

550.388.8

ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОЛЯРНЫМИ СИЯНИЯМИ*)**Б. О'Брайен**

В физике мало найдется областей, отличающихся таким богатством и разнообразием, как изучение явлений, связанных с полярными сияниями. Во время сияния радиозвезды могут как бы мигать или мерцать, возможно появление «урчащих» инфразвуковых волн давления, слышимых свистящих и хрустящих звуков, а также электромагнитного излучения в звуковом диапазоне. Интенсивные потоки электронов и протонов бомбардируют и нагревают атмосферу, вызывая «блэкаут» — полное поглощение радиоволн. Возможны также необычайно сильные колебания геомагнитного поля и возникновение больших токов высоко в атмосфере и глубоко под Землей.

Установление связей и корреляций между отдельными явлениями, сопровождающими полярные сияния, возможно, позволит разгадать механизм их возникновения. Так как эти явления не поддаются контролю, ученые не могут варьировать одни параметры и отмечать, как это влияет на другие параметры. Поэтому необходимо ясно понять, что простая корреляция между явлениями в полярных сияниях еще не означает причинной связи между ними.

Все же некоторые причинно-следственные соотношения между отдельными явлениями установлены, и они приводятся на схеме рис. 1. В центре диаграммы вместо локальной (или земной) причины возникновения сияний поставлен вопросительный знак, чтобы показать, что еще мало известно о возбуждении и развитии процессов, ответственных за ускорение частиц и возникновение магнитных возмущений. Последние в свою очередь приводят к явлениям, сопровождающим сияния; они приведены в нижней части рис. 1. Указанные неизвестные процессы происходят во внешних областях магнитосферы (рис. 2), представляющей собой полость, образованную геомагнитным полем в солнечном ветре.

Солнечный ветер — это поток плазмы, выбрасываемой горячей солнечной короной в радиальном направлении. Вблизи Земли он состоит главным образом из протонов с энергиями около 1000 эв (1 кэв) и электронов с энергиями порядка 10 эв**) при концентрации ~ 10 частиц/см³. Ввиду сверхзвуковой скорости солнечного ветра, при соударении его с геомагнитным полем перед магнитопаузой (границей магнитосферы) на расстоянии около 20 000 км возникает фронт ударной волны (см. рис. 2).

*) В. J. O'Brien, Auroral Phenomena, Science 148 (№ 3669), 449 (1965). Перевод К. Э. Виллер, редакция, примечания и дополнение Ю. И. Гальперина.

В оригинале имеется резюме: «С полярными сияниями сложным образом связано необычайно большое число других физических явлений».

**) По современным данным не менее 30 эв.

Геомагнитное поле искажено, линии поля отброшены назад и образуют на неосвещенной стороне Земли длинный хвост (см. рис. 2), ^{2,3}. Окружающая Землю магнитосфера расположена на высотах, на которых плотность энергии геомагнитного поля больше плотности кинетической энергии всех заряженных частиц. Таким образом, движение частиц контролируется здесь полем, и некоторые из них захвачены

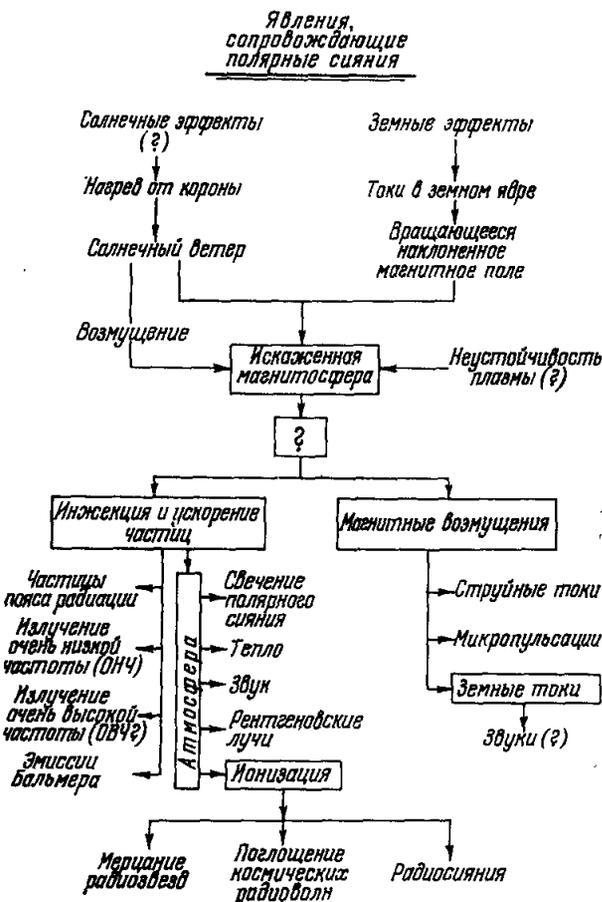


Рис. 1. Схема причинных связей между явлениями, связанными с полярными сияниями.

Вопросительные знаки после некоторых пунктов означают, что либо данные эффекты недостаточно понятны, либо еще недостаточно полно экспериментально изучены. Большой вопросительный знак в центре диаграммы временно заменяет адекватную теорию полярных сияний.

в ловушку, составляя радиационный пояс (см. рис. 2). А в межпланетном пространстве, в противоположность магнитосфере, плотность кинетической энергии частиц солнечного ветра больше плотности магнитной энергии ¹, и, следовательно, эти частицы контролируют направление магнитного поля, искажают его, придавая ему форму архимедовой спирали. В турбулентной области *) имеет место беспорядочное смешение обоих этих крайностей.

*) Переходная область между фронтом ударной волны и границей магнитосферы (см. рис. 2).

Некоторые явления в полярных сияниях, как будет описано ниже, обладают следующими особенностями: 1) они происходят непрерывно, но 2) их интенсивность и характеристики меняются. Широко распространено предположение, что за эти особенности ответствен непрерывно действующий, но в то же время порывистый солнечный ветер (и есть основания включить его в схему рис. 1). С увеличением скорости ветра уровень геомагнитной активности повышается¹.

Однако истинный механизм связи, с помощью которого энергия, а может быть, и частицы извлекаются из солнечного ветра и затем используются в явлениях, сопровождающих сияния, еще совсем неясен, на что указывает вопросительный знак в схеме рис. 1. Мощность, рассеиваемая в явлениях, сопровождающих сияния, во время сильных магнитных возмущений по всему земному шару приближенно равна 10^{18} эрг/сек. Двумя очевидными источниками такой мощности являются солнечный ветер, приносящий к фронту магнитосферы около 10^{20} эрг/сек, и затем вращение Земли с кинетической энергией вращения около 10^{37} эрг. Оба эти источника также включены в схему рис. 1. В нее вошли также, несмотря на то, что их относительная роль неизвестна, возмущения в солнечном ветре и неустойчивость плазмы, которые, естественно, возрастают в турбулентной области.

В этих причинных связях Солнце несомненно играет важную роль. За день или больше до появления мощных полярных сияний неизменно отмечается повышенная солнечная активность⁵.

Благодаря такой связи полярные сияния наблюдаются в низких широтах чаще всего в течение той части 11-летнего цикла, когда Солнце наиболее активно. Подобно геомагнитной возмущенности, активность полярных сияний запаздывает относительно пятнообразовательной деятельности Солнца примерно на год. Таким образом эту связь ни в коем случае нельзя считать четкой.

Запаздывание сильной геомагнитной бури и полярного сияния на один день относительно сильной солнечной вспышки означает, что возмущение (см. рис. 1) переносится медленно движущимся корпускулярным излучением, а не электромагнитным излучением, распространяющимся со скоростью света. То обстоятельство, что полярное сияние существует непрерывно⁴, означает также постоянное присутствие возмущения

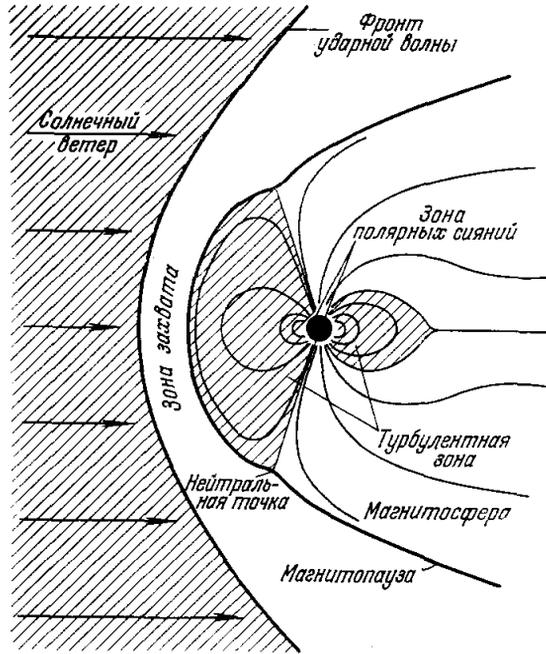


Рис. 2. Эскиз околоземного пространства.

Зона полярных сияний находится на границе захвата частиц в поясе радиации на магнитной широте около 75° на полуденной стороне и около 69° на полуночном меридиане. Эскиз сделан на основании теоретических представлений и экспериментальных данных (по Десслеру и О'Брайену).

и соответствующей среды. Таким требованиям несомненно удовлетворяет порывистый солнечный ветер. Однако фактически существующие частицы солнечного ветра (электроны и протоны) обладают слишком малой энергией (около 10 эв и 1 кэв соответственно) для того, чтобы проникнуть на глубины полярных сияний в атмосферу (до высоты около 100 км), даже если бы позволяла их траектория, поскольку для этого требуются энергии порядка 10 и 150 кэв соответственно. Таким образом, здесь (в магнитосфере) должен иметь место «локальный» процесс ускорения, хотя пока все еще неясно, действует ли он на частицы солнечного ветра, или на постоянно населяющие магнитосферу тепловые частицы, или на захваченные в радиационном поясе Ван-Аллена частицы малой энергии⁴. Во всяком случае такой процесс ускорения должен быть вызван, или инициирован, возмущением в солнечном ветре.

В настоящей статье подробно рассматриваются явления, перечисленные на схеме рис. 1 после вопросительного знака.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ И ИХ СВЕЧЕНИЕ

Чаще всего полярные сияния происходят в полярных районах обоих полушарий. Однако после необычайно сильного выброса или вспышки на Солнце сияния могут происходить и в гораздо более низких широтах, иногда столь близко к экватору, как, например, в Сингапуре. Область, в которой сияния возникают каждую ночь, получила название зоны



Рис. 3. Полярное сияние в форме полосы (фото любезно предоставлено Хесслером).

полярных сияний. Она простирается в виде двух колец, окружающих Землю⁵. Солнечный ветер искажает магнитосферу, сжимая ее на дневной стороне больше, чем на ночной (см. рис. 2). В результате этого зона

полярных сияний каждого полушария овальна. На дневной стороне она расположена между магнитными широтами около 73 и 78°, а на ночной стороне примерно от 65 до 70°⁴. В настоящее время само существование такой зоны является загадкой.

Наблюдаемое в виде сияния свечение испускается на высотах примерно от 90 до 1000 км (рис. 3). Свет этот испускается главным образом на высоте 100—120 км составляющими атмосферы, возбуждаемыми бомбардировкой электронами с энергией порядка 10 кэв. Среди этих составляющих наиболее распространенными являются кислород и азот, и, как показывает спектральный анализ свечения полярного сияния, их эмиссии наиболее ярки (рис. 4). Фактически анализ свечения полярного сияния с различных высот может дать информацию об относительном составе атмосферы на этих высотах. Подобно тому как яркость спектральных линий (от атомов) и полос (от молекул) меняется от сияния к сиянию, меняется также и видимый цвет сияний.

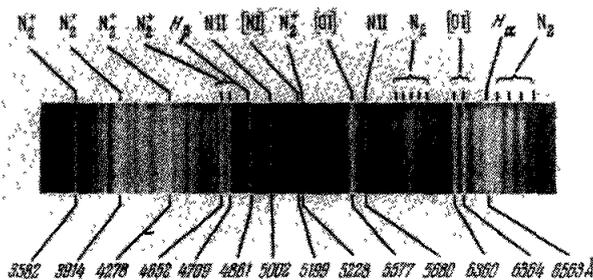


Рис. 4. Спектр яркого сияния от 2 марта 1957 г., снятый на Йеркской обсерватории при 27-минутной экспозиции с помощью натрульного спектрографа, направленного вдоль геомагнитного меридиана на участок неба.

Здесь север находится наверху, а юг внизу, темные параллельные линии наклонены к зениту под углом 45°. Числа внизу выражают длины волн в ангстремах (спектр любезно предоставлен Дж. Чемберленом).

Цвета, которые чаще всего видны в полярных сияниях, — это светло-зеленый, обязанный линии атомарного кислорода [O I] $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, и темно-красный, обязанный линиям атомарного кислорода $\lambda = 6300$ и 6364 \AA , причем последний резче всего выражен на больших высотах⁵. Наблюдается еще одна очень интенсивная эмиссия полярного сияния в полосе ионизованного молекулярного азота N_2^+ , «голова» которой находится около 3914 \AA (см. рис. 4). В большинстве случаев эмиссии с длинами волн 3914 и 5577 \AA имеют примерно одинаковую интенсивность, и в пределах спектра от 3800 до 7000 \AA это самые яркие эмиссии. Максимальная спектральная чувствительность человеческого глаза приходится на длину волны около 5550 \AA , а его реакция на свет с длиной волны 3914 \AA в темно-фиолетовой области меньше 1% его реакции на такой же поток фотонов с длиной волны 5577 \AA . Вот почему сияния кажутся нам в большинстве случаев бледно-зелеными или белыми, когда они слабо видны.

Кроме видимого света полярные сияния испускают также инфракрасные и ультрафиолетовые эмиссии. Для обнаружения эмиссий в далекой ультрафиолетовой области необходимо поднять детекторы выше области поглощающего их атмосферного озона, т. е. выше 30 км.

Яркость света полярного сияния варьирует в пределах от величин, лежащих ниже порога видимости, до величин, превышающих его в тысячи раз. Яркость классифицируется так называемым международным коэффициентом яркости (IBC) или баллом. Установлено четыре балла от I до IV, отличающихся друг от друга по яркости на порядок. Так, например, сияние балла I едва видимо и приближенно обладает яркостью

Млечного Пути, а сияние балла IV освещает Землю так же ярко, как полная Луна⁵. Более объективной мерой яркости сияния является интенсивность эмиссии [O I] $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, которая в сиянии балла I соответствует 10^9 квантов/см²сек, или 1 килорелею⁵. Сияние балла IV излучает в линии 5577 \AA 10^{12} квантов/см²сек, т. е. равно 1000 килорелеев. Чем ярче полярное сияние, тем реже оно происходит⁵. В зоне полярных сияний всегда существует свечение, но часто его яркость слишком мала

для того, чтобы его можно было видеть⁴.

Существуют некоторые редкие типы сияний, отличающиеся от наблюдаемых в зоне сияний. Так, существует «полярное свечение» на длине волны 3914 \AA , обусловленное бомбардировкой полярной шапки солнечными протонами со значительной энергией (в среднем около 10 Мэв), достаточной для проникновения глубоко в атмосферу. Здесь они теряют большую часть своей энергии на таких низких высотах, где, по существу, атомарный кислород отсутствует и свет испускается главным образом молекулярным азотом. Существуют также высокоширотные и среднеширотные красные дуги⁶ и появляющиеся время от времени мощные красные сияния, в ряде наблюдавшегося 11 февраля 1958 г., свечение которого почти полностью было сосредоточено в линиях атомарного кислорода 6300 и 6364 \AA . В этих явлениях роль механизма возбуждения должен играть процесс, который способен сообщить атомарному кислороду энергию 2 эв для возбуждения эмиссии 6300 или

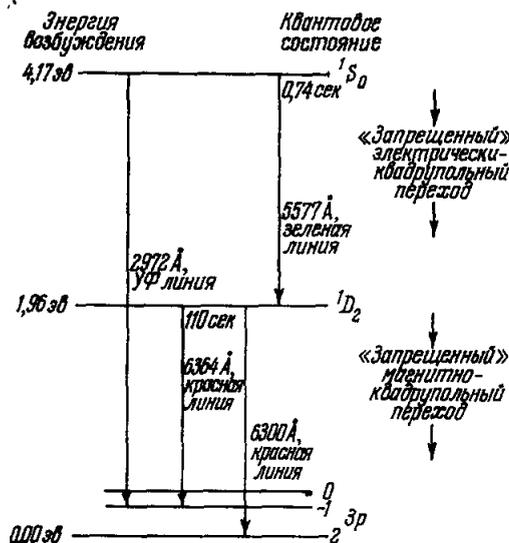


Рис. 5. Эмиссия атомарного кислорода — диаграмма уровней энергий для двух возбужденных состояний атомарного кислорода, с которых возвращается электрон, излучая фотоны линий 5577 или 6300 \AA , наблюдаемых в сияниях (см. также рис. 4).

Эти переходы электронов частично «запрещены» определенными правилами квантового отбора⁵. Таким образом, может случиться, что возбужденному атому кислорода придется ждать в течение $0,74 \text{ сек}$ или 110 сек , прежде чем электрон совершит скачок вниз с излучением фотона. Если же в это время произойдет столкновение другой частицы атмосферы с возбужденным атомом кислорода, то избыточная энергия может быть потеряна без излучения фотона. Таким образом, эти эмиссии, в особенности красная, приходят из разреженной атмосферы с больших высот.

6364 \AA , но не может дать 4 эв , необходимых для возбуждения эмиссии 6300 или эмиссии 5577 \AA соизмеримой яркости (рис. 5).

Полярные сияния бывают различной формы и цвета. По форме можно грубо различать горизонтальные и вертикальные сияния. Горизонтальные сияния называют дугами или полосами. Они обычно расположены на высоте от 100 до 130 км , и их протяженность по широте может составлять несколько километров, а по долготе несколько тысяч километров. Вытянутые вдоль магнитных силовых линий структуры сияний (приблизительно вертикально в полярных широтах) получили название лучей (рис. 6). Если их рассматривать сбоку, они создают впечатление луча прожектора диаметром около 1 км , простирающегося в высоту, начиная от 100 км , иногда даже до 1000 км . Дуги, как будет рассмотрено ниже, возбуждаются бомбардировкой атмосферы электронами с энер-

гией около 10 км. Простой бомбардировкой атмосферы частицами трудно объяснить возбуждение лучей. Возможно, они обусловлены неустойчивостью пространственного заряда, которая заставляет сияние навиваться вокруг себя и образовывать вертикальные складки подобно драпери. Воспринимаемая дополнительную яркость от различных толщ драпери, наблюдатель видит луч.

Движения лучей напоминают волнообразные движения, и действительно Чемберлен⁵ следующим образом описывает впечатление от яркой лучистой полосы: «Область шириной в несколько градусов, содержащая ряд лучей, может показаться гораздо ярче остальной части полосы, и это яркое пятно быстро движется то в одном, то в другом направлении, напоминая колеблющийся луч прожектора, освещающий гигантский бамбуковый частокол» (см. рис. 6). Он приходит к заключению, что здесь совершают движение не отдельные лучи, а картина возбуждения. Однако причина этого движения непонятна. Измерения, проведенные недавно с помощью наземной телевизионной системы⁷, показали, что скорость движения лучей в горизонтальном направлении достигает значений 100 км/сек (см. рис. 6).

В зоне полярных сияний наблюдается также свечение, не имеющее четкой структуры, получившее название диффузных сияний⁸. Это они всегда придают ночному небу зоны полярных сияний такую яркость, что человеческий глаз едва может различать Млечный Путь.

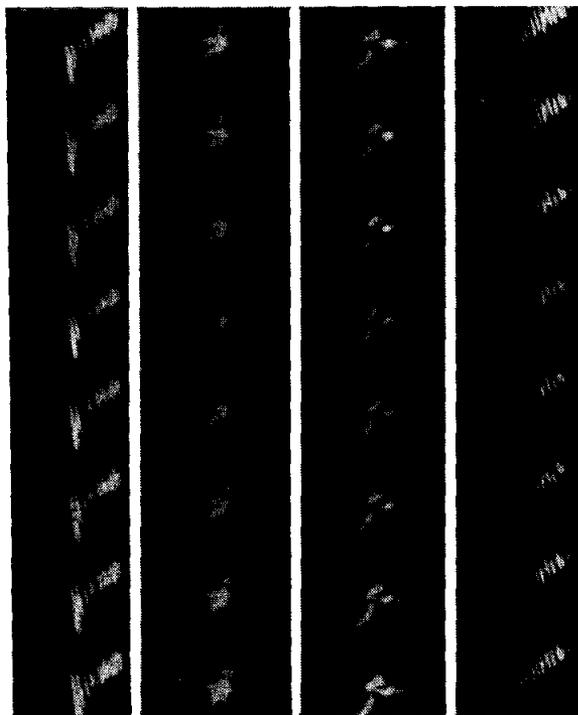


Рис. 6. В каждой из четырех секций приведены последовательные фотографии, снятые с экспозицией в 1/60 сек через интервалы в 1/24 сек с помощью телевизионной системы суперортикон⁷.

Центральные фотографии обращены вверх к зениту сияния и, таким образом, видят структуры с торца. Обе крайние фотографии изображают лучи сияния, отстоящие один от другого примерно на 2 км. Для изучения временных изменений в сиянии сравните последовательные фотографии (любезно представлены Т. Дэвисом).

БОМБАРДИРОВКА АТМОСФЕРЫ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Еще несколько десятилетий тому назад было известно из лабораторных исследований газовых разрядов, что при бомбардировке воздуха возбужденными электронами (катодными лучами) он начинает излучать свет. В то время считали, что и полярные сияния, возможно, вызываются аналогичным процессом. Зависимость от магнитного поля таких особенностей полярных сияний, как существование зоны сияний или расположение их лучей вдоль поля, гармонирует с представлениями о возбуж-

дении сияний заряженными частицами, контролируемые аналогичным образом. Появление интенсивных сияний через день или больше после очень больших вспышек на Солнце привело к мысли о том, что бомбардирующие частицы сначала были ускорены и лишь после этого пришли с Солнца в атмосферу. Как уже указывалось выше, первая часть этой гипотезы заведомо неверна, в то время как вторая, возможно, справедлива. Разумно было предположить, что если сияния вызываются заряженными частицами, то это, вероятно, должны быть наиболее распространенные виды частиц, т. е. протоны и электроны.

Проведенные в 1950 г. наземные измерения характерных спектральных эмиссий серии Бальмера действительно показали, что атмосфера в области полярных сияний иногда бомбардируется протонами с энергиями в десятки и сотни тысяч эв. При своем спиральном спуске вокруг линии магнитного поля в более плотную атмосферу протон может захватить электрон и превратиться в возбужденный атом. Затем электрон возвращается в нормальное, или основное, состояние, и тогда излучается фотон характеристической энергии, соответствующей разности энергии обоих энергетических состояний*). Каждый протон с начальной энергией около 100 кэв сотни раз проходит через этот процесс во время своего спуска в атмосферу, где он затем поглощается. Большая часть начальной энергии 100 кэв тратится на ионизацию атмосферы, однако при этом испускается также много фотонов серии Бальмера (включая примерно 60 фотонов H_{α} , т. е. красную эмиссию с длиной волны 6563 Å).

Так как атомы водорода, испуская этот свет, движутся относительно наблюдателя, регистрируемая длина волны λ претерпевает доплеровское смещение на величину $\Delta\lambda$, определяемую из соотношения

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (1)$$

где v — скорость атома относительно наблюдателя и c — скорость света. Как видно из рис. 7, наблюдаются смещения длины волны на много ангстрем.

Приведенные на рис. 7 профили можно объяснить, если принять⁵, что свет испускается атомами, которые в среднем спускаются вниз по спиральям вокруг линий магнитного поля В. Само собой разумеется, что нейтральные атомы водорода не направляются магнитным полем. Однако, когда такой атом теряет свой электрон, он превращается в протон, и тогда его направляет лоренцева сила, действующая на любую заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Цикл захвата и потери электрона происходит неоднократно при соударениях с атомами атмосферы. Когда наблюдатель смотрит в направлении магнитного горизонта, то он видит движущиеся по спирали частицы сбоку, и, таким образом, к нему приближается и от него удаляется одинаковое число частиц, так что доплеровский профиль просто уширяется. А если смотреть в направлении к магнитному зениту, то к наблюдателю движется большая часть вторгающихся частиц и доплеровский профиль смещается в сторону более коротких волн.

Наблюдения претерпевших доплеровское смещение бальмеровских эмиссий явились первым убедительным доказательством того, что в полярных сияниях происходит бомбардировка частицами. Однако сделанный впоследствии наземный фотометрический анализ свечения поляр-

*) Значительную роль (в особенности для частиц с начальной энергией < 10 кэв) играет второй процесс — возбуждение движущегося атома водорода при соударении с частицами атмосферы. При таких соударениях происходит и ионизация движущегося атома водорода.

ного сияния показал, что свечение резко очерченных форм полярных сияний в большинстве случаев не связано с протонной бомбардировкой⁵. Применявшаяся Омхолтом⁵ и другими методика состояла в сравнении относительных яркостей эмиссии молекулярного азота (3914 Å) и бальмеровской эмиссии водорода Н_β (около 4861 Å). Яркость эмиссии 3914 Å пропорциональна полной рассеиваемой энергии (переносимая заряженными частицами энергия 1 эрг/см²сек дает на высоте 100 км эмиссию 3914 Å интенсивностью 200 *релеев* *)), а яркость эмиссии 4861 Å приблизительно пропорциональна потоку падающих протонов. Интенсивность

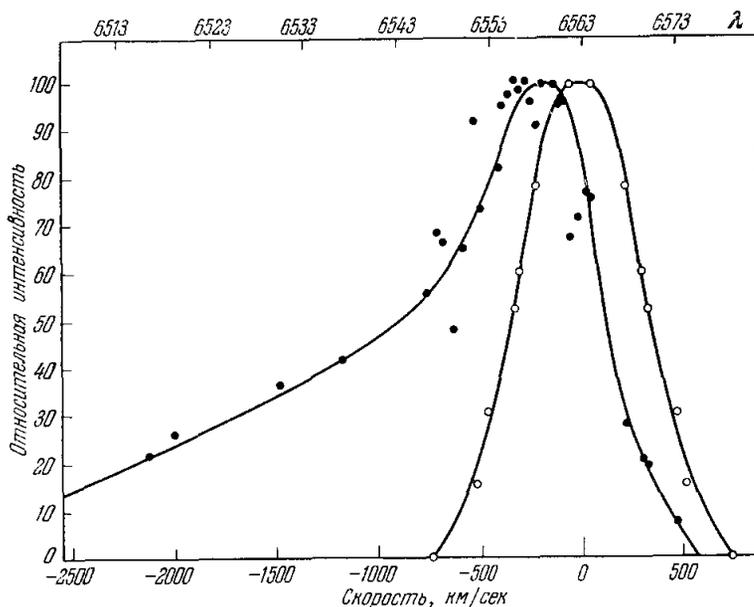


Рис. 7. Наблюдаемые в сияниях бальмеровские эмиссии водорода с доплеровским смещением.

Симметричная кривая соответствует измерениям в направлении на магнитный горизонт, а асимметричная — в направлении на магнитный зенит⁶ (данные любезно предоставлены Дж. Чемберленом).

этой эмиссии, вызванной потоком энергии протонов порядка 1 эрг/см²сек, равна 150 *релеям* **). Таким образом, если бы свечение полярного сияния поддерживалось протонами, то следовало бы ожидать, что измерения дадут для эмиссий 3914 и 4861 Å сравнимую яркость. Между тем в действительности первая эмиссия ярче второй в десять или более раз.

Как будет сказано ниже, электроны полярного сияния испускают электромагнитное излучение звукового и радиочастотного диапазона. Между тем, в отличие от протонов, они не дают характеристических оптических эмиссий, которые можно было бы наблюдать с Земли. И только тогда, когда на высоты, превышающие 100 км, где действительно существуют потоки частиц, на ракетах были подняты соответствующие при-

*) По современным данным не 200 *релеев*, а ~800 *релеев*.

***) Эти оценки получены в предположении, что эффективность излучения бальмеровских линий атомами водорода с энергиями около 1 *кэв* в атмосфере почти столь же велика, как при энергии ~10 *кэв*. В настоящее время известно, что эта эффективность очень быстро спадает с уменьшением энергии частицы, так что для создания указанной интенсивности линии Н_β требуется значительно больший поток протонов малой энергии (см. Ю. И. Гальперин, И. А. Полуэктов, И. И. Собельман, Геомагн. и аэрон. 6 (4) (1966)).

боры вроде счетчиков Гейгера и сцинтилляционных детекторов, удалось непосредственно зарегистрировать эти частицы.

Первое измерение было произведено в 1953 г. в северной зоне полярных сияний группой под руководством Дж. Ван-Аллена из Университета штата Айова. Она производила широтную съемку космического излучения с помощью счетчиков Гейгера, поднятых вверх на ракетах, которые запускались с аэростата. В зоне полярных сияний был обнаружен «аномальный» избыток потока частиц⁹. Все эти наблюдения с помощью ракет производились в дневное время, и избыточный поток не связывался непосредственно с сияниями, а лишь вообще с зоной сияний.

В феврале 1958 г. во время Международного Геофизического Года две группы исследователей пускали на ракетах приборы прямо в видимые полярные сияния и таким образом одновременно наблюдали и причину и следствие, т. е. потоки частиц и свет полярного сияния¹⁰. Ими было доказано, что в ряде случаев количества электронов с энергиями порядка 10 кэв, бомбардировавших атмосферу, было достаточно для возбуждения видимого сияния. Оказалось также, что электронные потоки были наиболее интенсивны в местах наиболее яркого свечения и что они, подобно сияниям, сильно варьировали во времени и пространстве. Таким образом, особая горизонтальная форма сияния (вроде приведенных на рис. 3 и 6) обусловлена формой или морфологией электронного пучка. Однако, с чем связана эта форма пучка, неизвестно. В отличие от электронов, потоки протонов относительно постоянны во времени и пространстве и несут слишком мало энергии для поддержания ярких форм сияний. Измерения энергетических спектров протонов и электронов показали, что у электронов спектры гораздо сильнее меняются от полета к полету, чем у протонов. Согласно проведенным позднее на спутниках одновременным измерениям света сияний и возбуждающих их частиц⁴, электроны вторгаются в атмосферу с высот, превышающих 1000 км. Это означает, что источник электронов должен находиться в магнитосфере², но высота его пока еще не определена.

При своем замедлении в атмосфере электроны полярных сияний, подобно любым другим заторможенным электронам, испускают рентгеновское тормозное излучение, гораздо более проникающее, чем сами электроны. Так, сами электроны не проникают ниже высот около 90 км, в то время как вызванные ими рентгеновские лучи могут опускаться до высот порядка 30 км. Потери электронов малой энергии в атмосфере обусловлены главным образом многочисленными далекими столкновениями с составляющими атмосферу атомами и ядрами, которые испускают при этом свет сияния, и только около $0,1\%$ энергии частицы переходит в тормозное излучение*). Несмотря на это некоторые группы исследователей все же пользовались поднятыми на аэростатах детекторами рентгеновского излучения типа сцинтилляционных счетчиков, которые оказались мощным орудием исследования вторжения электронов в атмосферу. В такого рода исследованиях¹¹ коэффициент преобразования, при котором 10^5 электронов/см²сек дают 1 квант/см²сек**), обычно справедлив с точностью до коэффициента 3. Андерсон обнаружил повторяющиеся импульсы рентгеновского излучения длительностью около $0,2$ сек при частоте повторений раз в секунду. Причиной такого эффекта должны служить временные изменения первичных электронов, а это указывает,

*) Этот коэффициент пропорционален энергии электронов.

**) Имеются в виду лишь кванты рентгеновского излучения с энергией ≥ 25 кэв, которые могут регистрироваться описанной методикой, поэтому коэффициент преобразования по отношению к полному потоку частиц меньше, чем указанный выше.

что в магнитосфере происходит процесс систематического динамического ускорения, который пока еще не получил объяснения.

Данные, полученные одновременно на Аляске и на острове Макуори с помощью детекторов, поднятых на аэростатах, показали, что одинаковое вторжение электронов имеет место одновременно в обоих полушариях в так называемых сопряженных районах, расположенных на противоположных концах линий магнитного поля¹¹. Эти и другие исследования явлений, связанные с полярными сияниями, говорят о том, что между обоими полушариями должна существовать «связь», например, в виде замкнутых линий магнитного поля. Однако в идентичности самих видимых сияний сопряженных районов нет уверенности. Так как это обстоятельство имеет существенное значение для разрешения вопроса о том, находится ли источник электронов сияний на «разомкнутых» или «замкнутых» линиях поля (см. рис. 2), оно будет рассмотрено ниже.

Земная атмосфера ниже сияний должна служить существенным источником рентгеновского излучения, испускаемого в пространство.

ИОНИЗАЦИЯ

В высоких широтах основным источником ионизации является бомбардировка составляющих атмосферы заряженными частицами большой энергии и тормозным излучением. Обычные источники ионизации (солнечный свет, солнечный ультрафиолет и рентгеновские лучи), образующие дневную ионосферу более низких широт, поддерживают также и ионосферу зоны сияний и полярных районов. Однако временами бомбардировка частицами создает такую интенсивную дополнительную ионизацию, которая может вызвать сильное поглощение посылаемых с Земли радиоволн или даже «блэкаут» радиосвязи. Возможно также быстрое, периодически повторяющееся замирание сигналов от космических источников радиоизлучения, аналогичное мерцанию видимых звезд. (Коэффициент преломления меняется здесь в небольших областях, в первом случае — из-за аномальной плотности электронов, а во втором — из-за аномальной плотности атмосферы. И этот изменившийся коэффициент преломления заставит данную область действовать, как линза, отклоняющая волну.) В этих условиях возможно поглощение космических радиосумов, и измеренная с помощью риометра (прибора, измеряющего относительную непрозрачность ионосферы в радиодиапазоне) величина истинного поглощения в децибелах позволяет оценить дополнительную ионизацию. Высота, на которой возникает эта повышенная ионизация, является определяющим параметром в обычных исследованиях на частотах в окрестности 30 *Мгц*. Относительно весьма эффективны также электроны большей энергии (скажем, энергии $E \geq 40$ *кэв*), которые могут проникать до более низких высот. Таким образом, существует сравнительно тесная связь между потоками рентгеновского излучения и уровнями поглощения, найденными с помощью риометра. Согласно имеющимся данным, пульсирующие и пламенные сияния более тесно связаны с сильным и меняющимся поглощением, чем другие формы сияний⁵. Однако проведенных ракетных измерений недостаточно для решения вопроса о том, соответствуют ли спектры таких переменных сияний более жестким спектрам электронов или большим потокам энергии.

Ионосферная станция дает более детальные данные об ионизации на больших высотах, чем риометр. Ионосферная станция посылает вертикально вверх импульсы с частотами, плавно меняющимися в пределах

от 1 до 20 *Мгц*, и эти импульсы отражаются от тех областей, где плотность электронов такова, что плазменная частота f_p равна частоте волны f (в *гц*). Так как в этом случае концентрация электронов имеет вид

$$N_e = 1,24 \cdot 10^{-8} \times f_p^2 = 1,24 \cdot 10^{-8} \times f^2, \quad (2)$$

зная частоту отраженного сигнала, можно оценить концентрацию (в *электронах/см³*). Исследования с помощью ионосферных станций обнаружили, что во время полярных сияний на высотах около 100 км появляется дополнительный слой ионизации, получивший название спорадического слоя E или E_s. Однако связь этого слоя с видимым сиянием пока еще не выяснена.

Ионосферные станции применялись также для того, чтобы показать, что на широтах сияний в период усиления магнитной активности и активности полярных сияний верхние области ионосферы — слой, расположенные на высотах порядка 200 км и выше, — поднимаются вверх. Предполагается, что это вызвано нагревом атмосферы, который наблюдался в последнее время другими методами.

Выше уже упоминалось, что радиозвезды как бы мерцают вследствие иррегулярности ионизации в верхних слоях атмосферы. Подобные эффекты наблюдаются также и в отношении радиосигналов, посылаемых со спутников. Мерцание характеризуется двумя параметрами, доступными измерению: частотой и величиной. Частота, согласно предположениям, является мерой числа пятен избыточной ионизации и их движений, а амплитуда — мерой аномальной плотности в каждом пятне. С усилением магнитной активности по всему земному шару частота мерцаний, по-видимому, повышается. Частота и амплитуда повышаются также при активности полярных сияний в данной области. Согласно оценке¹², высоты, на которых имеются иррегулярности ионизации, вызывающие дифракцию радиоволн, соответствуют в ионосфере слою F и выше, т. е. равны примерно от 150 до 1000 км, хотя выше 600 км иррегулярностей сравнительно мало.

РАДИОСИЯНИЯ И СИЯНИЯ, ОБНАРУЖИВАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАТОРОВ

Радиоволны с частотами от десятков до тысяч *Мгц* отражаются на высотах порядка 100 км от областей, которые можно, грубо говоря, связать с видимыми сияниями. Однако в деталях эта связь оказывается спорной. Общеизвестным считается следующее⁵: «сияние представляет собой в основном испускаемое атмосферой излучение; радиосияние определяется в основном ионизацией, отражающей радиоизлучение. Возбуждение излучения требует активных атомных процессов, среди которых одним из самых важных является ионизация. Освобожденные электроны, вызывающие характерные радиоотражения, образуют радиосияния».

Действующий здесь механизм отражения не имеет однозначного истолкования, поскольку существуют альтернативные объяснения^{5, 13}: рассеяние неоднородностями меньше длины волны радиосигнала λ и отражение от поверхности больше λ *). Второй механизм для нас привычно связан с радиолокационными наблюдениями. Длина волны обычно бывает порядка метров, что соответствует частоте около 100 *Мгц*. Во всяком

*) Имеющиеся к настоящему времени данные свидетельствуют, что в большинстве случаев отражение происходит от неоднородностей ионизации длиной порядка метров и с амплитудой порядка 1%, вытянутых вдоль магнитных силовых линий. Эти неоднородности статистически распределены отдельными облаками на высотах полярных сияний. Иногда, возможно, играют роль и другие механизмы возникновения радиоотражений.

случае является общепризнанным, что отражение требует «аномальной» ионизации и наилучшее отражение получается тогда, когда волны падают перпендикулярно В. Отсюда вытекает, что в северном полушарии имеет место преимущественное отражение с севера, даже (как заметил Дайс) тогда, когда наблюдатель находится в области полярной шапки и большинство полярных сияний происходит к югу от него¹³. Эта зависимость от направления прихода волны (так называемая ракурсная чувствительность) является одной из причин, почему так трудно связать радиосияния с видимыми сияниями. В действительности коэффициент отражения совсем мал: так, например, для частот около 100 Мгц он составляет лишь одну десятитысячную от коэффициента отражения идеального отражателя тех же размеров, что и видимая структура⁵.

То обстоятельство, что радиосияния наблюдались в дневное время, впервые подтвердило, что явления, подобные сияниям, происходят не только ночью. Детекторы частиц большой энергии, поднятые на спутниках и аэростатах, также показали, что условия, необходимые для возбуждения сияний, существуют и в дневное время^{4, 11}. Таким образом, всякий постулированный механизм возбуждения полярных сияний должен генерировать частицы как днем, так и ночью. Визуальные наблюдения во время длинных ночей полярной зимы также подтверждают возможность возникновения сияний в любое время суток.

Радиосияния дают удобную меру движений их ионизации, поскольку при перемещении отражающей поверхности относительно наблюдателя частота отраженных радиосигналов смещается или уширяется вследствие доплер-эффекта. Выведенные отсюда скорости движений достигают иногда 1 км/сек, т. е. в 20 раз больше скорости движения следов ионизации, оставляемых метеорами в более низких широтах. Представляется вероятным, что движения радиосияний вызываются не местными высотными ветрами (как в случае движений метеорных следов), а смещением ионизирующего агента⁵, т. е. области ионизации, приводимой в движение непонятным образом. В видимых сияниях наблюдаются еще более быстрые поперечные движения со скоростью, превышающей 100 км/сек⁷.

Радиолюбителям уже много лет были известны радиосияния и эффективные от них отражения радиоволн в диапазоне 20—144 Мгц. Передача и прием на частоте «портативного приемо-передающего аппарата» 144 Мгц, вообще говоря, ограничены линией прямой видимости, однако при наличии радиосияний отражения от них могут оказаться достаточными для осуществления дальнего приема. (В отсутствие сияний плотность электронов в ионосфере настолько мала, что очень высокие частоты порядка 144 Мгц проходят через нее, а не отражаются вниз по направлению к приемнику, как это имеет место на более низких частотах («коротких волнах») радиоволн (см. формулу (2), приведенную выше).) Как уже отмечалось выше, ракурсная чувствительность отражений ведет к тому, что радиолюбители должны направлять свои антенны на север, а не навстречу друг другу. С изменением ионизации сияния принимаемый сигнал периодически замирает, однако, несмотря на это, возможно вести прием на необычайно больших расстояниях.

МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

О существовании связи между сияниями и магнитной активностью^{5, 14} известно уже больше двухсот лет. Эта связь обнаруживается как в планетарном, так и в локальном масштабе.

Во время сильных магнитных бурь, возмущающих все геомагнитное поле, когда на уровне Земли изменения могут достигать 1%, и с кото-

рыми связано весьма значительное ускорение частиц, яркие полярные сияния можно наблюдать даже в низких широтах¹⁴. Магнитные возмущения возможно наблюдать на Земле даже у экватора (хотя здесь они слабее)*). Однако лоренцева сила заставляет ускоренные электроны двигаться по спирали вокруг линий магнитного поля, и поэтому они вызывают сияние только у основания линий поля, проходящих сквозь активные области возмущения.

Было проведено много исследований локальной связи между сияниями и магнитной активностью. Локальные магнитные медленные вариации, которые совершаются за несколько минут и имеют структуру, более или менее повторяющуюся от раза к разу, по-видимому, частично вызываются токами в ионосфере на высотах порядка 100 км и частично токами, наведенными локально в Земле. Например, Хеппнер¹⁵ обнаружил, что когда дуга сияния медленно двигалась над его обсерваторией, то изменение местного магнитного поля соответствовало наличию тока в дуге. Рассмотрению подверглись различные модели этого тока^{5, 14}. В дуге сияния, вероятно, локализованы большие токи, так как бомбардировка частицами, такими, как электроны большой энергии, вызывает увеличение ионизации, а следовательно, и проводимости. Однако, чем вызываются эти токи, с уверенностью сказать нельзя. Кроме того, такой ток должен где-то замкнуть электрическую цепь, но имеет ли это место в ионосфере или высоко в магнитосфере¹⁶, достоверно неизвестно. Для дуги, согласно подсчетам, типичные токи порядка 10^5 а сконцентрированы в горизонтальной «трубе» диаметром около 10 км. Считают, что пиковые значения этих токов могут достигать величин от 1 до 0,1 мка/см². В отличие от горизонтальных токов, предполагается, что вертикальные токи, обусловленные потоком бомбардирующих электронов, меньше 10^{11} электронов/см²сек, даже если пренебречь нейтрализующим действием потока протонов меньше 0,01 мка/см².

Кроме медленных локализованных изменений вблизи сияний, геомагнитное поле испытывает еще по всему земному шару быстрые колебания с периодом от секунд до долей секунды¹⁷. Эти колебания распространяются на большие расстояния и обнаруживаются по всему земному шару, даже в низких магнитных широтах. Так как амплитуда этих колебаний обычно мала (меньше 0,1 гаммы или 10^{-6} гс), в то время как земное поле вблизи поверхности составляет от 0,3 до 0,6 гс, эти колебания получили название микропульсаций. В зонах полярных сияний амплитуда этих колебаний достигает иногда во время сияний десятков гамм. Полагают, что некоторые микропульсации обязаны своим происхождением гидромагнитным волнам, т. е. колебаниям геомагнитного поля, вызванным взаимодействием между иррегулярным солнечным ветром и внешними областями геомагнитного поля. Наблюдаются также микропульсационные бури, которые, по-видимому, связаны с локализованными флуктуациями света полярного сияния, с поглощением в ионосфере и другими эффектами, обусловленными бомбардировкой частицами. Была высказана мысль¹⁷, что эти бури вызываются не гидромагнитными волнами, а меняющимися локализованными токами в ионосфере. Крайне необходимо провести на спутниках исследования этих магнитных флуктуаций над ионосферой, так как она их ослабляет и изменяет.

На рис. 1 среди магнитных возмущений приведены также токи в Земле. Во время сильных магнитных возмущений, когда в ионосфере течет большой ток, в Земле и в локализованных проводниках под Землей также

*) В среднем изменение горизонтальной составляющей H даже больше в низких широтах, но нерегулярные колебания резко возрастают с широтой.

наводятся токи. Токи в Земле обычно определяются по измеренной разности потенциалов между двумя точками, удаленными одна от другой на несколько километров, причем эти потенциалы могут достигать долей вольта на километр. Так как разность потенциалов можно измерять на концах телеграфного кабеля длиной порядка 100 км, удалось установить в очень многих случаях причинную связь между появлением очень ярких сияний и перегоранием предохранителей в телеграфной линии.

НАГРЕВ АТМОСФЕРЫ

Бомбардировка атмосферы заряженными частицами большой энергии не только возбуждает ее составляющие, так что они либо испускают свет, либо ионизируются, но также сообщает им некоторое количество дополнительной кинетической энергии и нагревает их. По подсчетам Чемберлена⁵, в ярком сиянии балла III на тепло рассеивается около $60 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$. На высоте, превышающей 110 км, в столбе с основанием в 1 см^2 содержится около $2 \cdot 10^{18}$ атомов и молекул, и, если предположить, что каждая частица получает одинаковую долю тепла, оказывается, что в среднем прирост тепловой энергии в таком сиянии составит приблизительно $2 \cdot 10^{-5} \text{ эв/сек}$.

Нормальная температура (T) частиц равна $\sim 300^\circ \text{ К}$, или около 27° С , что соответствует тепловой кинетической энергии (kT) $\sim 3 \times 10^{-2} \text{ эв}$ (здесь k — постоянная Больцмана). Таким образом, если за это время не произойдет заметного охлаждения, то примерно за 10^3 сек они нагреваются до температуры, в два раза превышающей первоначальную. Согласно подсчетам, для охлаждения (которое происходит через излучение, отвод тепла вниз вследствие теплопроводности и гравитационные волны) требуется несколько часов, т. е. во много раз больше, чем на нагрев. Итак, в ярких сияниях возможность заметного временного локализованного нагрева под действием бомбардировки частицами представляется правдоподобной⁵.

«Аномальный» нагрев в зоне полярных сияний недавно был дважды проверен экспериментально*). Бламон и Лори¹⁸ выпускали из ракет «Найк-Апач» натриевое облако и по измеренной ширине резонансной линии, возбужденной солнечным светом, определяли температуру на большой высоте (при повышении температуры атомы движутся быстрее, что вызывает доплеровское уширение резонансной линии). В контрольных опытах температура на высоте около 125 км была равна примерно 340° К . Однако в одном случае за 25 минут температура поднялась от $380 \pm 10^\circ \text{ К}$ до $950 \pm 150^\circ \text{ К}$. Между тем за это время не наблюдалось ни интенсивных эмиссий от видимых сияний, ни магнитных возмущений, так что причина нагрева осталась загадкой.

В другом относящемся сюда случае исследованию подверглось изменение торможения спутника «Инджун-III» в атмосфере, когда его перигей находился на высокой широте и происходила магнитная буря. В своих предыдущих исследованиях Яккия и Слоуей определили нагрев атмосферы в низких широтах во время магнитных возмущений, а затем, пользуясь данными о торможении спутника «Инджун-III», нашли, что в зоне сияний нагрев был относительно сильнее в 4–5 раз. Они вывели количественное эмпирическое соотношение¹⁹ между изменением температуры атмосферы ΔT (выведенной из изменения торможения) и величиной магнитного возмущения, измеренной по обычному индексу $\Delta \alpha_p$ по

*) Впервые разогревание верхней атмосферы во время полярных сияний было обнаружено путем интерферометрических измерений красной линии кислорода в Лопарской Т. М. Мулярчик (Изв. АН СССР, сер. геофиз. З, 449 (1960)).

формуле

$$\Delta T (^{\circ}\text{K}) = c \Delta \alpha_p; \quad (3)$$

здесь c равно около 1,1—1,2 в низких широтах и около 5 в зоне сияний.

Нагрев атмосферы во время возмущений магнитного поля и полярных сияний может быть осуществлен путем различных механизмов. Одним из них, как уже упоминалось выше, является бомбардировка частицами, приведенная на схеме рис. 1 в качестве причины нагрева. Другим может служить поглощение гидромагнитных волн в ионосфере. Возможен также нагрев джоулевым теплом, выделяемым токами в ионосфере. Относительно двух последних эффектов экспериментальных данных нет, но измерения потоков частиц указывают, что первый из них может играть важную роль, особенно в зоне сияний.

В связи с зависимостью этого нагрева от широты возникает новая проблема переноса тепла по всему земному шару, поскольку в спокойное время температуры на различных широтах, по существу, одинаковы^{18, 19}. Хайнс указал, что гравитационные волны — колебания земной атмосферы, распространяющиеся со скоростью звука, — могут дать подходящий механизм переноса тепла, приводящий к широтному равновесию через несколько часов после того, как нагрев прекратился²⁰. Таким образом, при изучении теплового баланса Земли необходимо включить в рассмотрение также и нагрев в зонах полярных сияний. Прямой нагрев Солнцем, как хорошо известно, сильнее всего в низких широтах, где действию Солнца подвергается пропорционально большее перпендикулярное сечение. А нагрев от полярного сияния интенсивней всего в высоких широтах, но и там он гораздо слабее нагрева от солнечного света в дневное время.

Те, кто наблюдал полярные сияния, иногда слышали звуки, похожие на шелест и треск, громкость которых менялась с изменением яркости сияния. Между тем яркие сияния происходят на таких больших высотах (около 100 км), где плотность атмосферы очень мала (около 10^{-6} атм при нормальной температуре и нормальном давлении), поэтому слышимый высокочастотный звук не может ни генерироваться там, ни распространяться оттуда. Чемберлен⁵ утверждает, что, если даже наблюдавшийся эффект действительно существует (в чем он сомневается), он должен вызываться каким-то неизвестным явлением, происходящим вблизи поверхности Земли и связанным с сиянием. Иногда высказываются мысли о том, что во время очень сильных сияний большие изменения геомагнитного поля могут наводить в проводах и проводниках вблизи Земли большие электродвижущие силы, способные вызвать образование короны или электрических зарядов, сопровождающихся излучением слышимых звуковых волн.

Полярные сияния, несомненно, испускают инфразвуковые эмиссии²¹ с периодами от 10 до 100 сек (предельно низкий звук, воспринимаемый нормальным человеческим ухом, имеет период около 0,1 сек). При слабых шумах, создаваемых местными ветрами, яркие видимые сияния, а также сияния, присутствие которых подтверждено ионосферными данными, всегда сопровождаются инфразвуковыми волнами или колебаниями давления с амплитудой от 1 до 10 дин/см². И наоборот, в ночи, когда нет сияний, нет и таких «звуков»²¹. В качестве причины возникновения таких волн, правда, по общему признанию, очень косвенной, указывается периодический нагрев атмосферы потоками частиц порядка 100 эрг/см²сек, обнаруживаемыми в сияниях умеренной яркости. Бомбардировка частицами периодически усиливает ионизацию, а следовательно, увеличивает электропроводность; поэтому более сильные токи

могут протекать в атмосфере на нижних уровнях (согласно сделанным указаниям), а это приводит к периодическому нагреву и генерации волн давления. Благодаря длинной волне инфразвуковых колебаний отношение длины волны к среднему свободному пробегу велико даже на больших высотах, и, в отличие от слышимых звуков, инфразвуковые волны могут генерироваться в области такого нагрева и распространяться из нее.

ПЛАЗМЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Плазма представляет собой газообразный конгломерат заряженных частиц, в целом нейтральный, хотя и ионизованный. Заряженные частицы в плазме не связаны жестко, а могут при возмущениях совершать «мелкие» колебания. Примером очень горячей струящейся плазмы малой плотности служит солнечный ветер. Плазмой можно считать область, протягивающуюся от внешней части магнитосферы через области сияний, так же как и сильно ионизованные верхние слои атмосферы. В такой плазме существуют особые и своеобразные соотношения между заряженными частицами и электрическим и магнитным полями. Здесь возможны коллективные движения и колебания заряженных частиц, и с помощью модели отдельной изолированной частицы их траектории объяснить невозможно.

Чемберлен²² указал, что неустойчивость плазмы во внешней магнитосфере может вызвать ускорение, а затем осаждение частиц, которые в свою очередь служат причиной возникновения сияний. Указанный им механизм связан с низкочастотными волнами, распространяющимися в неоднородной плазме. Такая неустойчивость плазмы рассматривалась теоретически физиками, занимающимися лабораторными исследованиями плазмы.

Согласно Нишиде²³, неустойчивость плазмы, возможно, является причиной возникновения «микророльсационной бури». Такая «буря» представляет собой всплеск иррегулярных пульсаций в магнитном поле, и она обычно наблюдается в зоне полярных сияний при появлении резкой отрицательной бухты (уменьшении горизонтальной компоненты магнитного поля) около местной полуночи. Данные, полученные из измерений свечения сияний и из ионосферных измерений, свидетельствуют о том, что одновременно с такой бурей атмосфера бомбардируется интенсивным электронным пучком. Нишида считал возможным, что этот пучок, проходя через «плазму магнитосферы», передает некоторое количество кинетической энергии гидромагнитным волнам и это приводит к неустойчивости и микророльсационной буре. Он пояснил далее, что ситуация здесь аналогична случаю «убегающих электронов», наблюдавшихся в лабораторных исследованиях плазмы, проводившихся по проекту «Маттерхорн».

Несомненно, что в этих явлениях, в частности, кроется увлекательность исследований полярных сияний. Возможно, что тщательное длительное теоретическое рассмотрение всех условий в магнитосфере приведет непосредственно к объяснению процессов ускорения и осаждения частиц, вызывающих сияния. Однако возможно также, что признание получит совершенно новый механизм возникновения этих явлений, масштабы которых не позволяют моделировать их в лаборатории.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Полярные сияния излучают кроме «света» в диапазоне 10^{15} гц еще электромагнитные волны более низких частот и большей длины волны, а именно радиоволны. С полярными сияниями чаще всего ассоциируется излучение, называемое авроральными свистами. Оно наблюдается в отно-

сительно широком диапазоне частот, примерно от сотен герц до десяти килогерц.

Другое излучение ультранизкой частоты (УНЧ) носит название «хора». Первоначально оно было названо «утренним хором», так как впервые было обнаружено рано утром и казалось схожим с пением птиц. Хор состоит из дискретных эмиссий, тесно расположенных и часто перекрывающихся. Излучения УНЧ оказалось удобным разбить на две категории: свисты и дискретные эмиссии²⁴.

Излучения очень низкой частоты, подобно свистящим атмосферикам, возникающим при грозовых разрядах, можно услышать, присоединив электрическую или магнитную антенну к усилителю низкой частоты. Они сильно ослабляются в ионосфере, и притом в различной степени, и поэтому измерения их на спутниках имеют некоторое преимущество перед наземными. Подобно свистящим атмосферикам, излучения очень низкой частоты могут отражать диспергирующие свойства магнитосферы. Так, частоты, излучаемые при ударе молнии, звучат для близко находящегося человека как «треск», или атмосферная помеха в приемнике. Когда же электромагнитные волны распространяются через ионосферу и магнитосферу, направляемые вдоль линий магнитного поля волны различных частот приходят к наблюдателю в различные моменты времени с дисперсией примерно в 1 сек. И в этом случае первоначальный отчетливый треск звучит для него как долгий свист медленно меняющегося тона или частоты.

Однако, в отличие от свистящих атмосфериков, причины эмиссии УНЧ нельзя просто определить. Их существование нельзя отнести за счет действия молнии, хотя она и может дать достаточную для этого энергию, так как нельзя адекватным образом объяснить, как она может вызвать что-нибудь иное, кроме свистящих атмосфериков. Другим возможным источником энергии является поток частиц, вызывающих сияния, который может в миллионы раз превосходить потоки энергии УНЧ, а именно: от 10^{-22} до 10^{-17} *вт/см²* или от 10^{-18} до 10^{-13} *вт/см²* для типичной эмиссии с шириной полосы около 10 *кГц*⁴.

Одним из возможных механизмов преобразования энергии является эффект Черенкова, состоящий в том, что заряженная частица, движущаяся в среде со скоростью, превосходящей фазовую скорость электромагнитной волны заданной частоты, излучает волну той же частоты. Другим механизмом может служить циклотронное излучение, возникающее тогда, когда электрон движется по спирали вокруг линии магнитного поля. Таким образом, электрон непрерывно испытывает ускорение и испускает тормозное излучение. Когда наблюдатель смотрит на спираль со стороны ее края, то получается, что будто бы два противоположно направленных электрических диполя излучают на циклотронной или вращательной частоте. Так как электрон имеет компоненту движения вдоль магнитного поля и относительно наблюдателя, его эмиссия претерпевает доплеровское смещение. Основная циклотронная частота пропорциональна напряженности магнитного поля, и поэтому частота излучаемой электроном волны имеет частоту, равную килогерцам в экваториальной плоскости, а в ионосфере — порядка мегагерц. Группа из Университета в Коледже (Аляска) недавно сообщила о наблюдавшихся ею во время сияний эмиссиях с частотой порядка мегагерц. В обоих механизмах каждая из частиц, образующих сияние, излучает, как отдельный объект. Можно показать, что в таких случаях в эмиссии очень низкой частоты может быть преобразовано не больше 10^{-20} *вт/см²*²⁴. Таким образом, для объяснения наблюдаемых явлений механизмы, рассматривающие единичные частицы, недостаточны.

Объяснение, основанное на предположении о том, что электроны, вызывающие сияние, могут действовать коллективно или когерентно, потенциально более перспективно. Так, например, электромагнитная волна, имеющая компоненту своего электрического поля, параллельную \mathbf{B} , будет стремиться ускорять электроны то в одном, то в другом направлении и собирать их в «сгустки». Если электроны двигались параллельно \mathbf{B} , то эти сгустки и волна могли двигаться далее вместе и обмениваться энергией. А это приводило бы как к периодическим эмиссиям УНЧ, так и к периодическим всплескам рентгеновского излучения²⁴.

Автор считает, что в настоящее время представляется вероятным, что возбуждение частиц и их осаждение, как показано на рис. 1, являются причинами, вызывающими эмиссии УНЧ. Некоторые теоретики считают, что здесь имеет место причинная связь противоположного характера, а именно, что эмиссии УНЧ вызывают ускорение частиц и осаждение. Однако упоминавшийся выше координированный эксперимент⁴, проведенный с участием спутника, в котором было измерено количество энергии в каждой из форм, показал, что это маловероятно.

ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗНООБРАЗНЫХ ЯВЛЕНИЙ

С полярными сияниями связано так много явлений, что рекомендуется проанализировать, до какой степени перекрестные корреляции между явлениями могут оказаться полезными и до какой степени они могут ввести в заблуждение, если делать необдуманные выводы на основании только того, что данные явления происходят в одно и то же время в одном и том же месте. В геофизике найдется много примеров, когда теории связей между причиной и следствием выводились на основании выбора *ad hoc* аргументов в пользу таких совпадений. Кинсмен дал блестящую критическую оценку метода этого рода²⁵.

Кинсмен рассмотрел в своем анализе работу «Роль Гольфстрима в прогнозе распределения айсбергов в северной части Атлантического океана». В этой статье, посвященной айсбергам, приводится коэффициент корреляции 0,65 между аномалиями средней месячной температуры в Киуэст (Флорида) и сосчитанным числом айсбергов, обнаруженных за месяц в Атлантическом океане к югу от широты 48° N. Эта корреляция затем использовалась для подкрепления утверждения о том, что флуктуации в системе Гольфстрима являются единственной причиной, ответственной за распределение айсбергов. Между тем, согласно общепринятому мнению, причин много и связаны они между собой сложным образом. Кинсмен пытался найти более высокий коэффициент корреляции между айсбергами и каким-нибудь другим параметром, который определено не состоит с ними в причинной связи. Он взял просто число запятых на печатную страницу оригинальной статьи и сопоставлял попарно число айсбергов за каждый год начиная с 1942 по 1951 г. с числом запятых соответственно на каждой странице со 111-й по 102-ю и получил коэффициент корреляции —0,81. В своем заключении Кинсмен говорит: «Это значительно лучше, чем 0,65, однако никто не станет утверждать, что запятые являются причиной появления айсбергов».

Поэтому при поисках причинной связи между явлениями, сопровождающими полярные сияния, необходимо с большой осторожностью отнестись к «статистике айсбергов». В исследованиях полярных сияний проблема оценки статистической значимости данного открытия представляет большие трудности, так как здесь нет контроля и невозможно ни воспроизвести исследуемые явления, ни повторить эксперимент. Между тем в основе статистических проверок значимости как раз лежит

повторение экспериментов. Таким образом, физик, изучающий явления, связанные с сияниями, находится в странном полумире, в котором ученый лишен возможности действовать по своему усмотрению, так как, согласно Аристотелю, предметом науки является то, что происходит всегда или большую часть времени, в то время как уникальные явления принадлежат истории²⁵.

Некоторые корреляции, хотя и не совсем понятные, могут все же оказаться полезными. Одной из них, например, является корреляция между числом солнечных пятен и явлениями, сопровождающими сияния. Она помогает планировать работы и подготовиться к проведению Международного Геофизического Года (МГГ) или Международного Года Спокойного Солнца (МГСС) (см.²⁶, рис. 5).

Примером эмпирического соотношения между двумя явлениями, далекого от причинной связи, является соотношение между поглощением (A) входящих из космоса радиоволн и локальным изменением (ΔH) горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Из анализа некоторых данных методом наименьших квадратов было получено

$$A = 6,8 \cdot 10^{-4} (\Delta H)^{1,35 \pm 0,2}, \quad (4)$$

где A выражено в децибелах и ΔH — в гаммах.

Численное значение A является функцией распределения аномальной ионизации по высоте, а это в свою очередь зависит от интенсивности и энергетического спектра бомбардирующих электронов, а также от частот радиоволн, свойств атмосферы и других переменных величин. Что касается значения (ΔH), то, согласно предположению, оно зависит от силы, относительных расположений и размеров систем гипотетических ионосферных токов. А эти последние в свою очередь зависят от степени местной ионизации и (неизвестных) механизмов возбуждения, которые, возможно, частично ответственны за характеристики вторгающегося потока частиц. (Браун и Баркус правы, уклонившись от приведенных выше предположений²⁷.)

С другой стороны, в определенных условиях справедливо явное теоретическое соотношение⁵ между поглощением (A — в дб) радиоволны с частотой f (выраженной в $M\mu$), проникающей через ионосферу в вертикальном направлении, и концентрацией электронов (N_e), частота столкновений которых в диапазоне высот dh равна ν . Это соотношение имеет вид

$$A = \frac{1,17 \cdot 10^{-14}}{f^2} \int N_e \nu dh; \quad (5)$$

здесь интегрирование производится по всей ионосфере.

В таблице приводятся данные, характеризующие явления, которые могут сопровождать яркое сияние балла III. Интересно отметить, что только около 20% всей начальной энергии частицы проявляется в виде таких известных процессов, как тепло и излучение света. Необходимо провести адекватное рассмотрение энергетического баланса, в которое вошли бы также все остальные пункты таблицы и рис. 1.

ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ

Чтобы избежать опасности пользоваться статистическими корреляциями, не выражающими причинных связей, необходимо произвести одновременно координированное исследование такого «явления» конкретного полярного сияния. Признание необходимости следовать этому принципу привело к созданию вблизи зоны полярных сияний комплексных геофизических обсерваторий, таких, как Геофизический институт при

Приблизительно подсчитанные количественные данные, характеризующие явления, приведенные на рис. 1 для яркого сияния балла III

Явление	Количественные данные
Солнечный ветер ¹	700 км/сек и 10 частиц/см ³
Искаженная магнитосфера ^{2, 3}	Радиальное расстояние до магнитопаузы в направлении Солнца равно от 8 до 10 радиусов Земли (от 50 000 до 65 000 км)
Осаждение частиц ^{4, 10}	400 эрг/см ² сек и 10 ¹⁸ эрг/сек, считая по всему земному шару
Пояс радиации ⁴	Общее увеличение интенсивности излучения электронов малой энергии и протонов на расстояниях $R \geq 5R_e$
Эмиссии ультранизкой частоты ^{4, 24}	10 ⁻⁶ эрг/см ² сек в диапазоне от 1 до 10 кгц
Бальмеровские эмиссии ⁵	10 ¹⁰ фотонов/см ² сек для 6563 Å, 3·10 ⁹ для 4861 Å и т. д.
Свет полярного сияния ⁵	20 эрг/см ² сек, включая 10 ¹¹ фотонов/см ² сек для 5577 Å
Поток тепла и нагрев ^{18, 19}	60 эрг/см ² сек и 0,2° С/сек
Звук ²¹	От 1 до 10 дин/см ² для периодов от 10 до 100 сек
Рентгеновские лучи на высотах, доступных аэростатам ¹¹	Десятки фотонов/см ² сек с энергиями в десятки кэв (резко зависят от энергетического спектра электронов)
Понизация ⁵	7 и 10 ¹² пар ионов/см ³ сек, дающих максимальную плотность электронов около 5·10 ⁶ см ⁻³
Поглощение космических радиоволн ²⁷	Несколько дб (очень сильно зависит от радиочастоты и энергетического спектра электронов)
Магнитное возмущение ^{14, 15}	10 ⁻² гс, или изменение поля на поверхности Земли ниже области сияния примерно на 1%
Микропульсации ¹⁷	10 ⁻⁵ гс с периодами порядка секунд
Струйные токи ¹⁶	10 ⁵ а для локализованных форм при принятом для высоты около 100 км поперечном сечении 10 км
Земные токи ⁵	Потенциал порядка 1 в/км

Университете на Аляске и антарктические исследовательские базы. Здесь рассматриваются лишь наблюдения, проводившиеся на спутниках по тому же принципу, а именно на спутниках серии «Инджун», в частности «Инджун-III» ⁴, и на нескольких спутниках, двигавшихся по полярным орбитам ²⁸.

Спутник «Инджун-III» был ориентирован вдоль силовых линий с помощью магнитов. Установленные на нем фотометры были направлены вниз вдоль вектора магнитного поля В для определения интенсивности света полярного сияния на длинах волн 3914 и 5577 Å. Детекторы частиц с различными характеристиками были обращены вверх вдоль В с целью измерить поток и энергию вторгающихся частиц, вызывающих сияния. Другие детекторы частиц, предназначенные для наблюдений частиц, отражающихся на высотах спутника, т. е. частиц, захваченных в ловушку (рис. 8), устанавливались перпендикулярно В. Усилитель низкой частоты с рамочной антенной позволял измерять мощность и частотный спектр электромагнитного излучения очень низкой частоты в диапазоне примерно от 700 гц до 10 кгц.

На рис. 9 приведены типичные результаты наблюдений. На основании этих и других измерений ⁴ было сделано заключение о том, что сияния происходят на высокоширотной границе захвата, которую они, вероятно, и определяют (рис. 9). Однако, происходят ли сияния внутри,

или как раз вне этой границы, или они просто перескакивают через нее, точно неизвестно. Иначе говоря, точно неизвестно, действует ли механизм ускорения частиц, вызывающих сияния, на последних замкнутых



Рис. 8. Иллюстрация к использованию спутника, ориентированного относительно линий геомагнитного поля, для исследования сияний, вызывающих их вторгающихся частиц и связанных с ними частиц, захваченных в ловушку.

Эта методика была с успехом применена на спутнике «Инджун-III» и будет применяться также, как здесь показано, на спутниках «Сова» Университета Райса (Rice), недавно утвержденных Национальным комитетом по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАОА) в качестве первых спутников университета, предназначенных для научных исследований. 1 — силовые линии магнитного поля; 2 — счетчики Гейгера и т. п.; 3 — вторгающиеся частицы; 4 — захваченные в ловушку частицы; 5 — сияние; 6 — фотометры и телевизионная система; 7 — намагниченный стержень; 8 — «Оул» («Сова»).

или на первых разомкнутых линиях магнитного поля либо перескакивая через них (см. рис. 2). Решение этого чрезвычайно важного вопроса представляет большие трудности.

Исследования на спутниках «Инджун-III» показали также, что угловое распределение электронов большой энергии ($E \gtrsim 40$ кэв) выше сияний приближается к изотропии вдоль верхнего полушария на высотах в окрестности 1000 км. Таким образом, поток квазизахваченных электронов (с питч-углами около 90° , которые должны отражаться на высотах, близких к высоте спутника) возрастает с возрастанием потока вторгающихся частиц. Эти и другие исследования на больших высотах привели к заключению⁴, что неизвестный механизм ускорения, инжектирующий электроны, вызывающие сияния, вероятно, инжектирует также и электроны в пояс радиации (см. рис. 1).

Между тем после открытия пояса радиации высказывалось обратное предположение, а именно, что он является непосредственно источником (или причиной) частиц, вызывающих сияния. Исследования на спутниках «Инджун-III» подтвердили также, что выше сияний количество энергии, проявляемой в виде излучения УНЧ, составляет лишь одну миллионную часть энергии в пучках электронов или даже еще менее. Таким образом, если, вообще говоря, существует причинная связь между этими двумя явлениями, то скорее всего частицы излучают очень низкие частоты, а не излучение очень низкой частоты ускоряет частицы, как это иногда предполагается.

Важным результатом исследований на спутнике «Инджун-III» было также доказательство, что всегда кроме непосредственно сияния имеет

место также вторжение электронов внутрь магнитосферы. Интенсивность полярных сияний часто бывает ниже порога видимости, т. е. меньше 1 килорейля, однако они все же всегда существуют. А это означает, что

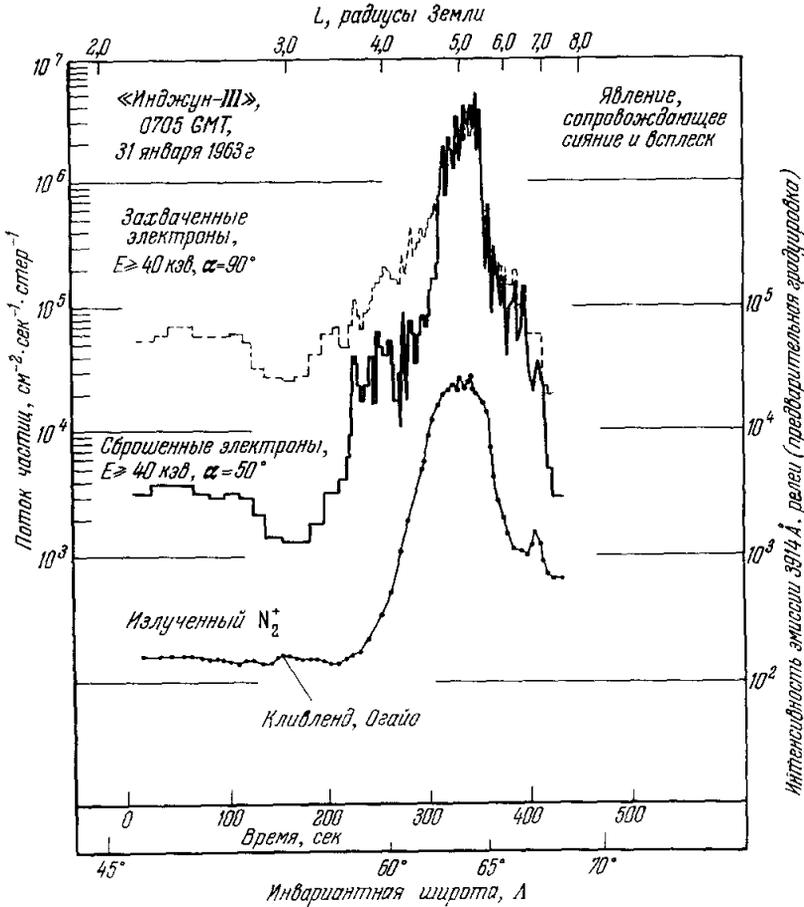


Рис. 9. Измерение характеристик, связанных с сияниями; получены с помощью 23 детекторов, установленных на спутнике «Инджун-III» с магнитной ориентацией. Фотометр, предназначенный для исследования сияния, был направлен на север, вниз к Земле, так что, пролетев над Северной Америкой, он сначала зарегистрировал огни города Кливленд, а затем яркое сияние. В низких широтах поток захваченных частиц был гораздо больше потока вторгающихся электронов, но в области сияния они оба сильно возросли и почти сравнялись. За пределами сияния (т. е. за «границей захвата») оба они сильно уменьшились.

механизм ускорения и инжекции частиц всегда существует, а не представляет собой «из ряда вон выходящего» явления. Электроны, обнаруженные во время упомянутых выше исследований на ракетах, пускавшихся с аэростатов, были как раз такими вторгавшимися электронами.

Комплексные исследования группы фирмы «Локхид»²⁸ состояли из измерений на спутниках потоков частиц над сияниями и наземных и самолетных измерений света сияния и распространения радиоволн. Телеметрические показания принимались со спутника на самолете, летавшем под ним, но параллельно его орбите. Происходившая при этом ионизация между спутником и самолетом влияла на распространение радиоволн. Эта ионизация вызывалась бомбардировкой частицами, и она

частично проявлялась в виде свечения полярного сияния. Детекторы частиц, установленные на спутниках, могли измерять электроны вплоть до весьма малой энергии, порядка 80 эв. При этом было обнаружено, что неизвестный механизм ускорения частиц, вызывающих сияния, сообщает любому из участвующих электронов энергию не меньше 1 кэв, или, иначе говоря, большинство электронов, постоянно находящихся в области источника, всегда обладают энергиями порядка 1 кэв, следовательно, эта область чрезвычайно сильно «нагрета».

Такие координированные исследования с участием спутников необходимы для дальнейшего изучения явлений, связанных с сияниями и происходящих в магнитосфере. Их, разумеется, необходимо сочетать с широкими наземными и ракетными опытами, которые также обладают преимуществами им уникальными преимуществами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Явления, сопровождающие полярные сияния, принадлежат ко всем основным разделам физики: теплота, свет, звук, электричество и магнетизм, атомная физика и физика плазмы. Невозможность управлять этими явлениями и воспроизводить их, а также сама чудовищность их масштабов будут привлекать в ближайшие годы экспериментаторов и теоретиков. не давая им успокоиться. Наибольшим достижением в этой области исследований была бы разработка адекватной теории локального возбуждения потоков частиц, вызывающих сияния, допускающей экспериментальную проверку. Как только это будет достигнуто, несомненно, станет возможным разобраться во всем множестве корреляций между явлениями, сопровождающими сияния, и оценить их. А до тех пор нужно рассматривать такие корреляции, как айсберги: видимые части составляют лишь малую часть всего явления, в то время как и для теоретика и для экспериментатора опасность представляют как раз большие невидимые части.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. W. Snyder, M. Neugebauer, U. R. Rao, J. Geophys. Res. **68**, 6361 (1963).
2. A. J. Dessler, Ibid. **69**, 3913 (1964).
3. N. F. Ness, C. S. Scarse, J. B. Seck, Ibid, стр. 3531.
4. Высокоширотные геофизические исследования с помощью спутника «Инджун-III» рассматриваются в ряде статей О'Брайена и др., помещенных в J. Geophys. Res. **69**, 1—90 (1964). В них описываются спутник, исследования вторгающихся электронов и вызываемые ими сияния, а также связанные с ними эмиссии УНЧ.
5. Прекрасный полный обзор явлений, связанных с сияниями, дан Чемберленом в его книге «Physics of the Aurora and Airglow» (Academic Press, New York, 1961). (Имеется русский перевод: Дж. Чемберлен, «Физика полярных сияний и излучения атмосферы», М., ИЛ, 1963.)
6. F. E. Roach and J. R. Roach, Planetary Space Sci. **11**, 523 (1963).
7. T. N. Davis and G. T. Hicks, J. Geophys. Res. **69**, 1931 (1964).
8. B. P. Sandford, J. Atmos. Terr. Phys. **26**, 749 (1964).
9. J. A. van Allen, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S. **43**, 57 (1957).
10. C. E. McIlwain, L. R. Davis, O. E. Berg, L. H. Meredith, доклады в «Space Research Proceedings», 5th International Space Science Symposium, North-Holland, Amsterdam, 1960, стр. 715, 721.
11. K. A. Anderson, Univ. Calif. Publ. UCB 64/4 (1964).
12. R. P. Vasler and R. N. de Witt, J. Geophys. Res. **67**, 587 (1962).
13. H. G. Booker, в кн. «Physics of the Upper Atmosphere» (J. A. Ratcliffe, Ed.), Academic Press, New York, 1960, стр. 355 (см. перевод: «Физика верхней атмосферы» под ред. Дж. Ратклиффа, М., ИЛ, 1964).

14. S. Chapman, в кн. «Space Physics» (D. Le Galley and A. Rosen, Eds.), Wiley, New York, 1964, стр. 226.
 15. J. P. Heppner, Can. Defence Res. Board Rep. DR 135 (1954).
 16. J. A. Fejer, J. Geophys. Res. **69**, 123 (1964).
 17. W. H. Campbell and S. Matsushita, Ibid. **67**, 555 (1962).
 18. J. E. Blamont and M. L. Lory, Nature **201**, 593 (1964).
 19. L. G. Jacchia and Jack Slowey, J. Geophys. Res. **69**, 905 (1964).
 20. C. O. Hines, Canad. J. Phys. **38**, 1441 (1960).
 21. W. H. Campbell and J. M. Young, J. Geophys. Res. **68**, 5909 (1963).
 22. J. W. Chamberlain, Ibid. стр. 5667.
 23. A. Nishida, Ibid. **69**, 947 (1964).
 24. R. A. Heliwell, критический обзор наблюдаемых явлений УНЧ и возможных вызывающих их причин в «Space Research Proceedings», 5th International Space Science Symposium, North-Holland, Amsterdam (в печати).
 25. Blair Kinsman, Tellus **9**, 408 (1957).
 26. M. Pomernantz, Science **142**, 3596 (1963).
 27. R. R. Brown and J. R. Barcus, J. Geophys. Res. **68**, 4175 (1963).
 28. R. C. Sharp, J. E. Evans, W. L. Imhof, R. G. Johnson, J. B. Reagan, R. V. Smith, Ibid. **69**, 2721 (1964).
-

