы проверить эту гипотезу, для уже почти готового научного аппарата был срочно подготовлен минимально экранированный сцинтилляционный счетчик (кристалл NaJ(Tl) размером 40×40 мм), место для которого выкроили снаружи спутника. Так как этот счетчик был установлен «вдогонку», в уже скомпонованную конструкцию, информацию о потоках частиц с него пришлось транслировать через сигнальный радиопередатчик «Маяк», который на первых спутниках передавал только «бип-бип-бип». В полете «Спутника-3» модулированный радиосигнал «Маяка» уже нес полезную информацию нашего прибора. Регистрировались скорости счета энерговыделений в кристалле счетчика, больших 35 кэВ, и полная ионизация в кристалле фотоумножителя сцин-

тилляционного счетчика позволяла оценивать среднюю ионизацию частиц в кристалле, т.е. в какой-то степени судить о природе детектируемых частиц. Отметим, что на всех первых американских спутниках («Explorer-1, -3, -4») определение природы частиц не проводилось.

Сигнал «Маяка» мог приниматься по всему земному шару — как в полярных широтах, так и в экваториальных районах — простейшими, даже радиоловительскими, станциями. Обработка записей нескольких приемников, расположенных в разных точках планеты, позволила установить, что повышенная радиация наблюдается в двух различных областях: экваториальной и высокоширотной зонах. Кроме того, оказалось, что выделенные зоны сильно различаются не только по расположению в пространстве, но и по составу частиц. Экваториальная зона занимает интервал в пределах меньше 45° северной и южной широты и заполнена в основном протонами со средней энергией около 100 МэВ, тогда как приполярная располагается выше 45° северной и южной геомагнитной широты и содержит электроны с энергией около 100 кэВ. Позднее, как уже упоминалось, эти зоны назвали внутренним и внешним радиационными поясами Земли.

Дальнейшее изучение внутреннего и внешнего поясов показало их существенное различие, разную природу, пространственные и временные характеристики. Самое важное отличие — стабильность структуры поясов и их источников. Частицы внутреннего пояса — протоны, их источник стабилен: это космические лучи; источники электронов внешнего пояса разнообразны, чаще всего это ускоренные частицы в самой магнитосфере, во время магнитных бурь, связанных с солнечной и геомагнитной активностью [6–8].

Проведенные исследования и их обсуждение на различных собраниях ученых подкреплялись новыми экспериментами в космосе. Результаты спутника «Explorer-4», траектория которого уже частично захватывала внешний радиационный пояс (наклон плоскости орбиты у экватора составлял 51°), подтвердили существование двух зон повышенной радиации, разделенных небольшой щелью [9].

Следующий важный этап в понимании природы обнаруженной радиации — эксперимент «Argus». Для заполнения ловушки частицами использовался ядерный взрыв в верхних слоях атмосферы Земли. Возникший тонкий пояс захваченных частиц существовал несколько недель — его регистрировал «Explorer-4». Операцию «Argus» можно рассматривать как заключительный эксперимент, проявивший в общих чертах феномен существования захваченной радиации в магнитосфере Земли. Последующие эксперименты и теоретические исследования были нацелены на детальное изучение радиационных поясов, о чем имеется обширная литература, например [10–13].

От гипотез к осмыслению нового явления

Процесс понимания новых результатов, полученных на первых спутниках, любопытен сам по себе и важен для осмысленной расстановки акцентов в приоритетах открытия радиационных поясов.

В последние перед открытием радиационных поясов годы ученые уже понимали, что полярное (а иногда и более южное) свечение ночного неба вызвано заряженными частицами, возбуждающими атомы атмосферы Земли. Естественно, подозрение пало на Солнце, так как приход частиц от него к тому времени был уже установлен. Чтобы проследить траекторию движения солнечных частиц в магнитном поле Земли, проводились многочисленные расчеты.

Норвежский ученый К.Стёрмер вычислял траектории входящих в магнитное поле Земли солнечных и космических лучей [14]. Он обнаружил, что в земном поле возможны замкнутые траектории, но не обратил на них внимания, поскольку расчеты запрещали заряженным частицам попадать в область этих траекторий извне. Возможный источник — нейтроны — не рассматривался, хотя нейтроны могли свободно залетать в найденные каверны и, распадаясь там на протоны и электроны, заполнять их. Помимо космических лучей Стёрмер занимался и проблемами геофизики, в его работах говорится о магнитном отражении заряженных частиц, приходящих от Солнца, и о существовании периодических траекторий в магнитном поле Земли. Это не совсем то, что рисуют сейчас, иллюстрируя движение частиц внутри каверны с отражением их на севере и юге (рис.3), но в обсуждениях на V Ассамблее МГТ книга Стёрмера [15] и его численные результаты были упомянуты много раз, и концепция устойчивого захвата обсуждалась, может быть, впервые на международной конференции. Сегодняшний просмотр работ Стёрмера показывает, что он многое подготовил для правильного понимания геомагнитных явлений.

Предположения о стабильном захвате частиц в магнитном поле Земли было также выдвинуто Н.Кристофилом еще в 1957 г., но соответствующие работы не публиковались до 1959 г. [16, 17], по-видимому, из-за секретности — в связи с подготовкой проекта «Argus», инициатором которого он был. До этого проекта Кристофилос работал с установками для получения управляемых термоядерных реакций и распространил идею удержания частиц в магнитных ловушках лабораторных размеров на масштабы Земли. Он предположил, что магнитное поле Земли способно захватывать и удерживать энергичные частицы и что ядерный взрыв может служить приемлемым источником для заполнения геомагнитной ловушки частицами. И действительно, «Explorer-4» зарегистрировал пояса частиц, образованных в результате каждого из трех взрывов операции «Argus». Наиболее



К.Стёрмер (1874–1957).



Н.Кристофилос (1916–1972).



Ф.Сингер (р.1924).

интересным результатом этих взрывов было появление частиц на магнитной оболочке с $L = 2$ (L — расстояние магнитной оболочки от центра Земли в экваториальной плоскости, выраженное в радиусах Земли), сохранявшейся устойчивой в течение нескольких недель. Искусственные пояса имели поперечные размеры около 100 км, они не дрейфовали по радиусу, расширение их было незначительным (рис.4). Результаты операции «Argus»

опубликованы в августе 1959 г. [17] и в более поздней книге Кристофилоса [18].

В 1957 г. Ф.Сингер (США) для объяснения магнитных бурь предположил, что главная фаза бури обусловлена долготным дрейфом частиц, захваченных магнитным полем Земли [19]. Эта идея уже содержала некоторые представления, которыми сейчас описываются основные явления в радиационных поясах Земли.

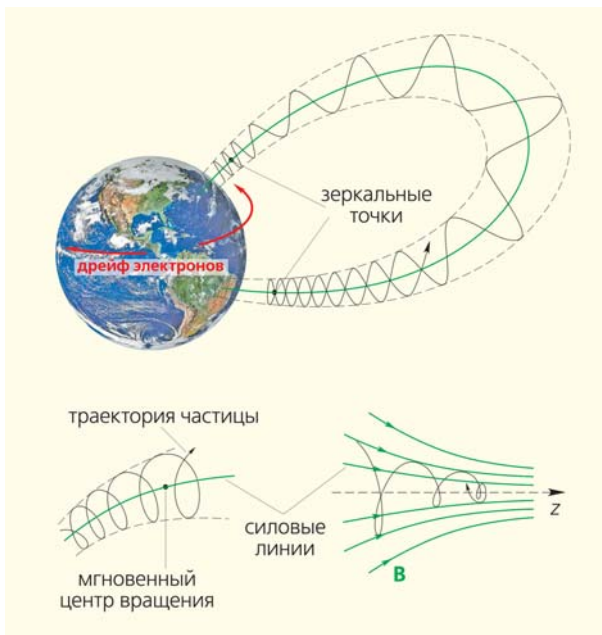


Рис.3. Траектории частиц, захваченных в ловушку магнитного диполя Земли. Движение заряженной частицы в геомагнитной ловушке (вверху). Внизу показаны траектория перемещения частицы по спирали на силовой линии магнитного поля (слева) и процесс отражения частицы в сильно неоднородном магнитном поле (магнитная пробка, справа).

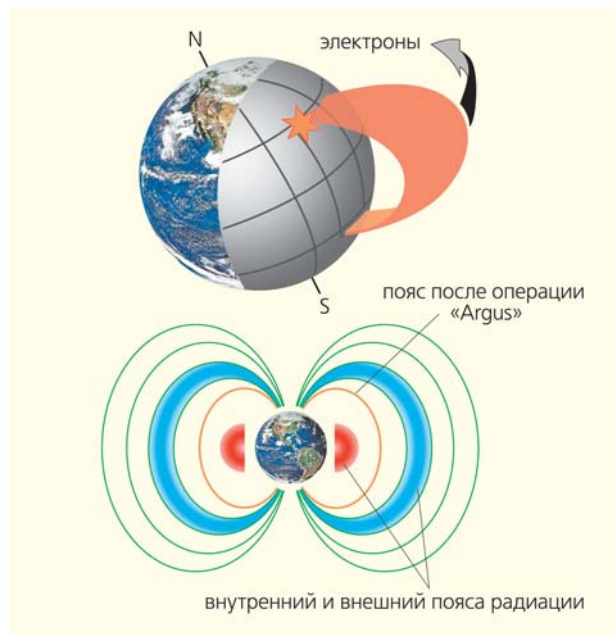


Рис.4. Движение частиц после их импульсной инъекции в магнитное поле Земли. Начальный период долготного дрейфа частиц после атомного взрыва (вверху). Электроны дрейфуют в одну сторону, протоны (и другие положительно заряженные частицы) — в другую. Примерное расположение пояса электронов после операции «Argus» (внизу).

Приведенные примеры показывают: к 1957 г. были группы исследователей, в основном геофизиков, которые серьезно обсуждали природу частиц в магнитосфере Земли для объяснения полярных сияний, выясняли траектории солнечных и космических частиц в магнитном поле Земли и были готовы к восприятию новых открытий. Исследователи космических лучей (Вернов и Ван Аллен) этими вопросами не занимались, и успехи геофизиков были им неизвестны. Разобщенность геофизиков и физиков-космиков — одна из причин непонимания полученных последними результатов.

Первые же тесные встречи-обсуждения с участием специалистов разного профиля произошли в июле 1958 г. в Москве во время V Ассамблеи МГТ, где присутствовали ученые США (Е.Рэй, Ф.Сингер и др.) и СССР (С.Н.Вернов, А.Е.Чудаков, С.Л.Мандельштам, В.И.Красовский и др.). На специально организованных лекциях коллеги-сотрудники Ван Аллена и Вернов с Чудаковым сделали доклады о результатах полетов всех спутников Земли («Спутника-2», «Explorer-1 и -3» и «Спутника-3»). Результаты этих экспериментов были не только поняты и приняты научной общественностью, но и сразу подтверждены операцией «Argus» и измерениями искусственно созданных поясов спутником «Explorer-4» [20].

На ассамблее обсуждалась и количественно анализировалась идея, что протоны внутреннего пояса появляются в процессе распада нейтронов, образующихся при реакциях взаимодействия высокоэнергичных частиц космических лучей с ядрами атомов атмосферы Земли и вылетающих из нее (их назвали нейтронами альbedo космических

лучей). При распаде нейтронов образуются протоны и электроны, которые попадают в магнитную ловушку и захватываются там (рис.5). В СССР эта гипотеза впервые прозвучала на семинаре в Физическом институте АН СССР уже 6 июня 1958 г., когда Вернов рассказывал о расчетах по нейтронному источнику протонов*. На V ассамблее МГТ доклад был повторен. Докладывали на эту тему и другие исследователи — Ф.Сингер и П.Келлог. С.Н.Вернов и А.Е.Чудаков представили также доклады на X съезде Международного астрономического союза (Москва, август 1958 г.) и на 2-й Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, сентябрь 1958 г.) [6].

Первая публикация по протонам от распада нейтронов альbedo принадлежит, по-видимому, Сингеру [21]. И это несмотря на то, что Вернов рассматривал идею нейтронов альbedo на две недели раньше Сингера, как известно из переписки М.И.Панасюка с Сингером, где тот признает первенство Вернова**. Потом были и другие публикации, например [22, 23].

Таким образом, можно констатировать, что к концу лета 1958 г. научное сообщество узнало о существовании вокруг Земли областей повышенной радиации и о том, что эта радиация разделена на две зоны, внутреннюю (экваториальную) и внешнюю (приполярную). Внутренняя зона заполнена в основном протонами с энергией 100 МэВ, внешняя — электронами с энергией от 100 кэВ. Было установлено, что эти частицы захвачены магнитным полем Земли, и найден возможный источник наполнения поясов частицами — распад нейтронов альbedo космических лучей. Существенно, что захват и длительное удержание частиц были сразу подтверждены искусственными радиационными поясами в операции «Argus». Возникшее на V ассамблее МГТ очень удачное название открытого явления — «радиационные пояса Земли» — в печати, вероятно, впервые появилось в работах Сингера [21], опубликованных почти сразу после окончания конференции.

О приоритете и сотрудничестве

До сих пор в истории физики стоит вопрос: кого же считать автором открытия радиационных поясов Земли? Суммируем различные сведения и соображения, которые могут помочь составить некоторое представление о вкладе различных групп и отдельных ученых в обнаружение и объяснение этого явления.

Прежде всего — о самом открытии. Оно не могло не произойти, будучи таким же неизбежным, как

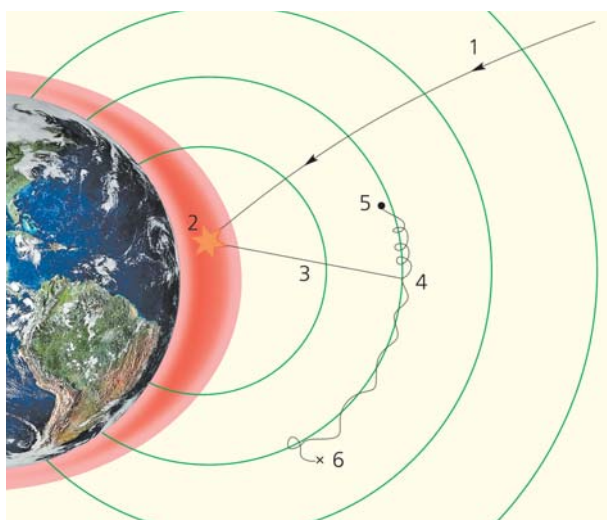


Рис.5. Нейтронный источник протонов во внутреннем поясе (нейтронное альbedo). Модель образования внутренней зоны радиации: протоны галактических космических лучей (1) испытывают столкновения в атмосфере (2) и рождают нейтроны (3), которые, выходя из атмосферы, распадаются (4), создавая захваченные электроны (5) и протоны (6).

* Доклад С.Н.Вернова «Возможный механизм создания “земного излучения” под действием космических лучей» на семинаре ФИАН 6 июня 1958 г. Текст доклада существует.

** М.И.Панасюк, частное сообщение.

открытие Америки. Развитие ракетной техники, вызванное общим прогрессом, а не только политическими и военными запросами, неминуемо привело бы к попаданию приборов в области повышенной радиации, и кто первый залетел бы туда, тот и открыл бы. Но просто попасть в пояса радиации недостаточно, нужно зарегистрировать потоки частиц и понять, что именно зарегистрировано...

В нашем случае ситуация оказалась несколько сложнее: столкнулись с поясами одни исследователи, а разгадали эффект другие.

Первыми обнаружили частицы поясов в СССР, вторыми в США, но никто сначала не понял природу явления. Мы зарегистрированные частицы сочли солнечными, а не магнитосферными и не сразу уделили им должное внимание. Потом исправились, решили подробнее исследовать обнаруженный казус и на «Спутник-3» поставили прибор, разрешивший эту проблему. Американцы тоже сначала заподозрили Солнце, впрыснувшее частицы в полярные районы, где раньше Ван Аллен наблюдал что-то подобное [24]. Правда, для переноса частиц от полюсов к экватору механизма не нашлось... Причина недоразумений — сосредоточенность мыслей на одной задаче — изучении космических лучей. Проблем геофизики для физиков-космиков просто не существовало, мысли были далеко и высоко, а магнитное поле Земли было помехой, хотя иногда оно и использовалось как магнитный спектрометр, помогавший определить энергетический спектр и состав космических лучей [25]. Может быть, виновата загруженность другими проблемами. Трудно поверить, что физикам-космикам не хватало знаний предшествующих исследований по траекториям частиц в магнитном поле Земли.

Доклад Ван Аллена 1 мая 1958 г. [2], возбудивший научное общество, стал толчком к пониманию процессов в геомагнитном поле. Результаты и обсуждения предшествующих исследований позволили уже ко времени открытия V ассамблеи МГГ в июле 1958 г. сформулировать концепцию захвата и удержания частиц в магнитном поле Земли. И в своей специальной лекции на ассамблее Вернов и Чудаков рассказывали о внешнем поясе, о составе частиц в обоих поясах, о границах поясов. В докладе же от группы Ван Аллена не было даже упоминаний о стабильных потоках захваченных магнитным полем частиц, говорилось только об обнаруженной ими «радиации». Вероятно, его сотрудники-докладчики не осознали природы нового явления и не успели или не решились в отсутствие руководителя (Ван Аллена на ассамблее не было) перестроиться...

Обоснованно ли именовать Ван Аллена автором открытия радиационных поясов? Почему сложилось подобное мнение? Причин несколько.

Прежде всего, Ван Аллен первым широко оповестил о своих результатах, затем последовало много публикаций, хотя нигде до полета «Explorer-4» по реальной физике явления он не высказывался. Ис-

тинную природу феномена поняли другие. Работа Ван Аллена с уже установившейся терминологией была опубликована лишь в конце 1959 г. [26]. Данные СССР нигде за границей до июля 1958 г. не докладывались, первая публикация была представлена в печать только 4 мая 1958 г. Результаты «Спутника-3» международная общественность узнала тоже только на V ассамблее МГГ.

Вторая причина — неосведомленность исследователей о работах в смежных областях науки. Основное внимание уделялось космическим лучам. В 1958 г. под руководством Вернова велись работы на ШАЛ-установке в МГУ (исследовались так называемые широкие атмосферные ливни частиц), создавалась большая ШАЛ-установка в Якутске, проводились опыты на Памире, наблюдения на шарах-зондах и многие другие исследовательские работы. Такое обилие экспериментов и привело к потере ориентации, не было сразу нащупано главное направление исследований, осознание ситуации пришло позднее. Когда все устоялось, Вернов признал: «Если бы физики в то время знали больше о геофизике и геофизики лучше знали физику, мы могли бы сделать гораздо больше открытий».

Третья причина — изолированность СССР, плохая связь и недостаточный обмен информацией с зарубежными учеными. Этому состоянию способствовала напряженность отношений с США и секретность, связанная со всем, что касалось военного промышленного комплекса, поставляющего ракеты-носители. Не исключено, что запоздалая публикация результатов «Спутника-2» была вызвана согласованием материалов статьи с соответствующими инстанциями. Может быть, поэтому статья и попала в журнал только 4 мая 1958 г., хотя в тот день все соавторы уже около двух недель были на полигоне, готовили к запуску «Спутник-3» и физически не могли сами послать статью в журнал.

Все вместе привело к тому, что Вернов со своими спутниковыми результатами просто не был известен широкой научной и массовой общественности, тогда как Ван Аллен — у всех на слуху и в блеске новых перспективных исследований. Естественно, научная общественность и признала последнего автором открытия радиационных поясов Земли. А вы кому бы отдали пальму первенства в этих условиях?

В заключение хотелось бы все-таки зафиксировать, что, несмотря на споры о приоритетах обнаружения радиационных поясов Земли, открытие внешнего радиационного пояса безусловно принадлежит СССР. Внешний пояс был впервые зарегистрирован на «Спутнике-3», сообщение на V ассамблее МГГ было сделано, когда данных с американского «Explorer-4», который тоже залетал во внешний пояс, еще не было. Повторим, что «Спутник-3» получил очень важные результаты: определил природу частиц внешнего пояса (электроны с энергией 100 кэВ), установил внутреннюю и внешнюю границы внешнего радиацион-

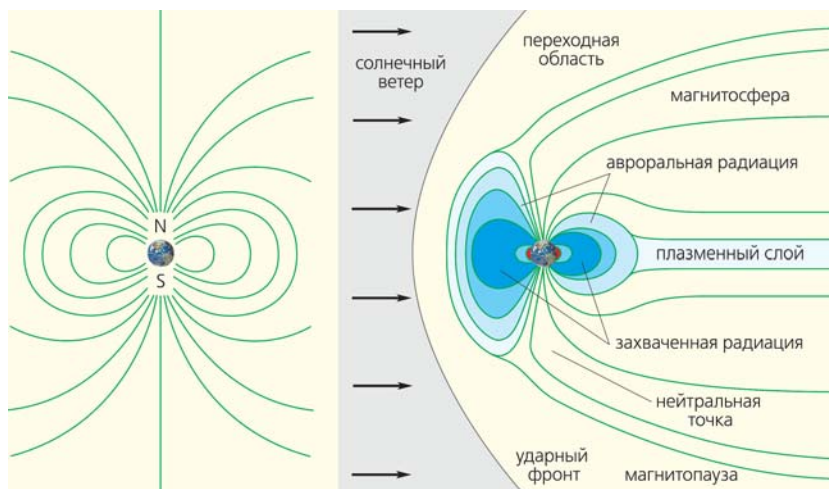


Рис.6. Представление об околоземном пространстве до (слева) и после (справа) открытия радиационных поясов Земли.

ного пояса, его изменчивость под действием геомагнитной активности, положения максимумов интенсивности частиц. Для внутреннего пояса «Спутник-3» также нашел состав частиц, его границы на всех долготах в Северном и Южном полушариях по всему земному шару. Таких данных о внешнем поясе к моменту V ассамблеи еще ни у кого не было. Конечно, открытие внешнего пояса в определенной степени вторично, но тем не менее это достойный результат.

Вообще-то у СССР был шанс первым открыть радиационные пояса Земли. Вот выдержка из воспоминаний Сингера, опубликованная в сборнике ИКИ к 50-летию запуска «Спутника-1» [27].

Вернов потерял право первооткрывателя радиационного пояса из-за секретности русских. Частицы радиационного пояса были зарегистрированы в эксперименте Вернова на «Спутнике-2» на шесть месяцев раньше, чем их зарегистрировал прибор Ван Алена на «Explorer-1». Однако эллиптическая орбита «Спутника» значительно проникла в пояс лишь в Южном полушарии, а русские ни с кем не стали делиться телеметри-

ческим кодом (Прим. автора: С.Н.Вернов этого кода не знал, передачу вели другие службы, и код был засекречен). Во время Конгресса по космическим лучам в Москве в 1959 г. в гостиничном номере (по-моему, это было в гостинице «Москва») профессор Гарри Мессел, известный исследователь космических лучей и глава Физической школы в Университете Сиднея, рассказал мне, как все происходило. Он записывал сигнал со «Спутника-2» каждый раз, когда тот пролетал над Австралией, однако кода ему не дали. Когда же они наконец попросили у него копию записанных данных, он послал их к черту (как это мог сделать только Гарри Мессел).

Гарри, украинец из Канады, рассказывал эту историю с большим юмором. Конечно, если бы они получили данные наблюдений вплоть до апогея орбиты «Спутника-2», расположенной на высоте 1680 км, сомнений бы не осталось.

Есть и другие «если бы». Они связаны даже не столько с секретностью, сколько с необычайной срочностью проведения всех работ. Можно пожалеть о нашей близорукости, но ведь легко судить задним числом о том, как бы надо было сделать. И все-таки за три месяца обсуждений ученые всего мира смогли понять новое явление природы. Изучение радиационных поясов Земли показало важность совместных работ и бесперспективность разобщенности. Каким было наше представление о магнитном поле Земли и окружающем Землю пространстве до открытия радиационных поясов и какова реальная картина, известная в настоящее время, демонстрирует рис.6.

Но самое главное — полет первых спутников указал путь к дальнейшему прогрессу науки. Был сделан начальный шаг к полному освоению Солнечной системы и, помечтаем, Вселенной. ■

Литература / Reference

1. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. Доклады АН СССР. 1958; 120(6): 1231–1233 и Сб. «Искусственные спутники Земли». 1958; 1: 5–8. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Logachev Yu.I., Chudakov A.E. Measurements of the spaceradiation on the Earth's artificial satellite. Doklady AN SSSR. 1959; 120(6): 5–8. (In Russ.)]
2. Van Allen J.A. Transcript of 1958 lecture, I.G.Y. Satellite Rep. 1961; 13.
3. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Preliminary reports: Satellites 1958 Alpha and 1958 Gamma. Trans. Amer. Geophys. Union. 1958; 39(4): 767–769.
4. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Preliminary reports: Satellites 1958 Alpha and 1958 Gamma. IGY Satellite Rep. Ser. 1958; 3: 73–92.
5. Van Allen J.A., Ludwig G.H., Ray E.C., McIlwain C.E. Observation of high intensity radiation by satellites 1958 alpha and gamma (Explorers I and III). Jet Propulsion. 1958; 28(9): 588–592.
6. Вернов С.Н., Чудаков А.Е. Изучение космических лучей с помощью ракет и спутников в СССР. Труды 2-й Международной. конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). М., 1959;

- 1: 267–271. [Vernov S.N., Chudakov A.E. The study of cosmic rays with rockets and the satellites in the USSR. Proceedings of the 2nd International conference on the peaceful uses of atomic energy (Geneva, 1958). Moscow, 1959; 1: 267–271.]
7. Vernov S.N., Chudakov A.E. Terrestrial corpuscular and cosmic rays. Space Research. H.Kallmann Bijl (eds). Amsterdam, 1960; 751–796.
 8. Vernov S.N., Vakulov P.V., Gorbakov E.V. et al. Study of the cosmic-ray soft component by the 3rd Soviet Earth satellite Planet and Space Science. 1959; 1(2): 86–93.
 9. Van Allen J.A., McIlwain C.E., Ludwig G.H. Radiation observations with satellite 1958-e. J. Geophys. Res. 1959; 64(2): 271–286.
 10. Hess W.N. The Radiation Belt and Magnetosphere. Blaisdell Publishing Company, 1968.
 11. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М., 1968. [Tverskoy B.A. Dynamics of the Earth's Radiation Belts. Moscow, 1968. (In Russ.)]
 12. Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве. М., 1972. [Shabanskiy V.P. Phenomena in near-earth space. Moscow, 1972. (In Russ.)]
 13. Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al. Anthropogenic space weather. Space Sci. Rev. 2017. DOI 10.1007/s11214-017-0357-514.
 14. Stormer C. On the trajectories of electric particles in the field of magnetic dipole with applications to the theory of cosmic radiation. Astrophysics. 1930; 1: 237.
 15. Stormer C. The Polar Aurora. Cambridge, 1955.
 16. Christofilos N. The Argus experiment. Proc. Natl. Acad. Sci. 1959; 45: 1144–1152.
 17. Christofilos N.C. The Argus experiment. J. Geophys. Res. 1959; 64(8): 869–875.
 18. Christofilos N. Sources of Artificial Radiation Belts. Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field. D. Reidel, Holland, 1966.
 19. Singer S.F. A new model of magnetic storms and aurorae. Trans. Amer. Geophys. Union. 1957; 38: 175.
 20. Van Allen J.A., McIlwain C.E., Ludwig G.H. Satellite observations of electrons artificially injected into the geomagnetic field. J. Geophys. Res. 1959; 64(8): 877–891.
 21. Singer S.F. Trapped albedo neutron theory of the radiation belt. Phys. Rev. Lett. 1958; 1: 181–183.
 22. Kellogg P.J. Possible explanation of the radiation observed by Van Allen at high altitude In satellites. Nuovo Cimento. 1959; 11(1): 48–66.
 23. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Иваненко И.П. и др. Возможный механизм создания «земного корпускулярного излучения» под действием космических лучей. Доклады АН СССР. 1959; 124(5): 1022–1025. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Ivanenko I.P. et al. The possible mechanism of creation of «terrestrial corpuscular radiation» under the action of cosmic rays. Doklady an SSSR. 1959; 124(5): 1022–1025. (In Russ.)]
 24. Van Allen J.A. Direct detection of Auroral radiation with rocket equipment. Pric. Nat. Acad. Sci. 1957; 43: 57–62.
 25. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Добротин Н.А. и др. Определение знака заряда первичных частиц космических лучей по измерениям азимутальной асимметрии в стратосфере в районе экватора. Доклады АН СССР. 1949; 68: 253–255. [Vernov S.N., Grigorov N.L., Dobrotin N.A. et al. Determination of the sign of the charge the primary particles of cosmic rays by measuring azimuthal asymmetries in the stratosphere near the equator. Doklady AN SSSR. 1949; 68: 253–255. (In Russ.)]
 26. Van Allen J.A. The geomagnetically trapped corpuscular radiation. J. Geophys. Res. 1959; 64: 1683–1689.
 27. Ф.Сингер. Эпоха до запуска спутника и его ранние открытия. Первая космическая... М., 2007: 216–223. [F.Singer. The era before the satellite launch and its first discoveries / The first space... Moscow, 2007: 216–223. (In Russ.)]

Earth's Radiation Belts: Discovery and First Explorations

Yu.I.Logachev

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

Unexpected discovery of radiation belts around the Earth resulted in a number of new hypotheses explaining movements of charged particles in magnetic fields, as well as re-analyses of the existing beliefs. Attempts were made to relate the new discovery with well-known natural phenomena such as polar aurora, geomagnetic storms, and solar energetic particles. As expected, these research efforts led to the truth (particles captured by the magnetic field of the Earth are indeed related to the abovementioned phenomena), and within just one month the nature of the new discovery became quite clear. Who were the main contributors to unveiling the mystery of the new phenomenon and why the discovery was named after just one of the participating scientists?

Keywords: «Sputnik-1», «Sputnik-2», Earth's external and internal radiation belts.