1966 г. Август *Том 89, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

550.388.8

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ *)

С. Акасофу

Почти невозможно ни передать на фотографиях, ни описать словами неземную красоту полярных сияний, мерцающих и пламенеющих на фоне ночного неба в полярных широтах. Известное почти всем по картинкам или описаниям, но очень редко видимое в тех местах, где живет большинство людей, это явление долгое время не имело удовлетворительного объяснения. К настоящему времени, особенно за последние несколько лет, когда наземные наблюдения были дополнены информацией, полученной с помощью ракет и искусственных спутников, стало возможным создать физическую картину полярного сияния, которая связывает его с крупномасштабным взаимодействием между магнитным полем, окружающим Землю, и потоком электрически заряженных частиц, распространяющихся с большой скоростью от Солнца,— так называемым «солнечным ветром». Согласно этим представлениям, магнитосфера Земли действует как гигантская катодно-лучевая трубка, которая фокусирует заряженные частицы в узкие пучки и направляет их в полярные области Земли. Полярные сияния — это движущаяся картина изображений, возникающих на флуоресцирующем экране, роль которого играет атмосфера.

Пользуясь принятой терминологией, можно сказать, что полярные сияния представляют собой флуоресцентное свечение, вызванное взаимодействием атомов и молекул верхней атмосферы и энергичных заряженных частиц, вторгающихся в атмосферу из космоса.

Вторгающимися частицами, которые отклоняются силовыми линиями геомагнитного поля, являются электроны и протоны. Верхняя атмосфера на этих высотах состоит в основном из атомов и молекул кислорода и азота. Соударяясь с вторгающейся частицей, они лишаются одного или даже нескольких электронов (т. е. ионизуются) или переходят в состояние с более высокой энергией (возбуждаются). В этом случае они возвращаются в начальное состояние, соединяясь вновь с электронами, либо, теряя энергию, они излучают кванты характерных длин волн. Таким образом, спектр полярного сияния может дать детальную информацию об атомах и молекулах верхней атмосферы, об их возбуждении и ионизации.

Для невооруженного глаза большинство полярных сияний имеет зеленый или сине-зеленый оттенок с изредка появляющимися пятнами или каймой розового или красного цвета. Возбужденные атомы кислорода вызывают как зеленое, так и красное свечение, с длинами волн соответственно 5577 и 6300—6364 Å. Ионизованные молекулы азота интенсивно излучают свет особенно в ИК и в фиолетовой области спектра, где

*) Syun-Ichi Akasofu, The Aurora, Sci. American 213 (6), 55 (1965). Перевод и примечания Ю. И. Гальперина.

расположены полосы 3914, 4278 и 4709 Å. Возбужденные молекулы азота вызывают свечение серий эмиссионных полос, которые особенно интенсивны в далекой красной области спектра между 6500—6800 Å (рис. 2).

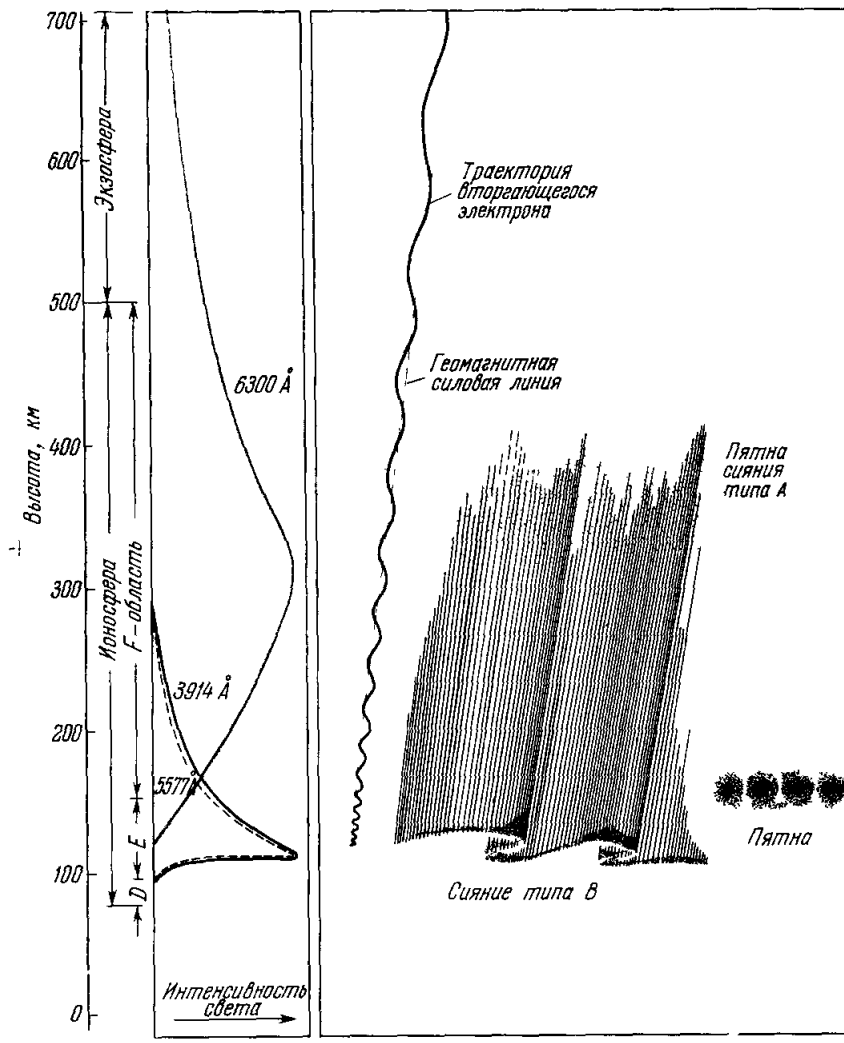

Рис. 1. Типичные формы полярных сияний показаны вместе с их обычными высотами и характерными эмиссиями.

Лентообразный тип, представленный здесь «лучистой полосой», имеет вертикальный размер в несколько сотен километров и протяженность с запада на восток не менее нескольких тысяч километров. Сама лента имеет толщину всего в несколько сотен метров. Интенсивная и активная лучистая полоса часто имеет розоватое свечение вблизи нижней границы, это называется полярным сиянием типа В. Во время наибольшей активности лентообразная форма распадается, и вслед за ней появляются облакообразные пятна. Обычно это происходит после полуночи. Когда атомы кислорода возбуждаются до уровня, с которого возможно излучение линий 6300—6364 А, темно-красные пятна сияния типа А появляются на высотах 300—400 *км*. Показана траектория энергичного электрона, движущегося по спирали вниз вдоль геомагнитной силовой линии Свечение возникает в результате соударений такого электрона с частицами верхней атмосферы

Линии кислорода 5577 А и эмиссии азота возникают в основном на высотах около 110 *км*. Свечение кислорода с длиной волны 6300 Å приходит главным образом с высот между 200 и 400 *км*.

На высотах 100 *км* часто появляется также множество атомов кислорода, возбужденных до уровня, с которого они могли бы излучать красные линии с длиной волны 6300 и 6364 Å, но спонтанная эмиссия с этого уровня происходит в среднем лишь по прошествии 100 *сек* после момента возбуждения. Весьма вероятно, что за это время возбужденный атом кислорода потеряет энергию возбуждения при соударении с другим атомом или молекулой. С другой стороны, спонтанная эмиссия с длиной волны 5577 Å (зеленый свет) происходит примерно в течение 0,7 *сек*, поэтому зеленое свечение на небольших высотах значительно сильнее, чем красное. С уве-

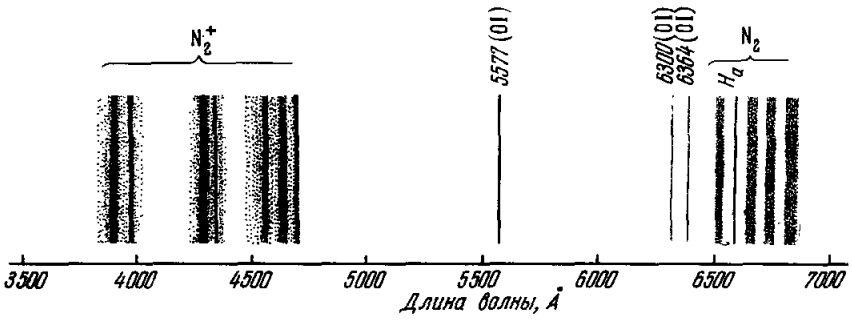

Рис. 2. Спектр полярного сияния может дать подробные сведения о типах частиц, имеющихся в верхней атмосфере, и об их возбуждении.

Возбужденные атомы кислорода излучают зеленую и красные линии с длинами волн соответственно 5577, 6300 и 6364 Å. Ионизованные молекулы азота излучают фиолетовое и синее свечение в виде группы спектральных полос с длинами волн 3914, 4278 и 4709 Å. Возбужденные молекулы азота излучают серии эмиссионных полос в далекой красной области спектра в основном от 6500 до 6800 Å, а также в УФ-области.

личением высоты соударения в атмосфере становятся все менее и менее частыми, и возникает возможность излучения красной эмиссии кислорода 6300 Å. На таких высотах, однако, плотность кислорода столь низка что красная эмиссия довольно слаба, если только поток вторгающихся, частиц не столь велик, чтобы возбудить одновременно значительную часть имеющихся атомов кислорода.

Другой слабый источник красного свечения — это излучение возбужденных атомов водорода. Первоначально в атмосфере появляются протоны (ядра водорода), которые на своем пути в атмосфере захватывают электроны и образуют атомы водорода. При соударениях или при захвате электронов эти атомы водорода приходят в возбужденное состояние и затем, при переходе в начальное состояние, излучают известные бальмеровские линии, что позволяет обнаружить их в спектре полярного сияния. Очевидно, одновременно с этим излучаются линии и других серий водорода.

Возбужденные и ионизованные состояния атомов и молекул атмосферы, которые образуют основную долю видимого света полярного сияния, создаются пучками вторгающихся электронов, которые имеют энергии менее 10 *кэв*, т. е. менее половины энергии электронов в пучке в обычной телевизионной трубке.

Энергии пучков электронов были определены в точно скоординированных наземных измерениях, которые позволили определить профили распределения интенсивностей свечения с высотой, а также при исследованиях на ракетах и спутниках, которые позволили непосредственно измерить потоки частиц, вторгающиеся в верхнюю атмосферу. Важный вклад в эти исследования внесли Мак-Илвайн (Калифорнийский универ-

ситет), О' Брайен (Университет Айовы), группа исследователей из авиакомпании «Локхид» и наша лаборатория в Университете Аляски.

Свечение полярных сияний имеет две основные формы — в виде лент и в виде облакообразных пятен. Интенсивное полярное сияние обычно развивается от первой формы ко второй. Однако многие сияния исчезают, даже не успев разбиться на пятна. Лентообразное сияние занимает в направлении восток — запад не менее нескольких тысяч *км*, а по вертикали — несколько сотен *км*. Сама лента имеет толщину всего в несколько сотен метров, из чего можно сделать вывод, что сияние такого типа вызывается узким электронным пучком, который приходит из магнитосферы в полярную верхнюю атмосферу. Ленточные формы часто появляются как многоярусные занавеси на сцене, висящие одна за другой, вытянутые через весь небосвод.

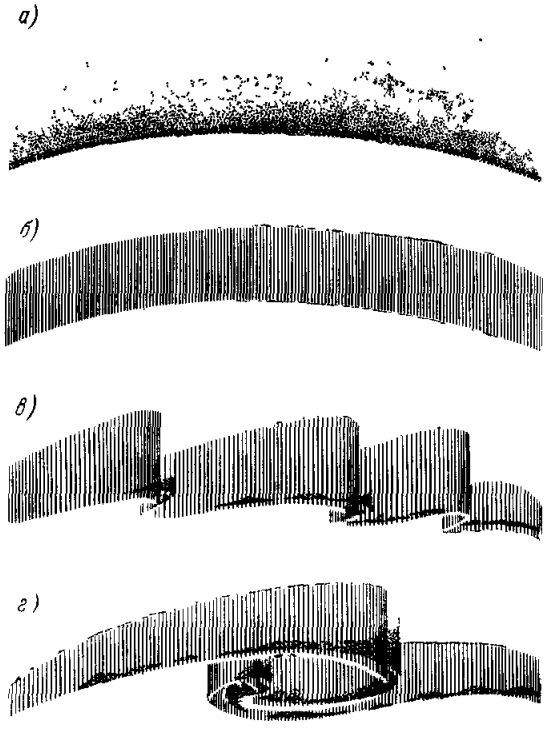

Рис. 3. Лентообразные формы свечения полярных сияний весьма разнообразны, и их можно подразделить на ряд типов в зависимости от интенсивности и подвижности.

Наиболее простая и спокойная лентообразная форма свечения называется однородной дугой (*а*) Когда лента становится несколько более активной, она образует мелкие складки и струйки и называется лучистой дугой (*б*). С ростом активности более крупные складки накладываются на мелкие, и такая лента называется уже лучистой полосой (*в*) Особенно активное сияние типа В характеризуется розоватым свечением вблизи нижней границы складчатой ленты (*г*).

Исследователи полярных сияний предложили несколько определений для того, чтобы различать разнообразные подтипы ленточных форм свечения (рис. 3). Светящаяся полоса наиболее простой и спокойной формы называется «однородной дугой»; при этом распределение интенсивности наиболее равномерное, более яркое внизу и постепенно исчезающее вверху на фоне свечения неба. Когда лента становится несколько более активной и подвижной, она образует тончайшие складки толщиной в несколько километров. Такая форма свечения кажется состоящей из отдельных вытянутых струй или лучей света, она называется «лучистой дугой». При повышении активности складки расширяются до нескольких десятков километров. Когда на большие складки налагается тонкая структура «лучей», такую форму свечения называют «лучистой полосой». Если активность продолжает возрастать, лучистая полоса образует красивую розовато-оранжевую кайму в нижней части складки (обычно это называют сиянием типа В). Наконец, если интенсивность возрастает еще больше, складки или петли расширяются до огромных размеров в сотни километров. Однако когда активность спадает, складки исчезают и лента возвращается к однородной форме. Это наводит на мысль, что однородная структура свечения представляет собой фунда-

ментальное свойство полярного сияния, а складки и спирали связаны с процессом роста активности.

Во время наибольшей активности лента распадается, после чего (чаще всего после полуночи) возникают облакообразные пятна. Сравнение результатов наблюдений в точках, разбросанных вдоль всего полярного круга, не оставляет сомнений в том, что многообразные активные образования, наблюдаемые в различных местах и в различное время, тесно связаны между собой. Например, когда на одной из станций на вечернем небе видны спокойные однородные дуги, наблюдатели на других станциях обычно также сообщают, что сияние было весьма спокойным повсюду вокруг полюса. С другой стороны, когда спокойные дуги на вечернем небе вдруг становились активными, образовывали лучистые дуги и лучистые полосы, в то же самое время, но в другом месте, на утреннем небосводе, можно было видеть, как спокойные дуги распадались на облакообразные пятна или сгустки.

До сих пор я описывал лишь наиболее типичные формы полярных сияний, но наблюдаются и многие другие разновидности, причем некоторые очень редко. К таким разновидностям относится сияние типа А, красивейшие темно-красные образования, возникающие на высотах 300—400 *км*, когда при возбуждении атомов кислорода излучается эмиссия 6300—6364 Å. Полярные сияния типа А появляются лишь несколько раз за десяток лет *). Вторгающиеся протоны часто вызывают свечение широкой, но слабой полосы беловато-зеленого свечения. Во время интенсивных магнитных бурь «среднеширотная красная дуга» появляется на широтах значительно южнее Нью-Йорка; она состоит из широкой, но не слишком интенсивной полосы свечения линий 6300—6364 Å, которую нелегко заметить невооруженным глазом. Через несколько часов после интенсивной хромосферной вспышки на Солнце вся полярная шапка подвергается бомбардировке протонами большой энергии, выброшенными из Солнца, что приводит к возникновению равномерного беловато-зеленого «свечения полярной шапки». В дополнение к описанным выше различным видам естественных полярных сияний высотные ядерные взрывы вызывали ярчайшие искусственные полярные сияния малиново-красного цвета. Однако в дальнейшем мы не будем касаться всех этих специфических видов полярных сияний.

Каковы же механизмы, вызывающие появление полярных сияний? Данные, полученные с помощью приборов, установленных на спутниках, показали, что Земля и окружающее ее магнитное поле образуют огромную полость, «овеваемую» солнечным ветром. Эта полость называется магнитосферой, в нее включаются все пояса захваченных в геомагнитную ловушку частиц (см. статью Э. Паркера «Солнечный ветер», УФН, т. 84, вып. 3, ноябрь 1964 г. и статью Л. Кахилла «Магнитосфера», УФН, т. 87, вып. 3, ноябрь 1965 г.). Магнитосфера имеет длинный цилиндрический «хвост», который возникает вследствие сноса солнечным ветром приполярных силовых линий геомагнитного поля в антисолнечную сторону. Такая идея была впервые высказана Дж. Пиддингтоном (CSIRO, Австралия). Норман Несс из Годдардского центра космических исследований на основании измерений магнитного поля со спутника недавно подтвердил существование у Земли кометообразного хвоста. Внутри цилиндрического хвоста силовые линии магнитного поля Земли сходятся вместе, образуя как бы пучок стрел. При этом силовые линии выше плоскости геомагнитного экватора направлены к Солнцу, а лежащие ниже

*) Как показал Л. С. Евлашин, красные полярные сияния типа А весьма часто наблюдались во время МГГ и МГС.

этой плоскости направлены в противоположную сторону. Поэтому экваториальная плоскость представляет собой нейтральный слой. Разгадка тайны полярных сияний, по-видимому, связана с исследованием процессов в хвостовой области магнитосферы.

Роль хвоста магнитосферы можно представить себе, сравнивая магнитосферу с катодно-лучевой трубкой (аналогия подсказана мне К. Эльви, бывшим директором Геофизического института Университета Аляски). В такой трубке электроны излучаются нагретой проволочкой и ускоряются по направлению к аноду, в котором имеется небольшое отверстие. Некоторые из электронов проникают через это отверстие, образуя тонкий пучок, который на своем пути к экрану трубки может быть отклонен электрическими полями между двумя парами пластин или, в других типах трубок, с помощью магнитных полей, создаваемых электромагнитными катушками. Пучок электронов, попадая на флуоресцирующее вещество экрана трубки, создает светящееся изображение. Таким образом, картина свечения на экране позволяет судить об изменении электрических и магнитных полей вдоль пути электронного пучка.

Точно так же смещение и изменение картины свечения полярного сияния на всем небосводе полярных широт отражает изменение магнитного и электрического полей вдоль пути электронов, движущихся по направлению к Земле. Каким-то, пока еще не выясненным способом хвост магнитосферы ускоряет электроны в магнитосфере и собирает их в лентообразные пучки, которые затем вторгаются в верхнюю атмосферу Земли. Задача исследований сейчас состоит в том, чтобы выявить конкретные процессы, которые играют роль электронной пушки, анода, отклоняющих пластин и магнитных катушек.

Ключи к пониманию этих механизмов могут быть в изменениях магнитного поля на Земле и в космосе, а также в самой картине полярного сияния. Поэтому давайте «наблюдать» за полярным сиянием, которое появляется на «экране» — небосводе полярных широт. Если двигаться на север от границы между США и Канадой, мы будем видеть полярные сияния все чаще и чаще. Максимум частоты полярных сияний находится над южной частью Гудзонова залива, а дальше к Северному полюсу частота появления полярных сияний заметно снижается. Были созданы прекрасные карты с «изохазмами»— линиями равной среднегодовой частоты появления видимых полярных сияний. Зоной полярных сияний называется узкое кольцо вдоль линии максимальной изохазмы. В южном полушарии также имеется зона полярных сияний, аналогичная северной зоне. Центром северной зоны полярных сияний является вовсе не полюс магнитного наклонения (расположенный в Канаде, около Ризольют-Бей, 73°,5N, 100° W), как это можно было предполагать, а точка на северо-западном берегу Гренландии (78°,5N, 69° W), называемая геомагнитным полюсом.

Зона полярных сияний имеет, однако, лишь смысл статистического среднего. Полярные сияния в среднем имеют тенденцию в каждый данный момент возникать в «мгновенной» зоне овальной формы, которая совпадает с почти круговой зоной полярных сияний только в области местной полуночи (рис. 4). В других местах зона овала лежит внутри полярной шапки — приполярной области, ограниченной кольцом зоны полярных сияний. Овальная зона, если смотреть на нее из космоса, казалась бы светящимся венчиком, неподвижно висящим в пространстве над геомагнитным полюсом. Земля совершает под этим овалом полный оборот за сутки, а полуночная точка овала скользит при этом вдоль круга, который совпадает с зоной полярных сияний. Представление об овальной «мгновенной» зоне является новой концепцией, возникшей в результате

объединенных исследований ученых Австралии, Англии, Дании, Канады, Норвегии, СССР, США, Финляндии и Швеции *).

Из исследований внешнего пояса частиц, захваченных в геомагнитную ловушку (в особенности по данным Ван-Аллена и Франка из Университета Айовы), можно заключить, что овальная зона полярных сияний

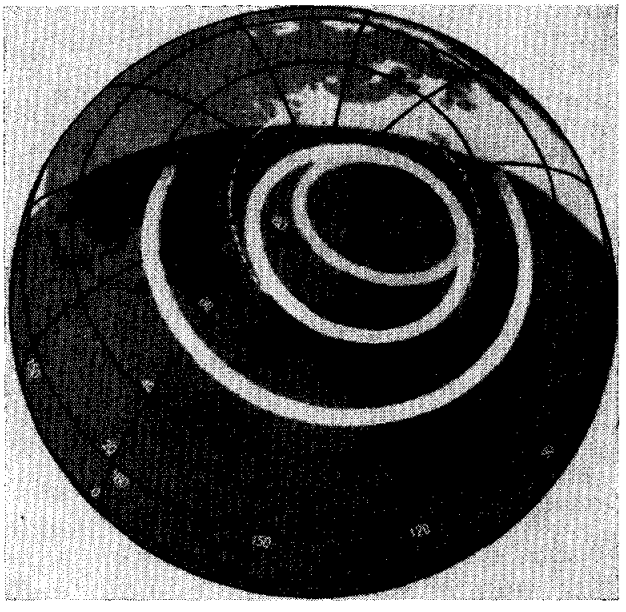

Рис. 4. Зона полярных сияний, которая определяется как узкая полоса вдоль линии максимальной среднегодовой частоты наблюдения полярных сияний (штриховая белая линия), имеет лишь смысл статистического среднего.

В каждый данный час или минуту подвижные формы полярных сияний имеют тенденцию возникать вдоль «мгновенной» зоны овальной формы, которая совпадает с почти круговой зоной полярных сияний только в точке местной полуночи. (На этом рисунке земного шара в районе Геофизического института Университета Аляски в Фейрбенксе как раз примерно полночь.) Когда солнечная активность особенно низка, овал уменьшается и становится почти кругом с центром в геомагнитном полюсе (белая точка). Когда солнечная активность несколько возрастает, овал расширяется и занимает некоторое среднее положение, эксцентричное относительно *геомагнитного полюса. Во время интенсивных солнечных и геомагнитных возмущений овал* полярных сияний смещается еще дальше к экватору.

лежит непосредственно на обращенной к полюсу стороне кольца, образованного пересечением границы внутренней магнитосферы (рис. 5) с ионосферой (которая начинается с высот около 80 *км* над Землей). Эта область пронизывается электронами с энергиями примерно в 40 *кэв* и более **). Эти электроны возникают в хвосте магнитосферы и распро-

*) Представление об овальной «мгновенной» зоне свечения вокруг геомагнитных полюсов было высказано О. В. Хорошевой и Я. И. Фельдштейном.

**) В действительности, как показали прямые измерения частиц малых энергий с помощью спутников, поток мягких корпускул значительно больше, чем поток жестких (40 *кэв*), а средняя энергия электронов составляет 20—30 *кэв*. При этом наблюдаются значительные флуктуации интенсивности и энергетического спектра вторгающихся и захваченных частиц, причем между интенсивностями тех и других замечена корреляция. Поскольку поток вторгающихся электронов и поток захваченных в ловушку электронов одного порядка, время, в течение которого все электроны, захваченные *в силовой трубке, могли бы высыпаться в атмосферу, весьма мало* — оно должно быть соизмеримо с периодом широтных колебаний электронов в силовой трубке геомагнитного поля, т. е. не должно превышать десятка секунд. Как указал В. И. Красовский, за время полярного сияния, продолжающегося десятки минут и даже иногда несколько часов, должен происходить весьма существенный обмен материалом — электронами и ионами — между внешней магнитосферой и ионосферой.

страняются вдоль границы внутренней магнитосферы *), создавая более или менее постоянное свечение там, где они встречают верхнюю атмосферу. Овальные очертания этой зоны связаны с тем, что под действием солнечного ветра магнитосфера становится асимметричной, вытягиваясь вдоль полуденного и полуночного меридиана, т. е. вдоль линии Солнце — Земля.

Размеры овала существенно изменяются в зависимости от солнечной активности. Когда солнечная активность особенно низка, полуночная область овала отступает к геомагнитному полюсу, и овал становится

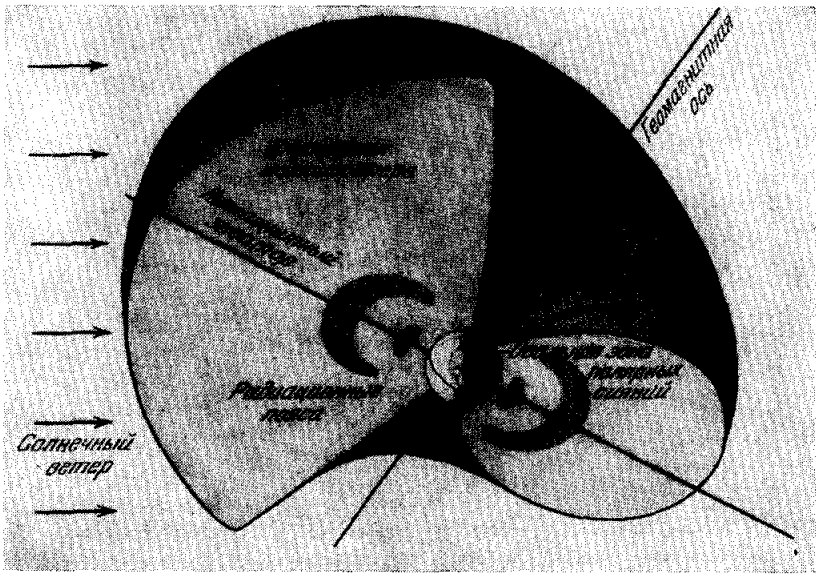

Рис. 5. Магнитосфера представляет собой огромную полость в солнечном ветре, образованную магнитным полем Земли.

Роль магнитосферы в возникновении полярных сияний состоит в том, что она представляет собой как бы гигантскую катоднолучевую трубку, которая фокусирует пучки электронов и протонов, направляя их к Земле, в районы вблизи геомагнитных полюсов. Овальный пояс полярных сияний приблизительно совпадает с кривой пересечения ионосферы, начинающейся с высот около 80 км над Землей, и внешней границы области замкнутого поля (внутренней магнитосферы). В этой области магнитосферы имеются электроны с энергиями от 40 000 *эв* и более (см. сноску на стр. 675.— *Перев.*). Огромный «хвост» магнитосферы, магнитные линии которого оканчиваются внутри полярных шапок, здесь не показан. Овальная форма зоны объясняется тем, что внутренняя магнитосфера весьма асимметрична относительно солнечного ветра и, следовательно, относительно линии Солнце —Земля.

почти круглым, а свечение его — слабым. Обычное положение овала соответствует среднему уровню солнечной активности. После значительного возмущения на Солнце овал быстро расширяется, спускаясь к экватору, причем величина сдвига приблизительно пропорциональна величине электрического тока, текущего в хвосте магнитосферы, а также величине текущего в западном направлении вокруг Земли кольцевого тока, который в это время нарастает в огромном объеме внутри магнитосферы. Распространение овала к экватору означает, что внутренняя магнитосфера соответственно сокращается. Следовательно, наблюдая изменение овала, можно судить об изменениях внутренней структуры магнитосферы.

Наиболее подвижные картины полярных сияний возникают во время сильнейших магнитных бурь, которые в свою очередь вызываются сол-

*) Эта точка зрения автора является спорной.

нечной активностью. Наиболее сильные вспышки полярных сияний, называемые полярными шквалами (polar substorm), совпадают с резким ростом интенсивности полярной системы токов в ионосфере. Такие шквалы возникают в полуночной области овальной зоны и обычно длятся два-три часа (рис. 6). Начинается шквал обычно с внезапного усиления одной из спокойных дуг. Вскоре ярко вспыхнувшее свечение в форме лучистых дуг и полос начинает резко распространяться к полюсам со скоростью около 5 *км/сек* или даже быстрее. Когда расширение к полюсам происходит быстро, лучистые полосы в полуночном секторе начинают разрываться.

Тем временем в вечернем секторе расширение полярного сияния вызывает появление крупномасштабных складок и петель, которые смещаются к западу вдоль возникших ранее дуг со скоростями около 1 *км/сек*. Подобные вихри, двигаясь на запад, обычно пересекают небосвод над Аляской и затем над Сибирью всего через 20—30 минут после того, как они впервые появились над Канадой.

В утреннем секторе полярной области дуги и полосы, которые располагались в северной части овала, также стремительно расширяются, но те, которые находились в южной части овала, часто распадаются на облакообразные пятна. Яркие полосы вместе с пятнами быстро дрейфуют к востоку. Когда вспышка сияния затухает, рассеянные «осколки» сияния постепенно вновь объединяются в спокойные однородные дуги, тянущиеся вдоль овальной зоны, восстанавливая начальную картину сияния.

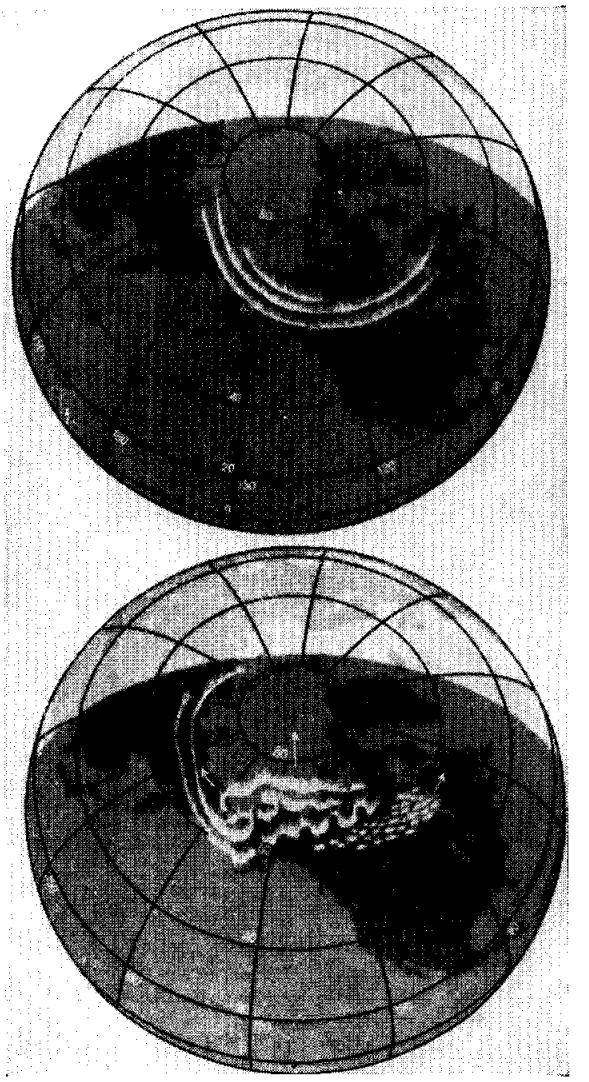

Рис. 6. Шквал полярных сияний — наиболее эффектная серия сменяющихся ярких форм свечения.

Шквал возникает во время больших магнитных бурь и совпадает с резким нарастанием интенсивности полярной системы токов. Такие шквалы начинаются в полуночном секторе овальной зоны и обычно длятся два-три часа. На этих двух рисунках изображены спокойные однородные дуги сияния до шквала (вверху) и сложная картина многих форм свечения во время максимума шквала.

По-видимому, наиболее мощная вспышка полярных сияний за последние годы произошла во время сильнейшей магнитной бури 11 фев-

раля 1958 г., которая была вызвана интенсивной хромосферной вспышкой 9 февраля. Примерно через 29 часов после вспышки на Солнце поток заряженных частиц на магнитосферу стремительно возрос. В течение нескольких часов кольцевой ток в магнитосфере неуклонно нарастал и достиг максимальной величины между 10^h и 11^h гринвичского времени 11 февраля. По меньшей мере три больших шквала полярных сияний произошли за время этого роста. В максимуме бури овальная зона сместилась так далеко к югу, что проходила вдоль линии, соединяющей

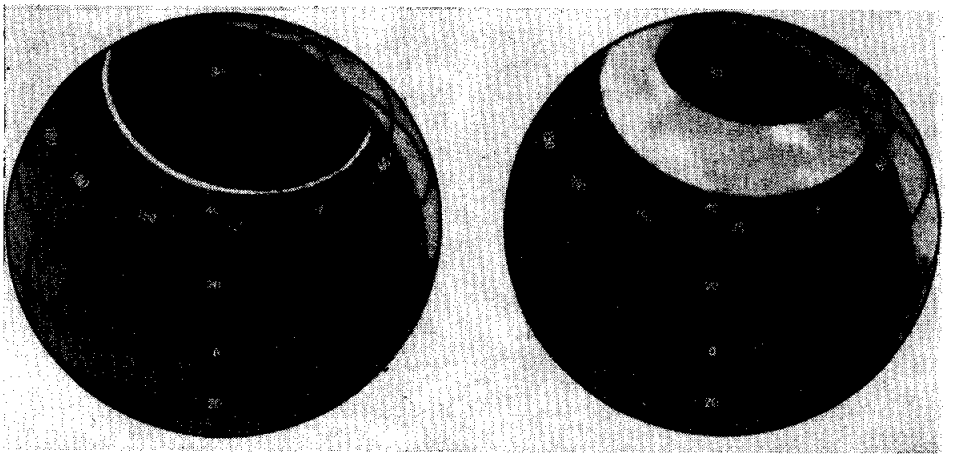

Рис. 7. Наиболее мощная вспышка полярных сияний за последние годы наблюдалась во время сильнейшей магнитной бури 11 февраля 1958 г., которая была вызвана интенсивной солнечной вспышкой 9 февраля.

К моменту $10^h20'$ гринвичского времени 11 февраля произошло не менее трех сильных «шквалов». В максимуме магнитной бури (слева) овал сияний был смещен далеко на юг, так что он проходил вдоль линии, соединяющей города Редмонд, Вермильон, Вильямс-Бей, Итака и Гановер (США). Любопытно, что никаких ярких форм свечения не наблюдалось к северу от этой линии. В это время начался четвертый шквал, и в течение 30 минут активные формы свечения распространились к северу и заняли полосу шириной около 2000 *км* (справа). Интенсивный поток рентгеновских лучей был зарегистрирован в максимуме четвертого шквала.

города Редмонд (штат Орегон), Вермильон (Южная Дакота), Вильямс-Бей (Висконсин), Итака (Нью-Йорк) и Гановер (Нью-Гемпшир). Интересно, что яркие сияния не наблюдались к северу от этой линии. Затем начался четвертый шквал полярных сияний, и в течение 30 минут яркие формы свечения распространились к северу, образовав полосу шириной около 2000 *км* (рис. 7). В ожидании магнитной бури Дж. Винклер и его сотрудники из Университета Миннесоты запустили шар-зонд над Миннеаполисом с аппаратурой для измерения реакции. Во время максимума четвертого шквала приборы зарегистрировали интенсивный поток рентгеновских лучей, возникших при соударениях электронов полярного сияния с атомами и молекулами верхней атмосферы.

Появление вспышки рентгеновского излучения представляет собой лишь одно из многих интересных явлений, сопровождающих шквал полярных сияний. Во время таких полярных сияний, например, интенсивные потоки электронов проникают в атмосферу глубже, чем обычно, и резко увеличивают ионизацию нижних областей ионосферы, известных как E- и D-области. Область E отражает короткие радиоволны, что делает возможной радиосвязь на больших расстояниях. Но когда аномальная ионизация появляется в D-области, радиосвязь часто нарушается. С дру-

гой стороны, сильная ионизация в нижней ионосфере приводит к рассеянию коротких радиоволн даже УКВ диапазона, который обычно свободно проходит сквозь ионосферу. Когда возникают условия для рассеяния коротких радиоволн, телезрители иногда могут наблюдать на экранах своих телевизиров передачи из удаленных городов. Наблюдения показали также, что во время вспышек полярных сияний атмосфера разогревается и расширяется вверх, вызывая возрастание торможения искусственных спутников.

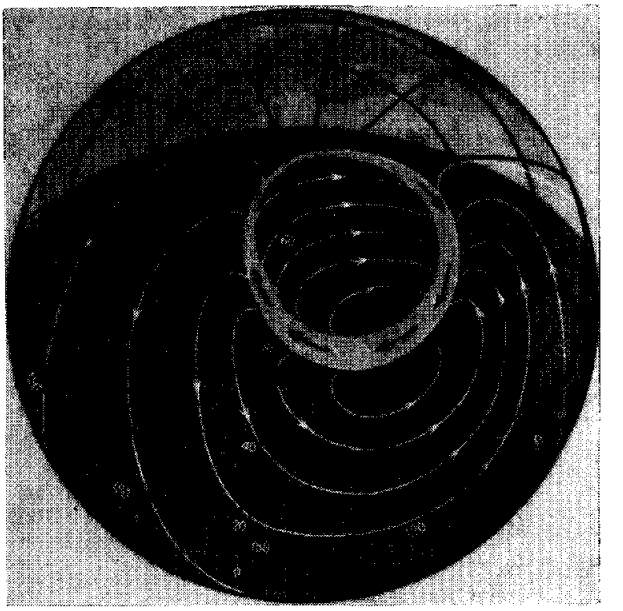

Рис. 8. Полярный струйный ток (черные стрелки)— это интенсивный электрический ток, который течет к западу вдоль овальной зоны сияний.

Он возникает лишь во время шквала полярных сияний. Более слабый ток протекает при этом и вне овальной зоны, распространяясь к югу по всей ионосфере (белые стрелки).

Крупномасштабные движения в магнитосфере во время шквала полярных сияний создают по крайней мере еще один важный эффект. Когда магнитосфера взаимодействует с Е-областью ионосферы, возникает полярная струя тока — интенсивный электрический ток, который течет на запад вдоль овальной зоны полярных сияний (рис. 8). Чтобы понять природу этого тока, представим себе, что мы смотрим вниз на полярную ионосферу туда, где в нее входят магнитные силовые линии. В магнитном поле электроны, движущиеся в верхней атмосфере, вынуждены вращаться в направлении часовой стрелки, в то время как положительные ионы вращаются в противоположном направлении (рис. 9).

Когда энергичные заряженные частицы распространяются из хвостовой области магнитосферы к Земле, они создают электрическое поле, которое направлено к югу (в северном полушарии). Такое электрическое поле, направленное под прямым углом к геомагнитному полю, вызывает смещение электронов и ионов к востоку. В верхней атмосфере выше Е-области плотность газа столь низка, что электроны и положительные ионы имеют приблизительно одинаковую подвижность. Поэтому, хотя и те и другие могут вместе быстро перетекать к востоку, при этом не происходит разделения зарядов и, следовательно, не возникает электрического тока. Однако в области Е положительные ионы, имеющие большие размеры, чаще сталкиваются с другими частицами и поэтому тормозятся, в то время как электроны продолжают дрейфовать к востоку. Это разделение электрических зарядов вызывает полярную струю тока. (Согласно принятым определениям, направление тока противоположно направлению потока электронов.) Было найдено, что часть тока струи растекается в стороны от овальной зоны и распространяется к югу *) по всей ионо

*) Речь идет о северном полушарии.

сфере. Изучение шквалов полярных сияний проводилось в основном по результатам фотографирования небосвода широкоугольными 180°-ными камерами, первые модели которых были разработаны Карлом Гартлейном в Корнельском университете (США). Этот инструмент состоит из фотокамеры, расположенной над выпуклым зеркалом, которое отражает излучение со всего небосвода *). Широкоугольные 180°-ные камеры впервые широко использовались во время Международного Геофизического Года в 1957—1958 гг., когда 67 стран участвовали в программе геофизических исследований на всем земном шаре. С тех пор фотографии с 180°-ных камер, полученные на 115 станциях в Арктике и Антарктике, собираются и изучаются в нашей лаборатории в Университете Аляски.

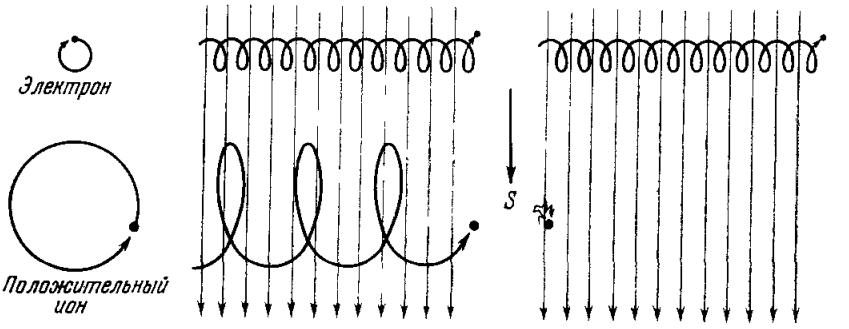

Рис. 9. Электроны и положительные ионы в ионосфере реагируют на появление шквала полярного сияния по-разному в зависимости от высоты.

До такого шквала (слева) электроны совершают движение по часовой стрелке, а ионы — против часовой стрелки вокруг геомагнитных силовых линий, которые на этом чертеже входят вертикально сверху в плоскость чертежа. Явления, которые сопровождают шквал полярного сияния, одновременно вызывают появление электрического поля (цветные стрелки), направленного к югу. Это поле приводит к дрейфу электронов и ионов к востоку. Выше области E ионосферы (посередине) плотность атмосферы столь мала, что электроны и положительные ионы имеют примерно одинаковую подвижность; поэтому, хотя и те и другие стремительно смещаются к востоку, они движутся вместе и разделение зарядов, а следовательно, и ток отсутствуют. В области E (справа) положительные ионы, имеющие большие размеры, чаще соударяются с другими частицами атмосферы, чем электроны, и, следовательно, тормозятся относительно сильнее. Это приводит к разделению зарядов, что вызывает текущий к западу струйный полярный ток в ионосфере.

Нашей целью было проанализировать последовательные (минута за минутой) фотографии шквалов полярных сияний, полученные одновременно на различных полярных станциях, и найти из них, какие изменения испытывает в это время магнитосфера. Затем в тех случаях, когда это возможно, результаты этих исследований и полученные выводы сопоставляются с одновременными измерениями со спутников, оснащенных соответствующей аппаратурой. Из этих координированных исследований и возникла картина протекания полярного сияния, которая была приведена в настоящей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Akasofu, S. Chapman, A. B. Meinel, The Aurora, Hanb. d. Phys., Bd. 49, Springer-Verlag (в печати).
2. B. J. O'Brien, Science 148 (No. 3669), 449 (1965) (см. следующую статью в этом выпуске УФН).
3. Syun-Ichi Akasofu, Space Sci. Rev. 4 (4) 498 (1965).
4. V. I. Krasovskij, Space Sci. Rev. 3 (2), 232 (1964).

*) Обычно вводится еще второе зеркало, устанавливаемое над выпуклым, а фотокамера устанавливается под этим зеркалом.