

ИЗДАТЕЛЬСТВО

«МИР»

S.-I. A kasofu

POLAR  
AND MAGNETOSPHERIC  
SUBSTORMS

D. REIDEL PUBLISHING  
COMPANY  
DORDRECHT-HOLLAND

1968

С.-И. АКАСОФУ

# Полярные И магнитосферные суббури

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО

ПОД РЕДАКЦИЕЙ

И. А. ЖУЛИНА и Я. И. ФЕЛЬДШТЕЙНА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

МОСКВА 1971

Монография содержит изложение современных представлений о процессах в верхней атмосфере и магнитосфере в период геомагнитных возмущений. В книге рассмотрены различные проявления суббурь по данным наземных и спутниковых измерений. Приводятся различные теории, объясняющие особенности развития магнитосферных суббурь.

Книга представляет большой интерес для широкого круга ученых, работающих в различных областях геофизики и исследования космического пространства.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
НАУКА

*Редакция космических исследований, астрономии и геофизики*

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА

Давно известно, что в полярных областях, и особенно в зоне полярных сияний, происходят очень интенсивные возмущения геомагнитного поля. Этим возмущениям давали различные названия: полярная элементарная буря, геомагнитная бухта, полярная суббуря. Последний из этих терминов отражает точку зрения на магнитную бурю как на последовательность отдельных возмущений (суббурь), частота появления и интенсивность которых определяют характер бури. Эта точка зрения завоевала широкое признание. Однако полярная геомагнитная суббуря является лишь одним из проявлений более общего процесса — суббури в магнитосфере Земли, т. е. одним из проявлений возмущения околоземного космического пространства, где характер движения заряженных частиц определяется магнитным полем. Обоснованию этого положения и посвящена настоящая книга.

В самом построении книги нашла отражение единая точка зрения автора на комплекс явлений, наблюдающихся во время суббури. Во введении приведены схемы крупномасштабной структуры геомагнитного поля в магнитосфере и указано фундаментальное значение установления факта, что интенсивное свечение атмосферы появляется вдоль овала полярных сияний, примерно совпадающего с границей между внутренней и внешней магнитосферой. Форма овала полярных сияний определяется заметной асимметрией структуры геомагнитного поля в магнитосфере в направлении день — ночь. Следует отметить, что концепция овала полярных сияний была выдвинута и развита советскими учеными, хотя имеются возражения против этой концепции (см., например, работы СИБИЗМИРА, включенные в составленные Акасофу списки дополнительной литературы).

В последующих восьми главах книги дается детальное, систематизированное описание результатов наземных наблюдений различных проявлений магнитосферных суббурь: электронные и протонные полярные сияния; возмущения геомагнитного поля; аномальное увеличение поглощения космического радиоизлучения в ионо-

сфере; отражения радиолокационных сигналов от областей повышенной ионизации; тормозное рентгеновское излучение, порождаемое при вторжении авроральных электронов в плотные слои верхней атмосферы; очень низкочастотные излучения; микропульсации геомагнитного поля. Столь подробное описание стало возможным только после обработки и синтеза данных планетарной сети станций, проводивших наблюдения по международным исследовательским программам в период Международного геофизического года (МГГ) и Международного года спокойного Солнца (МГСС). В конце каждой главы дается обобщенная схема, характеризующая пространственно-временные особенности развития суббури в данном явлении на геомагнитных широтах более  $60^\circ$  для различных моментов времени от начала суббури.

Гл. 9 содержит рафинированный обзор результатов наблюдений на спутниках вариаций магнитного поля и потоков электронов и протонов различных энергий на расстояниях от нескольких сот километров до 80 радиусов Земли во время магнитосферных суббурь. В гл. 10 изложены десять теорий, а точнее — гипотез, часто просто качественных, в которых сделаны попытки объяснить особенности развития магнитосферных суббурь.

Суббуря в магнитосфере — сложный и во многом еще не понятый процесс. Прежде всего не ясно до сих пор главное: что является причиной суббури? В этом отношении поразительна подмеченная О'Брайеном особенность магнитосферных бурь. В полярных областях потоки заряженных частиц, вторгающихся в плотные слои земной атмосферы, во время суббури подвержены вариациям до  $10^6$  раз. В то же время все известные до сих пор параметры солнечного ветра, энергия которого, несомненно, является источником бурь, меняются всего на десяток-другой процентов. Возможно, как это сейчас общепризнано, магнитосфера Земли является своего рода аккумулятором энергии, высвобождающейся в период бури. Однако и тогда остается неясным, что служит начальным толчком для процесса высвобождения накопленной энергии. В качестве возможных объяснений выдвигались многочисленные и часто очень интересные гипотезы. Но одни из них пока остаются лишь гипотезами, требующими более полного анализа и подтверждения, например гипотеза об определяющей роли пространственной ориентации межпланетного магнитного поля. Другие не выдержали проверки временем, например гипотеза Акасофу и Чепмена о разряде с нейтральной линии в магнитосфере Земли как причине полярных сияний.

В какой-то степени положение с исследованиями магнитосферных суббурь напоминает положение с изучением солнечных вспышек. Общепринято, что развитие этих явлений обусловлено высвобождением потенциальной энергии магнитного поля. В обоих случаях мы имеем дело с магнитостатическим равновесием ( $\nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ ).

Как в суббурях, так и во вспышках важную роль играет давление плазмы: на Солнце — в горячих областях, в магнитосфере Земли — в мысообразной области перехода от зоны захваченной радиации к хвосту магнитосферы на ночной стороне и в плазменном слое. Излучение в линии  $H\alpha$  на Солнце можно рассматривать как своего рода эквивалент полярных сияний на Земле. Возможно, аналогия физических картин обоих явлений поможет в будущем ответить на основной вопрос: что является причиной перехода от квазистационарного состояния к бурной динамике суббури (вспышки)?

Автор книги, профессор Геофизического института при Университете штата Аляска С.-И. Акасофу выполнил ряд очень ценных исследований по вопросам, рассматриваемым в монографии. За последние 10—15 лет он стал одним из крупнейших зарубежных специалистов, работающих в этой области солнечно-земной физики. Но интерес к его книге обусловлен не только тем, что в ней систематизированы взгляды самого Акасофу и изложены основные результаты работ, проводившихся при его участии и во многом способствовавших становлению современных представлений о динамике полярных суббурь (хотя и личная точка зрения столь крупного специалиста, безусловно, заслуживает самого внимательного отношения). Выход в свет монографии Акасофу знаменует собой качественный скачок в наших знаниях о связях ближнего космоса с явлениями на Земле — переход от накопления данных об отдельных явлениях к их осмыслению в рамках единого подхода.

Как и в большинстве зарубежных монографий, в книге недостаточно отражены работы советских ученых. Там, где это представлялось необходимым, в примечаниях даны соответствующие ссылки. Рекомендуем читателям обратиться также к «Трудам 6-й Всесоюзной ежегодной зимней школы по космофизике» (Апатиты, 1969 г., издание Полярного геофизического института Кольского филиала АН СССР), где опубликовано несколько обзоров, подготовленных советскими специалистами. В этих обзорах приведена обширная библиография работ советских ученых. Следует отметить, что Акасофу не использовал в книге многие результаты, полученные советскими учеными, однако он попытался в какой-то мере восполнить этот пробел, дав соответствующие ссылки в дополнительной библиографии к русскому изданию. Кроме того, автор дополнил русский перевод библиографией работ, опубликованных после выхода книги в свет.

Издание русского перевода монографии С.-И. Акасофу можно считать продолжением серии выпущенных издательством «Мир» книг, обобщающих основные результаты исследований в области солнечно-земной физики: «Геофизика. Околосолнечное космическое пространство», 1964 г.; «Космическая физика», под редакцией Д. П. Ле Гэлли и А. Розена, 1966 г.; «Солнечно-земная физика», 1968 г. В условиях все увеличивающегося потока публикаций

при усилении специализации по темам и направлениям такие книги крайне нужны специалистам в области космической физики, геофизики, астрофизики и смежных дисциплин. Книга же Акасофу может служить и своеобразным справочником, в котором собраны воедино все необходимые сведения и приведена подробная библиография. Она будет полезна и как учебное пособие для студентов старших курсов и аспирантов, работающих в соответствующих областях.

При переводе и редактировании были исправлены замеченные в оригинале опечатки и уточнены библиографические ссылки. В переводе принимали участие Л. А. Юдович, В. Н. Обридко и Л. Л. Лазутин (гл. 5). Редактирование перевода введения и гл. 1—4 и 6 выполнено Я. И. Фельдштейном, гл. 5 и 7—10 — И. А. Жулиным.

*И. А. Жулин*  
*Я. И. Фельдштейн*

УДК 551.501.01

551.501.01

551.501.01

551.501.01

551.501.01

551.501.01

551.501.01

551.501.01

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

А. П. НИКОЛЬСКИЙ

В некотором смысле имеется много общего в изучении циклонов и магнитосферных суббурь. В течение длительного времени считали, что циклоны являются особым видом возмущений, накладывающихся на общую циркуляцию воздушных масс. Циркуляция представляет собой крупномасштабное планетарное конвективное движение, направленное вверх в тропических районах. Предполагалось, что эта циркуляция является механизмом, регулирующим тепловой баланс между экваториальными и полярными областями. Однако изучение циклонов выявило, что тепловой баланс земной атмосферы регулируется бурным импульсным процессом, и циклоны являются важными проявлениями этого процесса.

Аналогично в течение долгого времени предполагалось, что полярные магнитные суббури являются возмущением, накладываемым на  $SD$ -вариацию. Однако в 1947 г. А. П. Никольский показал, что магнитные возмущения в высоких широтах представляют собой последовательность бурных импульсных процессов — элементарных бурь Биркеланда, а не  $SD$ -вариацию.

Другая интересная аналогия в исследованиях циклонов и магнитосферных суббурь состоит в том, что они должны основываться на глобальных синоптических данных, а также на законах физики облаков, переносе радиации и т. д. (при изучении циклонов), атомной физики, физики плазмы и т. д. (при исследовании магнитосферных суббурь).

Я искренне надеюсь, что эта книга будет полезна при изучении процессов в полярной верхней атмосфере и в магнитосфере, носящих синоптический характер. Я благодарю советских ученых, которые внесли существенный вклад в этот раздел науки, а также тех советских ученых, научное сотрудничество с которыми помогло осуществлению МГГ и последующих международных программ. Я надеюсь, что русское издание этой книги послужит основой для лучшего взаимопонимания и более эффективного обмена научной информацией.

Я очень признателен Я. И. Фельдштейну и И. А. Жулину за тщательный перевод книги и исправление опечаток.

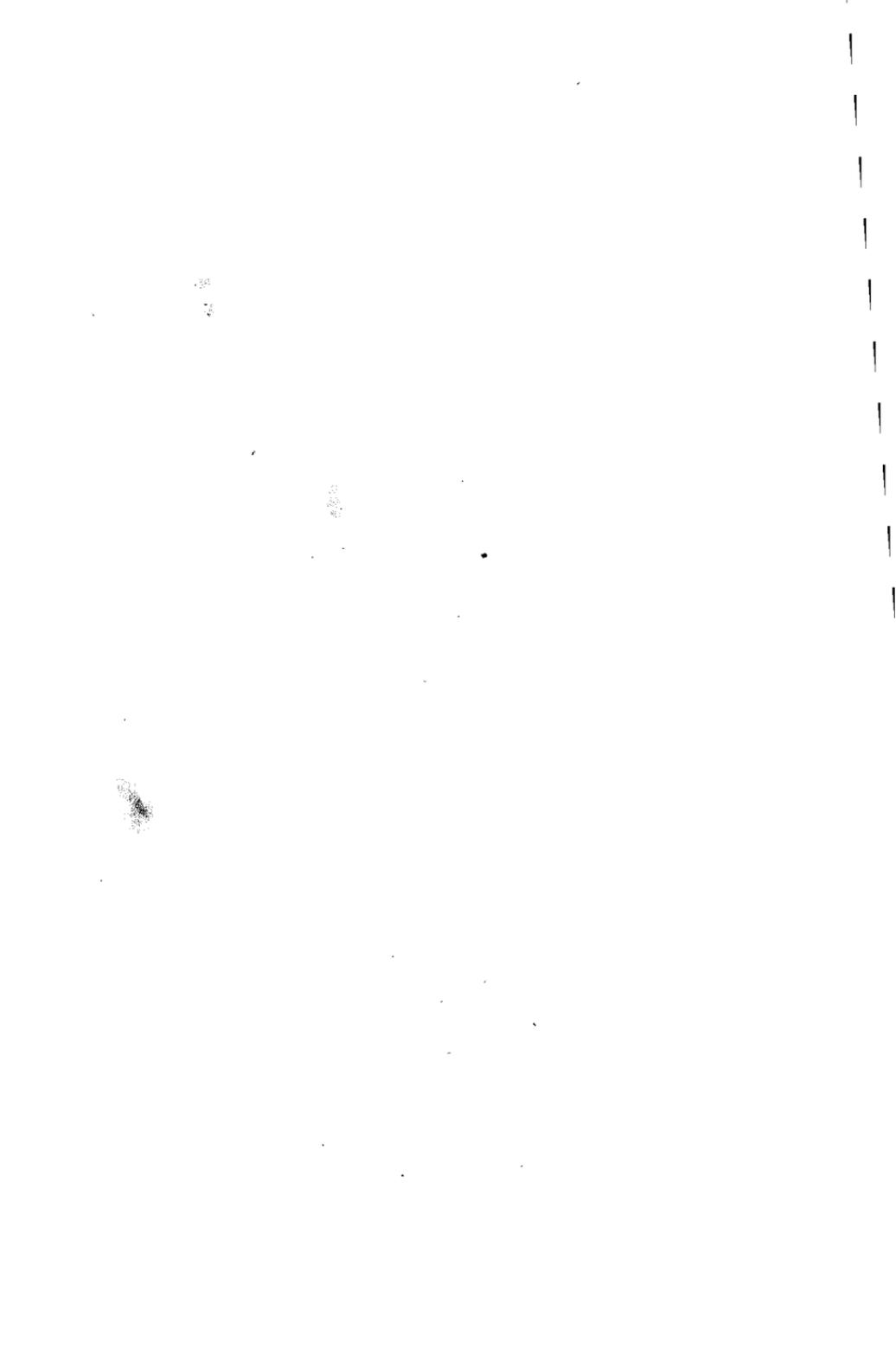
Развитие исследований по проблемам, затронутым в монографии, происходит быстрыми темпами, поэтому я дополнил книгу библиографией новых статей.

Я признателен Академии наук СССР за предоставленную возможность посетить в декабре 1968 г. Советский Союз, что позволило мне обсудить проблемы верхней атмосферы с советскими коллегами.

*С.-И. Акасофу*

СИДНЕЮ ЧЕПМЕНУ,

вдохновителю и инициатору планетарных исследований геомагнитного поля и полярных сияний, в результате которых были получены основные материалы, лежащие в основу наших представлений о геомагнетизме и полярных сияниях.



Как стало ясно в последнее время, магнитосфера время от времени приходит в неустойчивое состояние, что приводит к взрывообразному выбросу большого количества энергии в верхнюю атмосферу высоких широт. Это явление получило название *магнитосферной суббури*. Оно проявляется в активизации различных явлений в верхней атмосфере полярных областей, таких, как интенсивное развитие полярных сияний и всплески рентгеновского излучения. Высокая активность в полярной верхней атмосфере является результатом последовательного появления элементарных возмущений — *полярных суббурь*, — продолжительность которых обычно от 1 до 3 час.

Понятие магнитосферной суббури и ее проявление в полярной верхней атмосфере (полярная суббуря) быстро развились в последние несколько лет. Термин «полярная элементарная буря» был введен К. Биркеландом еще в 1908 г. С. Чепмен разработал основы физики магнитосферы и руководил исследованиями в этой области последние полстолетия. Термины «полярная магнитная суббуря» и «суббуря в полярных сияниях» были впервые предложены Чепменом.

Представления о суббуре были затем развиты Брайсом (Корнеллский университет) и Андерсеном и его сотрудниками (Калифорнийский университет, Беркли), которые ввели термин «магнитосферная суббуря».

Современными успехами физики магнитосферы мы обязаны крупным международным программам, таким, как Международный геофизический год (МГГ) и последующие международные согласованные программы (МГС), Международный год спокойного Солнца (МГСС).

Прошло десять лет после окончания МГГ. Поэтому настало время критически рассмотреть, что мы уже узнали, что мы изучаем в настоящее время и что мы должны исследовать в ближайшем будущем. Уже опубликовано много отличных обзорных статей по различным явлениям в полярной верхней атмосфере, а также написаны превосходные книги. Однако, по моему мнению, в настоящее время отсутствует обобщающее и унифицированное исследование одного автора, касающееся различных явлений в поляр-

ной верхней атмосфере и соответствующих магнитосферных явлений и основанное на концепции полярной и магнитосферной суббури.

Очевидно, для одного автора обзорные исследования в столь различных областях — трудная задача. Тем не менее я попытался разрешить ее, так как мои исследования полярной суббури подсказывают мне, что понятия о полярной и магнитосферной суббурях могут существенно облегчить наше понимание сложных явлений в полярной верхней атмосфере и в магнитосфере.

В этой монографии я сконцентрировал свои усилия на том, чтобы сформулировать доступные результаты наблюдений в терминах полярной и магнитосферной суббури. Это позволило построить глобальную картину развития суббури для различных явлений в полярной верхней атмосфере. Я надеюсь, что ни одно существенное исследование по этой тематике не было мною пропущено. Большинство неточностей и неясностей в планетарных картинах развития суббури, приведенных здесь, обусловлено отсутствием в настоящее время достаточных сведений и правильного понимания описываемых явлений. Я надеюсь, что эта книга будет полезна как основа для плодотворного и конструктивного обсуждения, способствующего лучшему пониманию явлений в полярной верхней атмосфере и магнитосфере.

Поэтому я полагаю, что эта монография будет также полезна при планировании дальнейших согласованных международных исследований. Полярную суббурю невозможно изучать без хорошо организованной сети обсерваторий. Исследование одновременно полярной и магнитосферной суббури требует правильно спланированных усилий исследователей, ведущих наблюдения на поверхности Земли и в космическом пространстве со спутников.

Я писал эту книгу в предположении, что читатель знаком по крайней мере с одним из разнообразных явлений в полярной верхней атмосфере. Поскольку монография написана с очень специфичными намерениями, приводимые ссылки специализированы. Однако я включил в библиографию каждой главы несколько общих ссылок, которые могут служить полезным введением к соответствующим главам.

*С.-И. Акасофу*

## СПИСОК ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

<i>Единицы</i>	— CGS и электромагнитная системы единиц,
<i>Координаты</i>	— декартовы координаты $(x, y, z)$ ; сферические координаты $(r, \theta, \varphi)$ ;
Гм. широта	— геомагнитная широта, вычисленная в дипольном приближении [1],
Гм. долгота	— геомагнитная долгота, вычисленная в дипольном приближении [1],
$R_{\oplus}$	— радиус Земли,
$a_p$	— планетарный линейный магнитный индекс,
$AE$	— индекс полярной электроструи [3],
<b>B</b>	— магнитная индукция,
$D$ -компонента	— склонение геомагнитного поля,
$D(a, \theta, \varphi)$	— величина возмущенного геомагнитного поля
$(H, D, Z) = c_0(\theta) + \sum c_n(\theta) \sin(n\varphi + \varepsilon_n)$ ,	
$D_{st}(H)$	— $c_0(H)$ на $\theta \approx 70^\circ$ ,
$DS$	— $\sum c_n(\theta) \sin(n\varphi + \varepsilon_n)$ ,
<b>E</b>	— напряженность электрического поля,
$E$	— энергия частиц,
$E_0$	— декремент экспоненциального энергетического спектра,
$e$	— заряд электрона,
$H$ -компонента	— горизонтальная компонента геомагнитного поля,
<b>J</b>	— плотность электрического тока, $J_p$ — ток Педерсена, $J_H$ — ток Холла,
<b>J</b>	— поток частиц,
$J$	— второй интегральный инвариант [5], $J' = J/\sqrt{2m\mu}$ ,
$K$	— общая энергия частицы,
$K_p$	— трехчасовой планетарный магнитный индекс $K$ ,
$\sum K_p$	— суточная сумма $K_p$ ,
$L$	— параметр Мак-Илвейна [6],
LT	— местное время,
$m$	— масса частицы,
$n$	— концентрация частиц,
$n_e$	— концентрация электронов,
$r$	— радиальное расстояние,

- $r_e$  — экваториальное радиальное расстояние,  
 $T$  — время от начала суббури,  
 $T$  — температура,  
 $t$  — промежуток времени,  
 UT — всемирное время,  
 $v$  — скорость,  
 $V_A$  — скорость альвеновской волны, равная  $B/\sqrt{4\pi\rho}$ ,  
 $W$  — кинетическая энергия частицы,  
 $W_{\perp}$  — кинетическая энергия, обусловленная компонентой скорости, перпендикулярной  $\mathbf{B}$ ,  
 $X$  — компонента геомагнитного поля в направлении географического меридиана,  
 $Y$  — компонента геомагнитного поля в направлении географической параллели,  
 $Z$  — вертикальная компонента геомагнитного поля,  
 $\gamma$  —  $10^{-5}$  э,  
 $\nu$  — частота столкновений,  
 $\mu$  — магнитный момент частицы, равный  $W_{\perp}/B$ ,  
 $\sigma_1$  — проводимость Педерсена,  
 $\sigma_2$  — проводимость Холла,  
 $\sigma_3$  — проводимость Каулинга,  
 $\rho$  — плотность,  
 $\omega$  — угловая частота,  
 $\omega_B$  — гирочастота.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

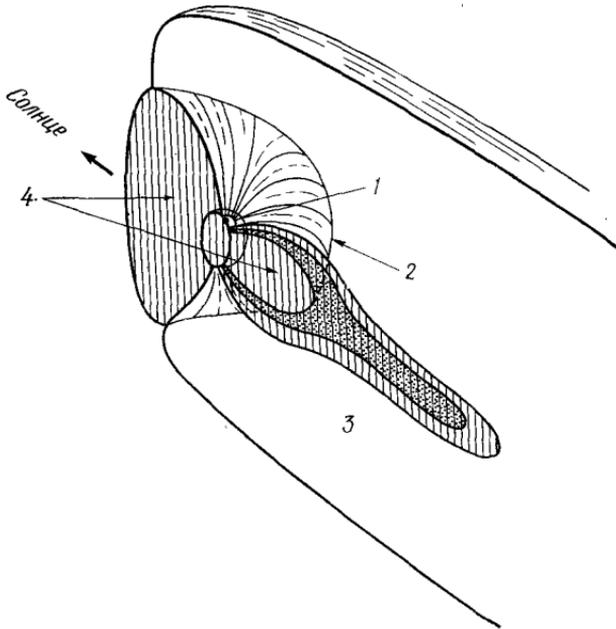
1. Chapman S., Geomagnetic Nomenclature, J. Geophys. Res., **68**, 1174 (1963).
2. Simonov G. V., Geomagnetic Time, Geophys. J., **8**, 258 (1963).
3. Davis T. N., Sugiyama M., Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, J. Geophys. Res., **71**, 785 (1966).
4. Akasofu S.-I., The main phase of magnetic storms and the ring current, Space Sci. Rev., **68**, 3155 (1963).
5. Northrop T. G., The adiabatic motion of charged particles, Interscience Publ., New York, 1963.
6. McIlwain C. E., Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles, J. Geophys. Res., **66**, 3681 (1961).

# Введение

## 1. 1. Полярная верхняя атмосфера и внешняя магнитосфера

Полярная верхняя атмосфера уникальна в том смысле, что она связана геомагнитными силовыми линиями с внешней магнитосферой. Магнитосферу можно разделить на две области: внутреннюю магнитосферу, содержащую временно захваченные энергичные заряженные частицы, и внешнюю магнитосферу.

На границе между внутренней и внешней магнитосферой, по-видимому, происходит непрерывное ускорение заряженных частиц.



Р и с. 1. Поперечное сечение магнитосферы в плоскости полуденного и полуночного меридианов, показывающее структуру магнитосферы и ее связь с овалом полярных сияний. Овал полярных сияний (1) обрисовывает проекцию границы между областью захвата (4) и внешней магнитосферой на полярную атмосферу (2 — граница области захвата; 3 — хвост магнитосферы).

Некоторые ускоренные частицы способны проникнуть глубоко в полярную верхнюю атмосферу вдоль силовых линий геомагнитного поля, расположенных около границы, и взаимодействовать там с атомами и молекулами атмосферы. Это взаимодействие приводит к различным явлениям, и его очень легко обнаружить визуально в виде свечения возбужденных или ионизированных частиц полярной верхней атмосферы. Из приведенной на рис. 1 структуры магнитосферы видно, что свечение появляется в овальной полосе, окружающей полюс геомагнитного диполя и представляющей, грубо говоря, проекцию границы двух областей магнитосферы на полярную атмосферу. Эта светящаяся овальная полоса называется *овалом полярных сияний*. Свечение вызвано визуальными полярными сияниями, располагающимися вдоль полосы. Таким образом, внешняя магнитосфера пронизывается геомагнитными силовыми линиями, пересекающими поверхность Земли внутри овала полярных сияний.

Вследствие сильного искажения геомагнитного поля солнечным ветром магнитосфера асимметрична относительно оси геомагнитного диполя. Поперечное сечение области захвата также сильно асимметрично, что видно на рис. 1, поэтому овал полярных сияний не совпадает с геомагнитной параллелью. Овал полярных сияний не следует смешивать с *зоной полярных сияний*, которая располагается приблизительно вдоль геомагнитной параллели  $67^\circ$  (см. также разд. 1.4).

Другая светящаяся овальная полоса располагается к экватору от овала полярных сияний. Как правило, она более диффузна, чем овал полярных сияний, и для нее характерна водородная эмиссия. По этой причине эта полоса получила название *протонного, или водородного, полярного сияния*.

## 1. 2. Полярные суббури и магнитосферные суббури

Структуру магнитосферы и ее связь с полярной верхней атмосферой, описанную в разд. 1.1, можно взять за основу при описании различных магнитосферных явлений и соответствующих полярных геофизических явлений. Эта монография посвящена возмущениям в магнитосфере и их различным проявлениям в полярной верхней атмосфере. Точнее, на основании всевозможных сведений о закономерностях этих проявлений и спутниковых данных предпринята попытка построить трехмерное распределение заряженных частиц в магнитосфере и сделать выводы об основных процессах, связанных с магнитосферной суббурей.

При активном Солнце параметры солнечного ветра меняются, вызывая возмущения магнитосферы. Если возмущение достаточно интенсивно, то его можно назвать *магнитосферной бурей*. Например, облако солнечной плазмы, выброшенное во время интенсив-

ной солнечной вспышки, генерирует в межпланетной плазме ударную волну. Магнитосферная буря начинается, когда ударная волна и облако плазмы взаимодействуют с магнитосферой. Обычно начало магнитосферной бури характеризуется внезапным сжатием магнитосферы вследствие прохождения межпланетной ударной волны и расположенной за ударным фронтом области повышенного давления. Сжатие часто сопровождается последующим появлением взрывных процессов в магнитосфере. Продолжительность отдельного взрывного процесса обычно от 1 до 3 час — гораздо меньше продолжительности типичной магнитосферной бури. Такой процесс получил название *магнитосферной суббури*. В течение магнитосферной бури может произойти до десяти суббурь. Таким образом, можно написать

Магнитосферная буря = Сжатие +  $\Sigma$  Магнитосферные суббури.

Процесс генерации частиц, вторгающихся в атмосферу вдоль овала полярных сияний при спокойных условиях, заметно активизируется в период магнитосферной суббури. В результате этого спокойные дуги полярных сияний, которые располагаются вдоль овала, активизируются в период суббури. Активизация начинается в полуночном секторе овала полярных сияний и распространяется во всех направлениях, обуславливая различные характерные явления в разных интервалах местного времени. Как правило, магнитосферная суббуря достигает максимума довольно быстро — за 15—30 мин — и затем постепенно затухает. Активность полярных сияний меняется синхронно с развитием суббури. Это одно из проявлений магнитосферной суббури в полярной верхней атмосфере, которое получило название *суббури в полярных сияниях*.

Геоманитное поле сильно возмущается движением энергичных частиц, которые появляются в период суббурь. В частности, протоны с энергиями порядка 1—50 кэв содержат значительную часть энергии, выделяющейся во время магнитосферной суббури. Вращение вокруг силовых линий, движение вдоль силовых линий и дрейф этих протонов генерируют электрические токи, проявляющиеся в магнитных возмущениях в средних и низких широтах на поверхности Земли, а также в магнитосфере. Их асимметричное распределение (относительно оси диполя) и результирующее электрическое поле, по-видимому, играют определяющую роль в магнитосферной суббуре. Электрическое поле протонного пояса из магнитосферы передается в ионосферу (которую можно считать основанием магнитосферы) и генерирует там электрические токи. В частности, интенсивный электрический ток, который называется *полярной электроструей*, индуцируется вдоль овала полярных сияний и вызывает заметные геомагнитные возмущения. Магнитное возмущение, генерируемое полярной электроструей и движениями протонов в магнитосфере, называется *полярной магнитной*

*суббурей*; оно является другим проявлением магнитосферной суббури.

Полярная ионосфера тоже сильно возмущена во время магнитосферной суббури, что проявляется в *ионосферной суббуре*. Основная особенность ионосферной суббури состоит в аномальной ионизации нижней ионосферы вследствие прихода в полярную ионосферу энергичных частиц. Риометр, который измеряет интенсивность космического радиоизлучения, является наиболее подходящим прибором для регистрации изменений ионизации. Ионизация в нижней ионосфере особенно эффективно влияет на поглощение радиоволн. Деформация ионосферы (в частности, перераспределение ионизации в ионосфере по высоте) — другой важный аспект ионосферных суббурь. Деформация может быть вызвана тем же электрическим полем, которое индуцирует электрические токи, и (или) разогревом полярной верхней атмосферы и последующим движением атмосферного газа.

Известны два типа волн, генерируемых в ионосфере во время магнитосферной суббури. Один тип получил название *перемещающихся волнообразных возмущений* (ПВВ), распространяющихся на большое расстояние. Другой тип очень тесно связан со сверхзвуковым движением активных сияний в период суббурь и может проявляться на поверхности Земли в виде инфразвуковых волн. Оба явления в настоящей монографии называются *суббурей в атмосферной волне*. Еще одним важным проявлением магнитосферной суббури является разогрев ионосферы. Существуют различные предположения о механизмах разогрева. Важным следствием разогрева является генерация крупномасштабной циркуляции в полярной атмосфере.

Энергичные частицы излучают электромагнитные волны различных частот. Энергичные электроны, тормозясь при столкновениях с частицами атмосферы, испускают рентгеновские лучи. В период магнитосферных суббурь интенсивные потоки рентгеновского излучения появляются не только вдоль овала полярных сияний, но также вдоль зоны полярных сияний в утреннем секторе. Это явление можно назвать *суббурей в рентгеновском излучении*.

Как указывалось ранее, в период магнитосферных суббурь увеличивается количество протонов низких энергий (1—50 кэВ) в магнитосфере. Некоторая часть таких протонов, проникнув в полярную верхнюю атмосферу, вызывает протонные полярные сияния. Это явление получило название *суббури в протонном полярном сиянии*.

Интенсивное вторжение энергичных частиц вдоль овала и в его окрестности в период магнитосферных суббурь обуславливает появление низкочастотных излучений, таких, как шипения и хоры. Это явление можно назвать *суббурей в ОНЧ-излучении*. Во время магнитосферных суббурь наблюдаются различные типы сверхниз-

кочастотных СНЧ электромагнитных волн, или так называемые *микроразбурения*. Это явление мы будем называть *суббурей в микроразбурениях*. Можно полагать, что СНЧ-колебания генерируются в магнитосфере и распространяются в магнитосферной среде как гидромагнитные волны.

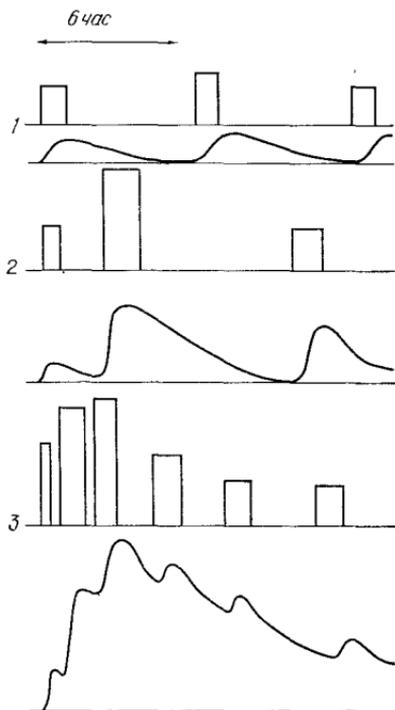
Следующая схема суммирует различные проявления магнитосферной суббури в полярной верхней атмосфере. Каждое явление развивается и затухает по мере развития и затухания магнитосферной суббури. Вся совокупность явлений в полярной атмосфере можно назвать *полярной суббурей*. Магнитосферная суббуря — явление дискретное, имеющее импульсный характер со временем жизни порядка 1—3 час. Как будет видно из последующих глав, эти свойства магнитосферной суббури проявляются в различных особенностях полярной суббури.



Каждое проявление магнитосферной суббури в полярной верхней атмосфере выявляет ее различные аспекты. Основываясь на картине развития и затухания суббури в полярных сияниях, можно определить, как изменяется картина вторжения электронов с энергиями 1—10 кэВ в период суббури во всей полярной области. Ионосферная суббуря и суббуря в рентгеновском излучении могут показывать, как изменяется в период суббури область вторжения более энергичных электронов (~50 кэВ). Если бы данные о полярных магнитных суббури позволили определить реальную систему электрических токов, то можно было бы изучить распределение электрического поля и его вариации в магнитосфере в течение ионосферных суббурь.



Нетрудно заключить, что основная фаза геомагнитных бурь, а именно главная фаза, полностью характеризуется интенсивностью и частотой магнитосферных суббурь, так как общее число протонов, аккумулированных в области захвата, определяется интенсивностью и частотой суббурь (рис. 2). Если эти протоны образуют однород-



Р и с. 2. Схематическая диаграмма, показывающая связь частоты и интенсивности магнитосферных суббурь (прямоугольники) с общим числом (или общей кинетической энергией) протонов с энергиями 1—10 кэв (кривые) в области захвата.

ный пояс вокруг Земли (относительно геомагнитной оси), то их общая энергия пропорциональна ослаблению геомагнитного поля на экваторе [4]. Поэтому в этом частном случае вариация общей энергии протонов в области захвата проявляется в виде однородного понижения горизонтальной составляющей, а именно понижения напряженности поля в период главной фазы. Таким образом, развитие и затухание главной фазы существенно зависят от частоты появления и интенсивности суббурь. Поэтому изучение главной фазы геомагнитных бурь сводится к изучению фундаментального элементарного процесса — магнитосферной суббури.

Из последующих глав станет ясно, что магнитосферная суббурия является внутренним процессом в магнитосфере. Магнитосфера преобразует энергию потока плазмы, движущегося от Солнца, в энергию суббури. Механизм такого процесса пока неясен, и в настоящее время это одна из проблем, требующих особого внимания.

#### 1. 4. Овал полярных сияний как естественная система координат

Новейшие исследования полярных сияний показали, что дуги полярных сияний стремятся располагаться в узком овальном поясе, окружающем геомагнитный полюс (рис. 3). Овал расположен эксцентрично относительно геомагнитного полюса, и его центр заметно смещен ( $\sim 3^\circ$ ) в ночную полусферу [5, 6, 10]. Овал фиксиро-

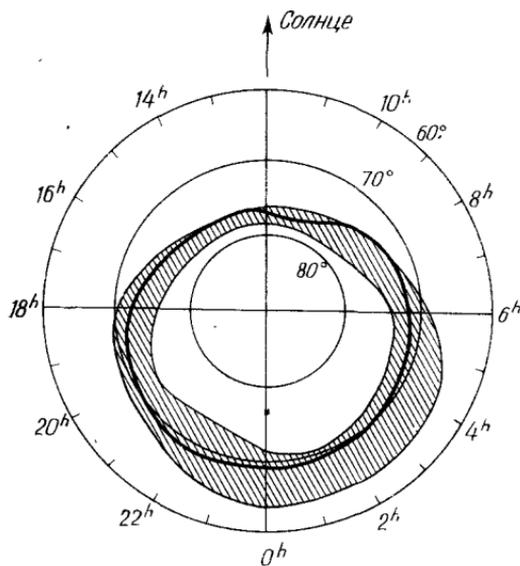
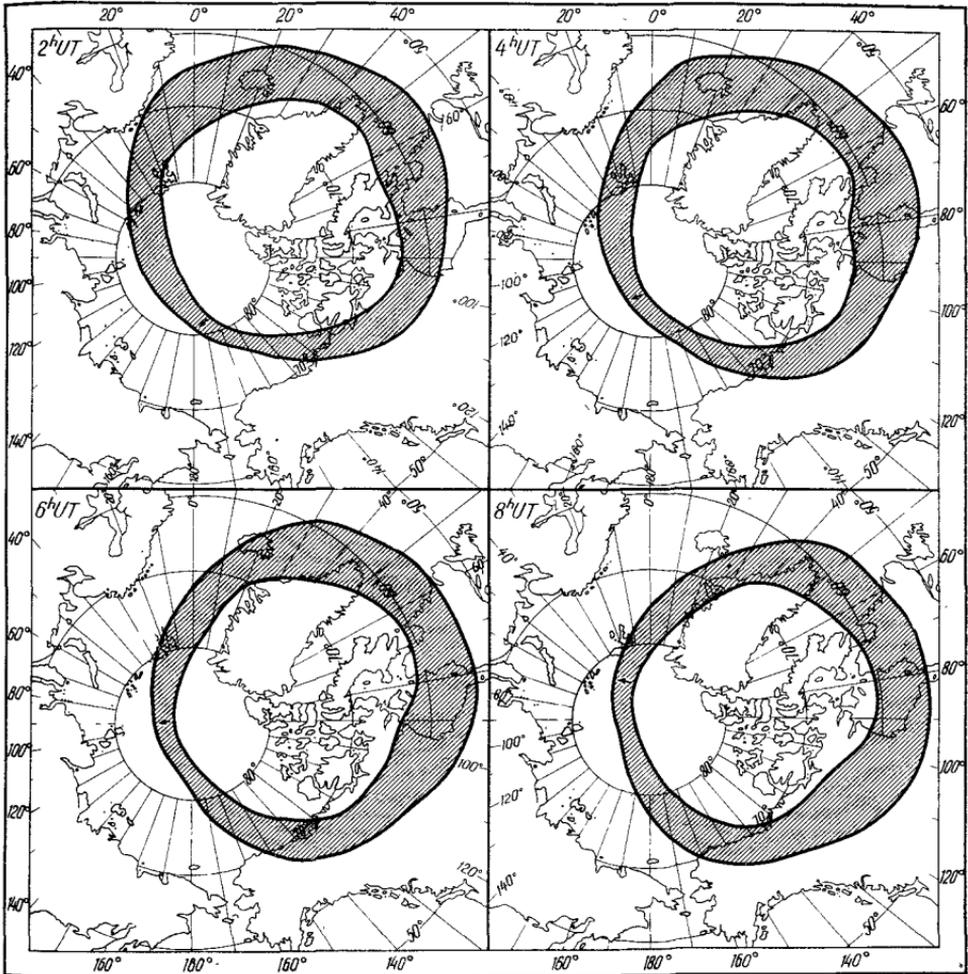


Рис. 3. Овал полярных сияний по Фельдштейну [5] (заштрихованная область и внешняя граница области захвата (жирная линия). Частота появления сияний 75—90%; поток захваченных электронов с  $E \geq 40$  кэв  $10^4$  электрон/см<sup>2</sup>·сек [8].

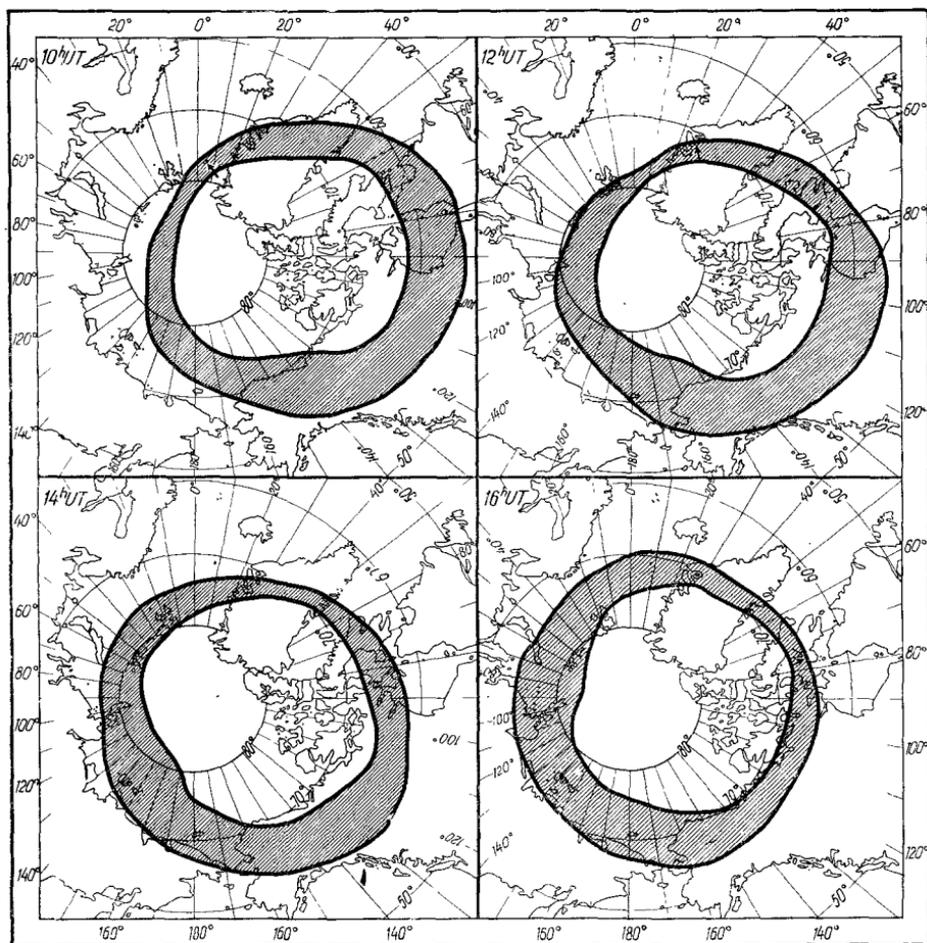
ван в первом приближении относительно Солнца, и Земля совершает под овалом один оборот за сутки. Зона полярных сияний, где наиболее часто наблюдаются интенсивные полярные сияния, представляет собой след полуночной части овала на поверхности Земли. На рис. 3 приведена также линия пересечения полярной ионосферы с внешней границей области захвата [8]. Видно, что овал полярных сияний геометрически тесно связан со структурой магнитосферы (см. рис. 1).

Одной из основных трудностей и одним из основных источников недоразумений при анализе полярных геофизических данных является использование при анализе результатов геомагнитных, или дипольных, координат. Поскольку внешнее геомагнитное поле сильно деформировано солнечным ветром и поскольку полярные суббури являются проявлениями магнитосферной суббури, которая охватывает внешнюю магнитосферу, ясно, что дипольные координаты не обязательно адекватны и не являются наилучшими координатами для изучения явлений, протекающих в полярной верхней атмосфере. Более существенно положение станции относительно



Р и с . 4а. Примерное положение овала полярных сияний в северном полушарии в различные моменты всемирного времени UT.

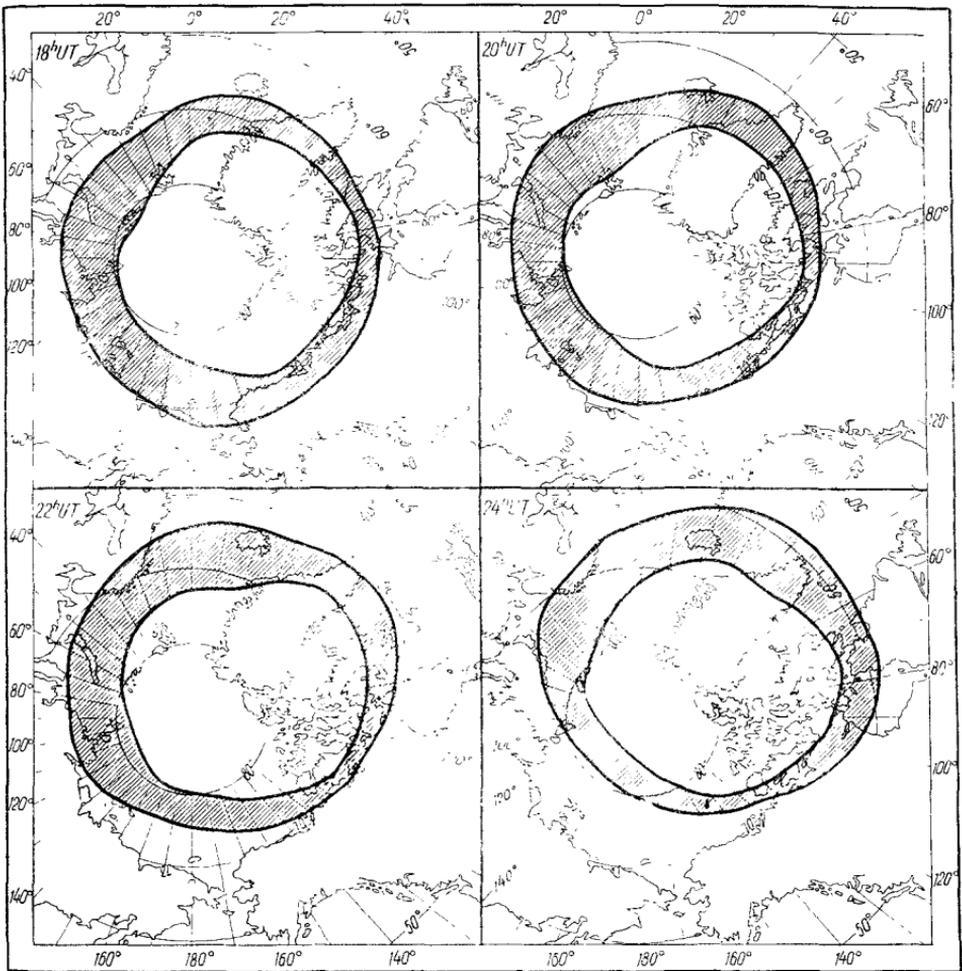
овала полярных сияний, чем относительно геомагнитного полюса. Это, в частности, относится к изучению полярных сияний и полярных геомагнитных возмущений. К сожалению, зону полярных сияний, граница которой проходит по геомагнитной параллели  $67^\circ$ , долго интерпретировали как мгновенную область появления сияний. Однако такой мгновенной областью является овал, а не зона полярных сияний. Как указывалось ранее, зона сияний есть след полуденной части овала на поверхности Земли. Рис. 4а—4в иллюстрируют примерное положение овала полярных сияний в



Р и с . 46. То же, что на рис. 4а.

северном полушарии в различные часы всемирного времени (UT). Видно, что типичные станции зоны сияний, такие, как Колледж и Кируна, располагаются в дневные часы местного времени вне овала полярных сияний.

Однако овал имеет более существенное значение, чем мгновенная область появления полярных сияний. Как отмечалось в разд. 1.1, его геометрия тесно связана со структурой магнитосферы. Эксцентricность овала связана с асимметрией внутренней структуры магнитосферы в направлении день — ночь. Внешний радиационный пояс заметно асимметричен, и линия пересечения его внешней границы с ионосферой примерно совпадает с овалом полярных сияний



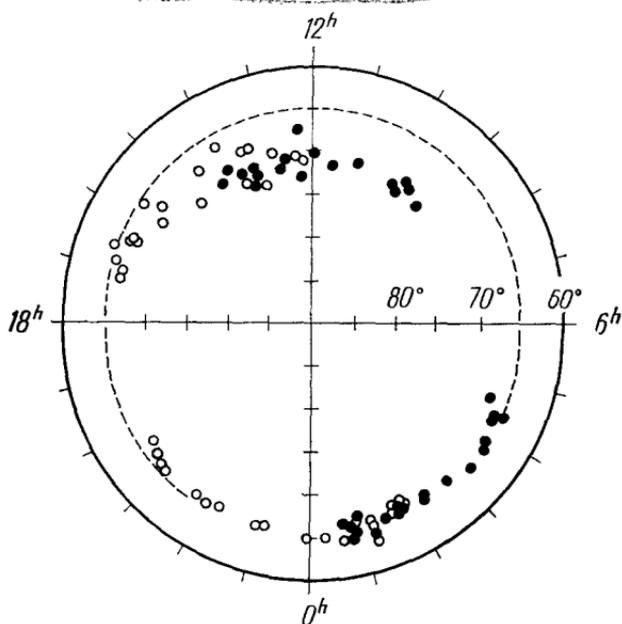
Р и с . 4в. То же, что на рис. 4а.

(см. рис. 1). Таким образом, концепция овала полярных сияний имеет обоснование в терминах структуры магнитосферы.

Геометрическая связь овала полярных сияний со структурой магнитосферы предполагает, что овал полярных сияний обрисовывает приблизительно границу области, из которой выходят (или в которую входят) магнитные силовые линии, пересекающие внешнюю магнитосферу. Раньше полярная шапка определялась как область, ограниченная зоной полярных сияний, однако более естественно считать полярной шапкой область в пределах овала полярных сияний. Станция на геомагнитной широте 70° считалась постоянно расположенной в полярной шапке, так как она находится внутри зоны

полярных сияний. По новому определению такая станция располагается в полярной шапке только около полуночи, когда она попадает внутрь овала полярных сияний и проходящая через нее магнитная силовая линия уносится в хвост магнитосферы. Остальную часть суток она не является станцией полярной шапки, так как располагается вне овала, и поэтому силовая линия, проходящая через станцию, пересекает область захвата.

Это обстоятельство подтверждается тем, что овал полярных сияний примерно обрисовывает границу области, которая постоянно бомбардируется низкоэнергичными космическими лучами. На рис. 5



Р и с. 5. Положение границы вертикального вхождения протонов с энергией  $1,5 \text{ Мэв}$  в координатах геомагнитная широта — геомагнитное время. Протоны наблюдаются всюду в пределах границы [18]. Черные кружки — северное полушарие, белые кружки — южное.

показано положение границы такой области [18]. Низкоэнергичные космические лучи свободно проходят в область, ограниченную овалом полярных сияний, независимо от энергий. Эта область примерно совпадает с областью, где наблюдается поглощение в полярной шапке (ППШ). Станция на геомагнитной широте  $70^\circ$  лежит вне области непрерывной бомбардировки низкоэнергичными космическими лучами в дневные часы, так же как и станции средних и низких широт. Но она находится внутри области бомбардировки в ночные часы аналогично станциям, расположенным около геомагнитного полюса.

Существенная сложность суточных закономерностей в некоторых полярных геофизических явлениях обусловлена значительной эксцентричностью овала полярных сияний относительно геомагнитного полюса. Например, суточная вариация частоты появления полярных сияний на отдельной станции вызвана изменением положения станции относительно овала полярных сияний в течение суток. Типичная зональная станция вследствие суточного вращения Земли попадает под овал только в околополуденные часы, так что основные полярные геофизические явления имеют один максимум появления вблизи полуночи, т. е. в  $10^h$  UT в Колледже (гм. широта  $64,7^\circ$ ) и в  $22^h$  UT в Кируне (гм. широта  $65,3^\circ$ ) (см. рис. 4). Уникальность зоны полярных сияний обусловлена тем, что суббури в полярных сияниях и в полярных магнитных возмущениях наиболее интенсивны в полуночном секторе овала, где он пересекается с зоной полярных сияний. Станция с геомагнитной широтой между  $70$  и  $75^\circ$  «пересекает» овал полярных сияний дважды в сутки, так что частота появления полярных сияний имеет два максимума: один в вечерние, а другой в утренние часы. Из геометрии овала (см. рис. 3) следует, что с увеличением широты оба максимума систематически смещаются с полуночных на ранние утренние и вечерние часы.

Если моменты максимумов в суточных вариациях представить в координатах геомагнитная широта — местное время, то они расположатся вдоль двух спиральных кривых: одна в послеполуденно-вечернем секторе, другая в утренне-предполуденном секторе. Никольский [14] одним из первых получил спиральные кривые на основе изучения суточных вариаций магнитной активности. Эти спирали называются N- и M-спиралями соответственно\*. На рис. 6а приведено положение M-спирали в различные моменты всемирного времени в высоких широтах северного полушария. В дальнейшем было найдено, что ряд геофизических явлений, таких, как эмиссии  $H\alpha$  и  $H\beta$  (см. разд. 6.3), блэкауты, авроральные радиоотражения (см. разд. 4.10), спорадический слой  $E$  (см. разд. 6.3), имеют тенденцию появляться вдоль одной или обеих спиралей. На рис. 6б показано положение блэкаутов [15] (см. также разд. 4.8). Как видно из рис. 6а и 6б, несмотря на весьма существенное различие природы этих явлений, обе спирали поразительно похожи. На рис. 6в приведены спирали спорадического слоя  $E$ , появляющегося в периоды бурь [21]. На рис. 7 приведены спиральные кривые различных полярных геофизических явлений в полярных координатах по Нагата [13]. Если скомбинировать все спирали, то, от-

\* Важные закономерности в распределении магнитных возмущений в высоких широтах, в том числе и их спиральные зависимости, были установлены О. А. Бурдо (Труды Арктического НИИ, 233, 21—45 (1960)). — *Прим. ред.*

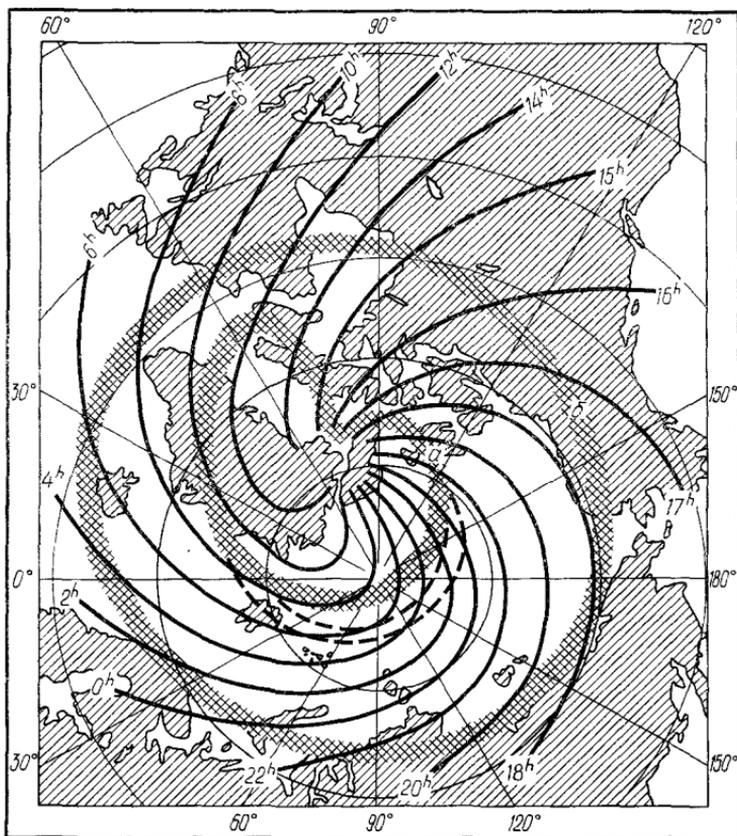
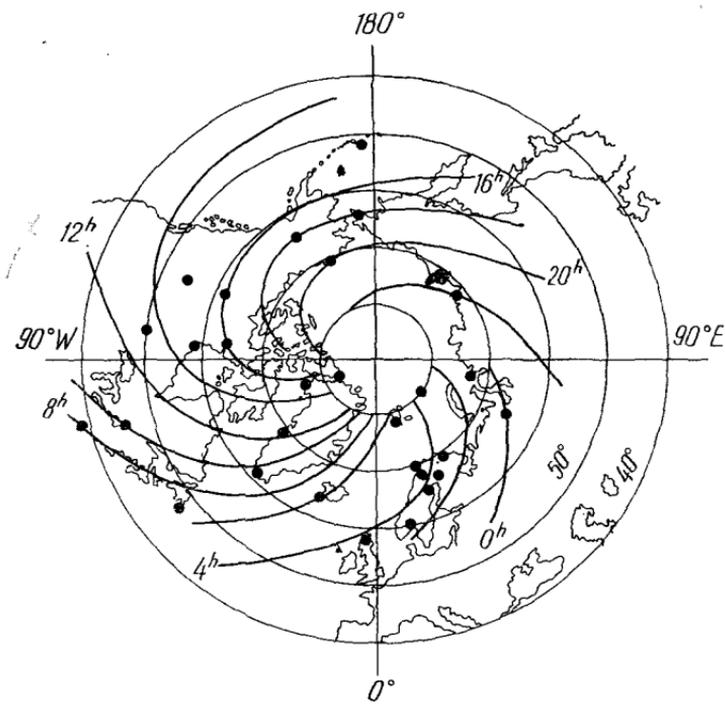


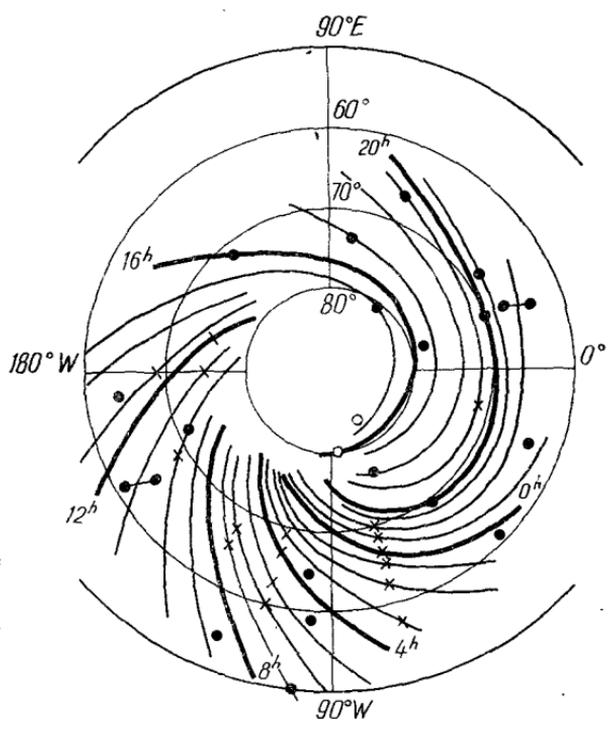
Рис. 6а. Положение М-спирали на карте в полярной проекции в различные моменты UT. В конкретный момент UT (например, 16<sup>h</sup> UT) геомагнитные возмущения в утренние часы наиболее интенсивны вдоль спирали, обозначенной 16<sup>h</sup> [14]. а — внутренняя, б — внешняя зоны максимальной интенсивности магнитных возмущений

влекаясь от некоторого различия в деталях, легко обнаружить геометрию овала полярных сияний, изображенную на рис. 3.

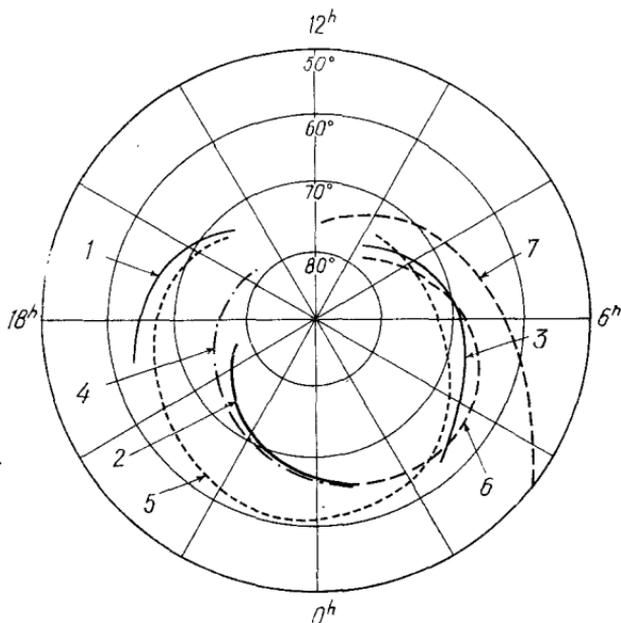
Нетрудно идентифицировать М-спираль Никольского с предполуденной частью овала (рис. 8). Как видно из рис. 8, М-спирали имеют тенденцию закручиваться менее сильно, чем сплошные кривые. Однако сплошные кривые представляют более точно положение максимумов геомагнитных возмущений. Например, в Эскдалемьуре (Англия, 3°12' з.д.), Агинкурте (Восточная Канада, 79°16' з.д.), Минуке (Западная Канада, 113°20' з.д.) К-индексы максимальны соответственно в 21—24<sup>h</sup> UT, 0—3<sup>h</sup> UT и 6—9<sup>h</sup> UT. М-спирали Никольского в очень высоких широтах, по-видимому, далеки от реальности, так как вряд ли в пунктах, отстоящих на несколько сот



Р и с. 66. Поло-  
жение кривых,  
вдоль которых  
наиболее часто  
в различные  
часы UT появ-  
ляются блэкау-  
ты [15].



Р и с. 6в. Поло-  
жение кривых  
вдоль которых  
наиболее часто  
в различ-  
ные часы UT появляется  
спорадический слой E  
особого типа [21].



Р и с. 7. Спиральные кривые различных явлений верхней атмосферы в координатах геомагнитная широта — геомагнитное время [13].

1 — магнитная А-спираль; 2 — магнитная N-спираль; 3 — магнитная М-спираль; 4 — спираль полярных сияний и спорадического слоя типа полярных сияний; 5 — спираль ночного слоя E, спорадического слоя типа  $r$  (с запаздыванием), эмиссий  $N\alpha$  и  $N\beta$ ; 6 — высокоширотные блэкауты; 7 — низкоширотные блэкауты.

километров, максимумы магнитной активности различаются по времени на 6 час.

На рис. 9 приведены N- и М-спирали, полученные Фельдштейном\*; они обозначены «Маг. N» и «Маг. М» соответственно. N-спираль получена для возмущенных (возмущ.) и для средних (все) условий. Из рис. 9 следует, что комбинация двух спиралей дает по существу овал полярных сияний. Таким образом, М- и N-спирали являются сегментами овала полярных сияний.

Явления в полярной верхней атмосфере усложняются тем, что, помимо узкой овальной полосы, существует полоса, которая простирается вдоль утреннего сегмента зоны полярных сияний от полуночной части овала. Эта полоса характеризуется вторжением энергичных электронов и связанными с ним явлениями в верхней атмосфере (гл. 4—8). Вторгающиеся в эту полосу электроны

\* Приведенные на рис. 9 спирали взяты из работы Я. И. Фельдштейна «Пространственно-временное распределение магнитной активности в высоких широтах северного полушария», сб. «Геомагнетизм», Изд-во АН СССР, № 5, 1—64, 1963. — Прим. ред.

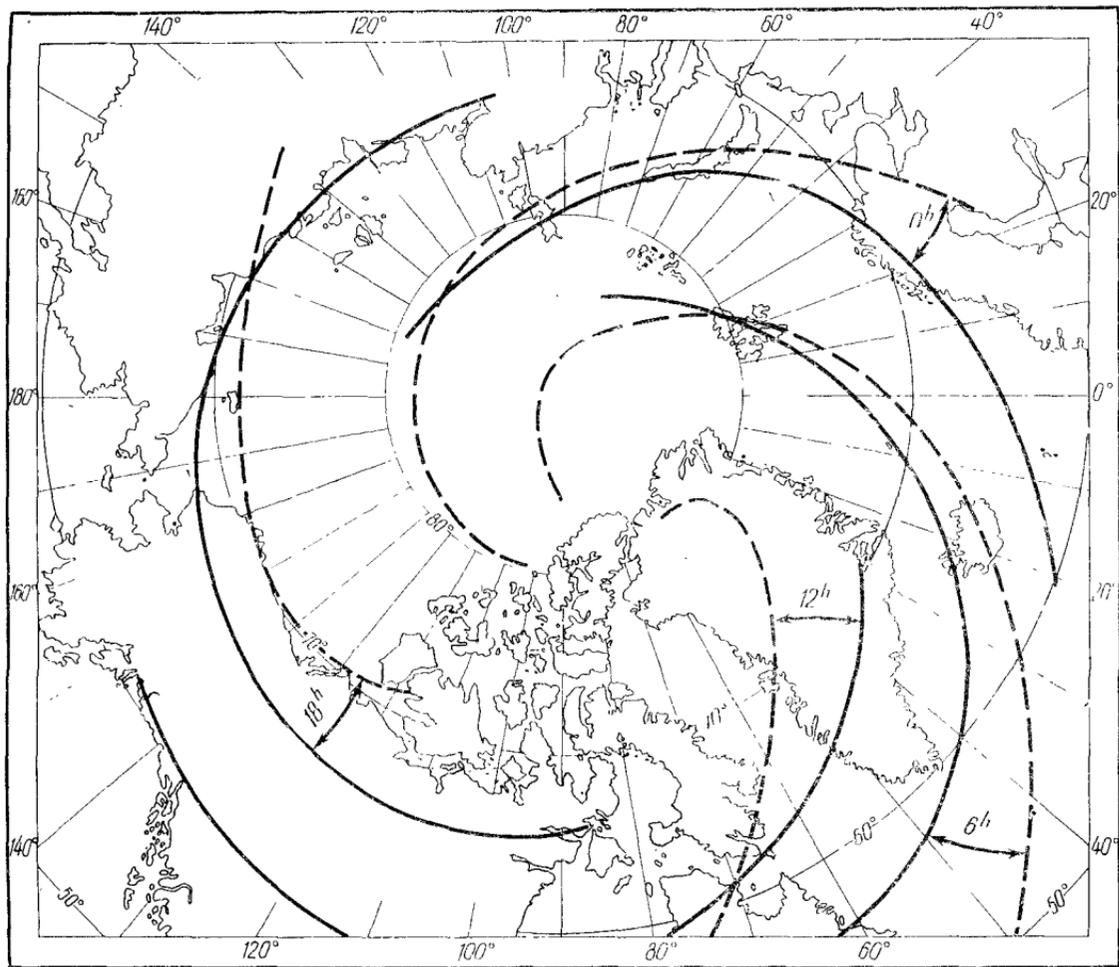
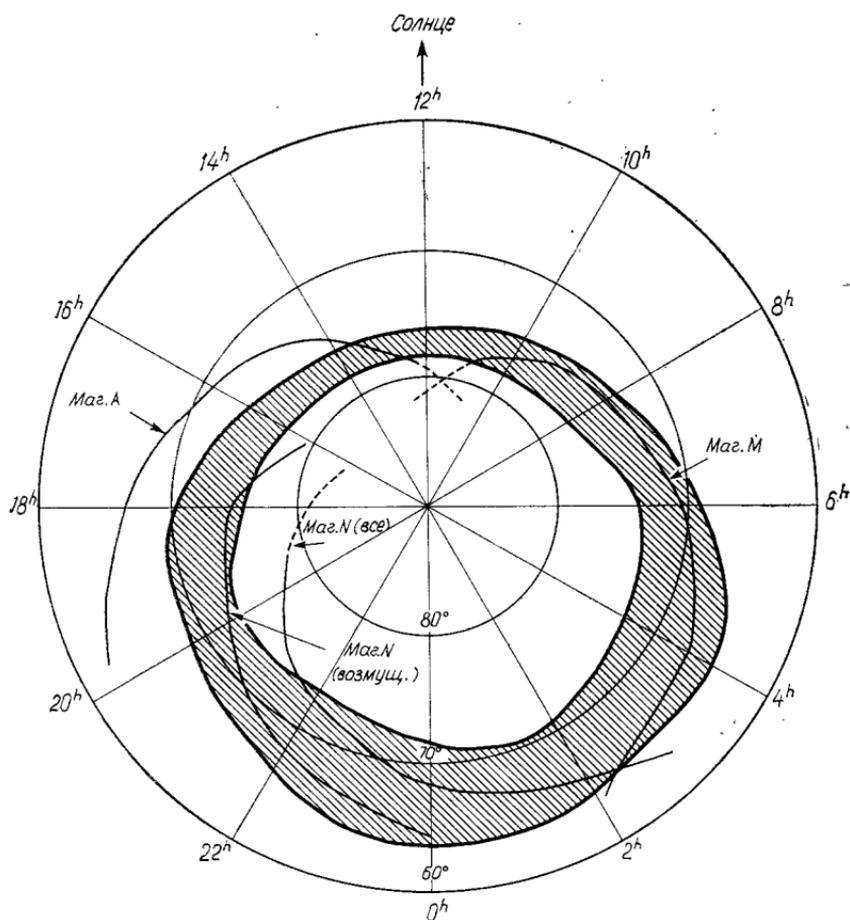


Рис. 8. Сопоставление положений М-спиралей Никольского (штриховые линии) и утренней части овала (сплошные линии) в различные часы UT.



Р и с. 9. М-, N- и А-спирали, определенные Фельдштейном, и овал полярных сияний в координатах геомагнитная широта — геомагнитное время.

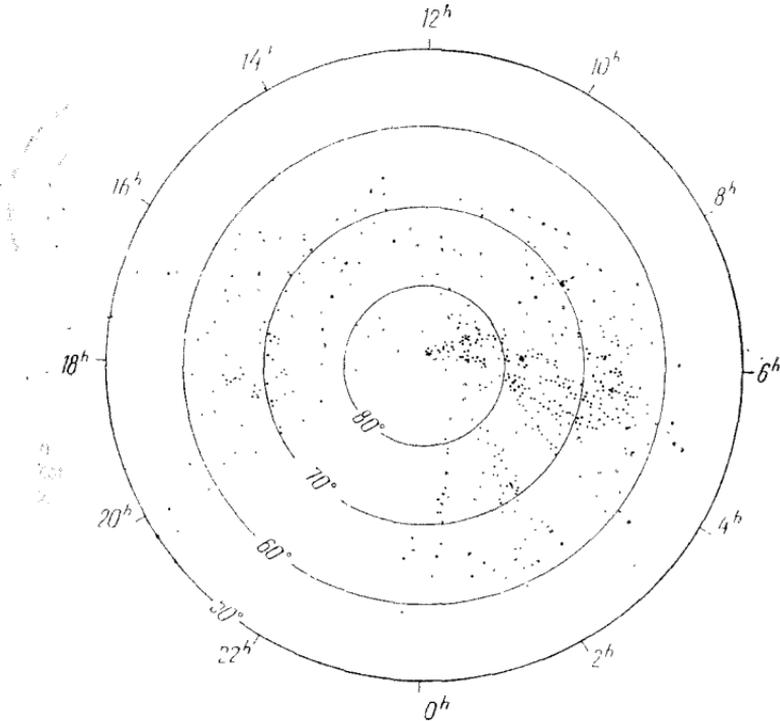
имеют более высокие энергии, чем электроны вдоль овала полярных сияний. Плохая корреляция между такими вторжениями и магнитными возмущениями казалась весьма загадочной. Однако теперь установлено, что магнитные возмущения характерны для широт овала полярных сияний и очень ослаблены в зоне полярных сияний в поздние утренние часы.

### 1. 5. Четыре круговые околополюсные структуры и соответствующие структуры в магнитосфере

Овал полярных сияний — не единственная околополюсная структура. Он окружен диффузной полосой свечения, которая содержит излучение водорода (протонное полярное сияние). Протоны,

просачивающиеся из кольцевого тока (или протонного пояса во время бури), могут давать вклад в это свечение в полуночном секторе, в частности в течение магнитосферных суббурь.

Ионосферное зондирование со спутников выявило существование глубокого «желоба» ионизации в средних широтах на всех долготах; эта структура получила название *среднеширотного*

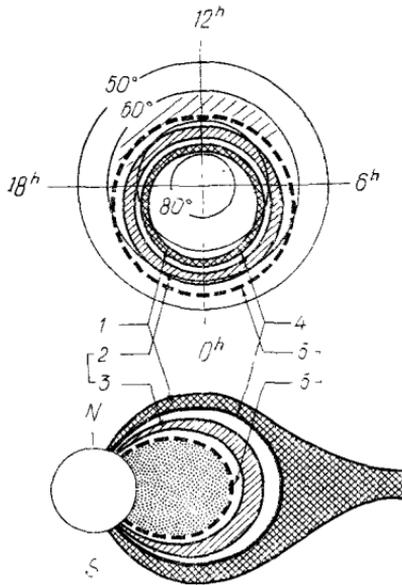


Р и с. 10. Положение области, в которой спутником «Адуэнт-2» на высоте 1500—3000 км наблюдалась очень низкая концентрация электронов ( $< 30 \text{ см}^{-3}$ ) в координатах геомагнитная широта — местное время [9].

желоба [12, 17]. Было показано [12], что желоб, как и овал полярных сияний, не располагается вдоль геомагнитной параллели. Наинизшая широта желоба приходится на полуночный сектор. Электронная концентрация на высоте 1000 км в области, ограниченной желобом, существенно ниже ( $< 30 \text{ см}^{-3}$ ), чем в соседней среднеширотной области. На рис. 10 приведены данные о расположении области, в которой наблюдается низкая концентрация электронов [9]. По-видимому, низкоширотный желоб является проекцией внешней границы ионосферы, или так называемой *плазмоспаузы*, обнаруженной Карпентером [2] при изучении свистящих атмос-

фериков\*. На рис. 11 схематически изображены эти три круговые структуры и их связь с соответствующими структурами в магнитосфере на полуночном меридиане.

В период интенсивных магнитных бурь появляется дополнительная круговая структура, в виде широкой полосы свечения, харак-



Р и с. 11. Схема, показывающая три концентрические овальные структуры и их связь с соответствующими магнитосферными структурами.

1 — овал полярных сияний; 2 — протонные полярные сияния; 3 — кольцевой пояс бури; 4 — граница захвата; 5 — среднеширотный желоб; 6 — плазмопауза.

теризующейся интенсивной эмиссионной красной линией кислорода ( $\lambda=6300\text{\AA}$ ). Это свечение названо *субвизуальной среднеширотной красной дугой* [16]. Связь красной дуги с протонным поясом и плазмопаузой до конца не выяснена, но, по-видимому, такие дуги — наиболее близкая к экватору структура из четырех перечисленных.

## 1. 6. Изменение овала полярных сияний

Важнейшей особенностью овала полярных сияний является его непрерывное изменение во времени. На рис. 3 приведено среднее положение овала. Его «радиус» сильно меняется в период геомагнитных возмущений. Во время длительных очень спокойных периодов ( $K_p=0$  в течение  $\sim 24$  час) овал полярных сияний сжимается к полюсу и в полуночном секторе располагается на гм. широте  $>70^\circ$ , полярные сияния становятся очень слабыми и даже невидимыми в полуночном секторе [20] (рис. 12). Когда индекс  $K_p$  возрастает до

\* Резкое уменьшение плотности плазмы в магнитосфере было впервые обнаружено К. И. Грингаузом. — Прим. ред.

1—2, овал полярных сияний в полуночном секторе перемещается на гм. широту  $70^\circ$  или несколько больше (см. рис. 12, *a*). В этом случае типичная станция зоны сияний, обозначенная точкой, располагается вне овала полярных сияний, так что она временно становится станцией субавроральной области. Овал занимает свое среднее положение

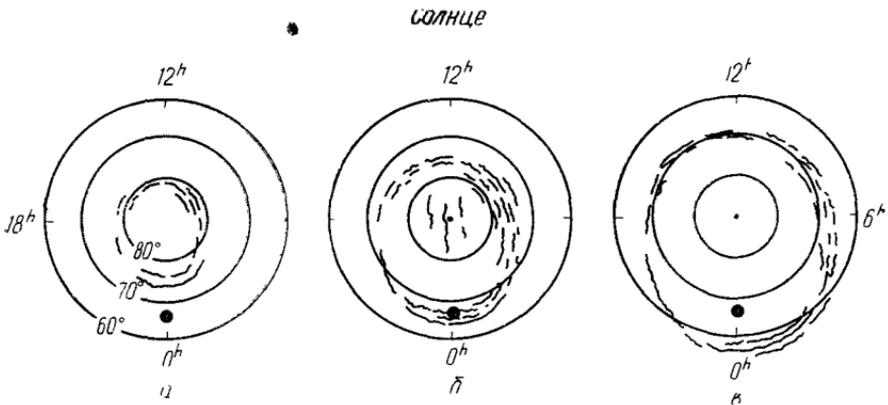
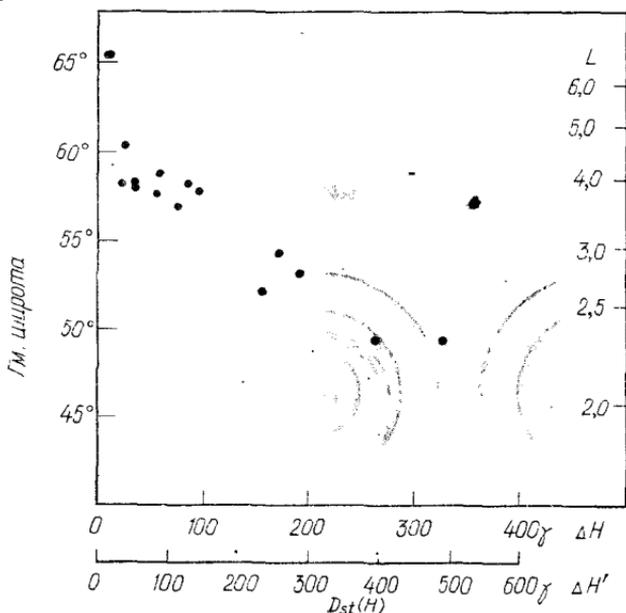


Рис. 12. Овал полярных сияний при различных магнитных условиях. *a* — в очень спокойный период; *б* — в умеренно возмущенный период; *в* — при интенсивной буре. Точкой указано положение типичной станции зоны сияний в полуночном секторе.

при  $K_p=3$  [19]. Дальнейшее увеличение геомагнитной активности сопровождается смещением овала к экватору. В период сильных геомагнитных бурь овал может спускаться до гм. широты  $50^\circ$  в полуночном секторе [1]. В этом случае типичная станция зоны сияний и даже типичная станция субавроральной зоны временно становятся станциями полярной шапки, так как располагаются внутри овала. На рис. 12 точкой показано положение зональной станции в полуночном секторе, которое иллюстрирует изменение положения станции относительно овала полярных сияний при различных условиях. На рис. 13 приведена широта экваториальной границы овала полярных сияний при различных интенсивностях геомагнитных бурь; интенсивность геомагнитных бурь оценивалась напряженностью магнитного поля, производимого кольцевым током [1, 7].

Таким образом, если не проводится непрерывного определения положения станции относительно овала полярных сияний, то невозможно привести в систему обширные данные полярных геофизических явлений при различных уровнях геомагнитной активности в различные периоды солнечного цикла. Это подчеркивает важность овала полярных сияний как естественной основы при исследовании явлений в полярной верхней атмосфере.



Р и с. 13. Широта экваториальной границы овала полярных сияний при различных уровнях геомагнитной активности, оцениваемой величиной вариации  $D_{st}(H)$ .

### 1. 7. Структура монографии

В последующих восьми главах будет кратко рассмотрено каждое проявление магнитосферной суббури в полярной верхней атмосфере. Цель рассмотрения — построить планетарную картину усиления и затухания каждого полярного геофизического явления по мере развития суббури.

За начало отсчета времени в монографии выбрано время начала полярных магнитных суббурь и (или) суббурь в полярных сияниях в полуночном секторе ( $T=0$ ). Начало полярной магнитной суббури проявляется как резкое начало так называемой *отрицательной бухты* (гл. 2). В этой связи следует напомнить, что при классическом анализе геомагнитных бурь [3, 11] начало бури отсчитывалось от момента ее внезапного начала. Развитие и затухание геомагнитной бури исследовалось затем в функции времени протекания бури, отсчитываемого от внезапного начала. В соответствии с нашими представлениями в течение одной магнитной бури происходит много полярных суббурь, так что развитие полярного явления будет исследоваться от начала каждой суббури.

В этих восьми главах суббури в каждом геофизическом явлении будет рассмотрена примерно в следующем порядке:

1. Введение.
2. Типичная суточная вариация.
3. Статистическая картина суточной вариации.
4. Характеристики в полуночном секторе.
5. Характеристики в вечернем секторе.
6. Характеристики в утреннем и дневном секторах.
7. Характеристики в геомагнитносопряженных областях.
8. Развитие и затухание суббури.

В гл. 9 исследованы изменения потоков частиц и магнитного поля в магнитосфере и в межпланетном пространстве в период полярных суббурь. Время и в этом случае отсчитывается от начала полярных магнитных суббурь.

В первой части гл. 10 будут рассмотрены все явления полярной суббури в терминах вторжения энергичных частиц и появления электрического поля. Вторая часть гл. 10 посвящена обзору общей связи полярных суббурь и изменений в магнитосфере в период полярных суббурь. Это поможет нам охватить и понять основные процессы, связанные с магнитосферными суббурями.

#### ЛИТЕРАТУРА

##### Общая

- Chamberlain J. W., Physics of the aurora and airglow, Academic Press, New York, 1961. (Русский перевод: Дж. Чемберлен, Физика полярных сияний и излучения атмосферы, ИЛ, М., 1963.)
- Chapman S., Bartels J., Geomagnetism, Clarendon Press, London, 1940.
- Hess W. N., The radiation belt and magnetosphere, Blaisdell Publ. Co., Waltham, Mass., 1968.

##### Цитированная в тексте

1. Akasofu S.-I., Chapman S., The lower limit of latitude (US sector of northern quiet auroral arcs, and its relation to *Dst* (H), *J. Atmos. Terr. Phys.*, **25**, 9—12 (1963).
2. Carpenter D. L., Whistler studies of the plasmapause in the magnetosphere. I. Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions near the knee, *J. Geophys. Res.*, **71**, 693—709 (1966).
3. Chapman S., An outline of a theory of magnetic storms, *Proc. Roy. Soc.*, **A95**, 61—83 (1918).
4. Dessler A. J., Parker E. N., Hydromagnetic theory of geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **64**, 2239—2252 (1959).
5. Фельдштейн Я. И., Некоторые проблемы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах, *Геомагнетизм и аэронавтика*, **3**, 227—239 (1963).
6. Фельдштейн Я. И., Старков Г. В., Динамика полосы полярных сияний и полярные магнитные возмущения, *Planet. Space Sci.*, **15**, 209—229 (1967).
7. Фельдштейн Я. И., Старков Г. В., Овал полярных сияний в периоды МГГ и МГСС и кольцевой ток в магнитосфере, *Planet. Space Sci.*, **16**, 129—133 (1968).

8. Frank L. A., Van Allen J. A., Craven J. D., Large diurnal variations of geomagnetically trapped and of precipitated electrons observed at low altitudes, *J. Geophys. Res.*, **69**, 3155—3167 (1964).
9. Hagg E. L., Electron densities of 8—100 electrons/cm<sup>3</sup> deduced from Alouette II high-latitude ionograms, *Canadian J. Phys.*, **45**, 27—36 (1967).
10. Хорошева О. В., Суточный дрейф замкнутого кольца полярных сияний, *Геомагнетизм и аэрономия*, **2**, 839—850 (1962).
11. Moos N. A. F., Magnetic observations made at the Government Observatory, Bombay, for the period 1846—1905 and their discussion, Part I. Magnetic data and instruments; Part II. The phenomenon and its discussion, Government Central Press, Bombay, 1910.
12. Muldrew D. B., F-layer ionization troughs deduced from Alouette data, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2635—2650 (1965).
13. Nagata T., Polar geomagnetic disturbances, *Planet. Space Sci.*, **11**, 1395—1429 (1963).
14. Никольский А. П., О географическом распределении магнитных возмущений в околополюсной области Арктики, *Докл. АН СССР*, **109**, 939—942 (1956).
15. Pigott W. R., Studies of ionospheric absorption, *Research in Geophysics*, Vol. 1, ed. Hugh Odishaw, The MIT Press, Cambridge, Mass., 1964, p. 277—297.
16. Roach F. E., Roach J. R., Stable 6300 Å auroral arcs in midlatitudes, *Planet. Space Sci.*, **11**, 523—545 (1963).
17. Sharp G. W., Mid-latitude trough in the night ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1345—1356 (1966).
18. Stone E. C., Local time dependence of non-Störmer cutoff for 1.5-MeV protons in quiet geomagnetic field, *J. Geophys. Res.*, **69**, 3577—3582 (1964).
19. Stringer W. J., Belon A. E., The statistical auroral zone during IQSY, and its relationship to magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, **72**, 245—250 (1967).
20. Stringer W. J., Belon A. E., Akasofu S.-I., The latitude of auroral activity during periods of zero and very weak magnetic disturbance, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **27**, 1039—1044 (1965).
21. Thomas L., The temporal distribution from storm-type sporadic E in the Northern Hemisphere, Some ionospheric results obtained during the International Geophysical Year, ed. W.J.G. Beynon, Elsevier Publ. Co., New York, 1960, p. 172—179.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

##### *Солнечные протоны*

- Barcus J., Increase in cosmic-ray cutoffs at high latitudes during magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4694—4700 (1969).
- Bostrom C. O., Entry of low energy solar protons into the magnetosphere, 3rd ESLAB/ESKIN Symposium, Noordwijk, Holland, Sept. 1969.
- Evens L. C., Stone E. C., Access of solar protons into the polar cap: A persistent north-south asymmetry, California Inst. Tech. Pasadena, July 1969.
- Gall R., Jimenez J., Orozco A., Directions of approach of cosmic rays for high latitude stations, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3529—3540 (1969).
- Montgomery M. D., Singer S., Penetration of solar energetic protons into the magnetotail, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2869—2880 (1969).
- Smart D. E., Shea M. A., Gall R., The daily variation of trajectory-derived high — latitude cutoff rigidities in a model magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4731—4738 (1969).
- Williams D. J., Bostrom C. O., Proton entry into the magnetosphere on May 26, 1967, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3019—3026 (1969).

*Плазмосфера*

- Andrews M. K., Thomas J. O., Electron density distribution above the winter pole, *Nature*, **221**, 223—227 (1969).
- Banks P. M., Holzer T. E., The polar wind, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6846—6854 (1968).
- Carpenter D. L., Park C. G., Taylor H. A., Brinton H. C., Multi-experiment detection of the plasmapause from EOGO satellites and antarctic ground stations, *J. Geophys. Res.*, **74**, 1837—1847 (1969).
- Грингауз К. И., Low-energy plasma in the earth's magnetosphere, *Rev. Geophys.*, **7**, 339—378 (1969).
- Taylor H. A., Jr., Brinton H. C., Pharo III, M. W., Contraction of the plasmasphere during geomagnetically disturbed periods, *J. Geophys. Res.*, **73**, 961—968 (1968).
- Taylor H. A., Jr., Brinton H. C., Carpenter D. L., Bonner F. M., Heyborne R. L., Ion depletion in the high-latitude exosphere; simultaneous OGO 2 observations of the light ion trough and the VLF cutoff, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3517—3528 (1969).
- Thomas J. O., Andrews M. K., The transpolar exospheric plasma. 3. A unified picture, *Planet. Space Sci.*, **17**, 433—446 (1969).
- Thomas J. O., Andrews M. K., Transpolar exospheric plasma. 1. Plasmasphere termination, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7407—7417 (1968).
- Вершинина Т. И., Горовой М. Д., Латыпова Р. Х., Мишин В. М., Об основных зонах максимума магнитной активности, *Геомагнетизм и аэрономия*, **6**, № 2 (1966).
- Мишин В. М., Сайфудинова Т. И., Об основных зонах корпускулярных вторжений в нижнюю ионосферу, Сб. «Физика магнитосферы и полярные бури», Иркутск, 1968, стр. 355—397.
- Мишин В. М., Самсонов В. П., Сайфудинова Т. И., Курдюков В. А., Об основных зонах корпускулярных вторжений в ионосферу, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАГА, Мадрид, сентябрь 1969 г.
- Мишин В. М., Попов Г. В., Основные зоны авроральной активности, электроджеты и строение магнитосферы, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАГА, Мадрид, сентябрь 1969 г.

# Суббурия в полярных сияниях и связанные с ней магнитные возмущения

## 2. 1. Введение; типичная суточная вариация

Тесная взаимосвязь между развитием полярных сияний и полярными магнитными возмущениями исследовалась на протяжении многих лет [19, 20, 22]. Однако сравнительно недавно стали более ясными крупномасштабное развитие полярных сияний во всей полярной области и их детальная взаимосвязь с соответствующей геомагнитной активностью. В этой главе будут рассмотрены отдельные особенности развития полярных сияний и геомагнитные возмущения только в непосредственной близости от полярных сияний. В гл. 3 геомагнитные возмущения, связанные с суббурей в полярных сияниях, будут изучены по магнитограммам, собранным с сети станций северного полушария.

### 2. 1. 1. Суббурия в полярных сияниях

Особенности развития сияний зависят существенно как от всемирного, так и местного времени. Поэтому при наблюдениях из определенной точки на поверхности Земли очень трудно выявить различие между изменениями, обусловленными всемирным или местным временем.

При наблюдении в течение ночи из определенной точки, например со станции зоны полярных сияний, сияние появляется сначала около северного горизонта в виде свечения; это объясняется тем, что наблюдатель видит только верхнюю часть дуги (или дуг). По мере приближения к полуночи полярное сияние смещается к экватору, по направлению к станции, так что становится хорошо видна нижняя граница. Как правило, сияния остаются довольно спокойными и однородными до 21<sup>h</sup> LT, за исключением некоторых кратковременных периодов появления лучей и складок. Между 21 и 23<sup>h</sup> LT можно наблюдать один-два раза складки, перемещающиеся быстро к западу вдоль дуги. В большинстве случаев эта активность не длится более 30 мин, и полярные сияния быстро возвращаются к спокойной форме. Спокойные формы в вечерние часы часто называют *формами до фазы распада*.



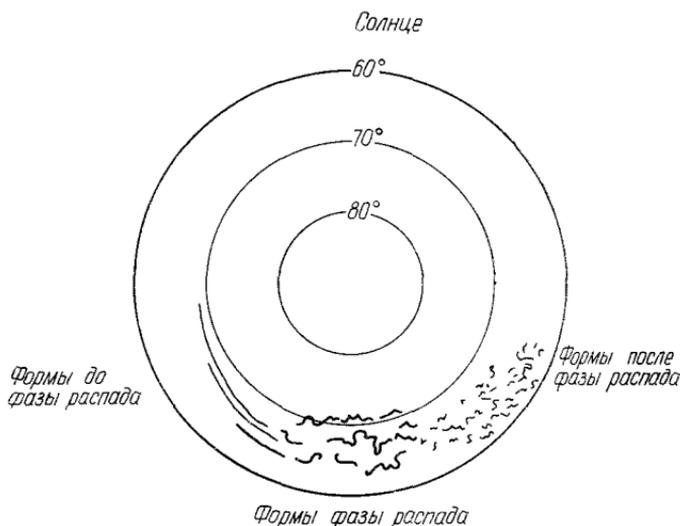
Р и с. 14. Пример трех циклов развития полярного сияния, наблюдавшихся в течение одной ночи. Саскатун, 13 марта 1958 г.

В 23<sup>h</sup> LT дуги располагаются близко к зениту. Постепенное смещение полярных сияний к экватору вызвано тем, что наблюдатель вращается вместе с Землей под овалом полярных сияний, который эксцентричен относительно геомагнитного полюса (разд. 1.4). Поэтому расстояние между овалом и станцией уменьшается к полуночи.

Между 23 и 2<sup>h</sup> LT полярные сияния внезапно становятся активными и охватывают заметную часть неба. Это явление получило название *фазы распада*. После фазы распада создается впечатление, что светящиеся пятна в виде облаков распространяются по всему небу. Большинство пятен пульсирует. Эту стадию часто называют периодом *после фазы распада*.

Вслед за этой стадией развития сияний при тщательном наблюдении можно снова заметить образование спокойной формы. Аналогичный цикл изменения форм полярных сияний может повториться — от спокойной формы к активной, затем к пятнам и наконец опять к спокойной форме. В некоторые ночи такой цикл (цикл развития полярного сияния) может повторяться два, три или даже четыре раза. На рис. 14 приведен пример, когда цикл повторился три раза (представлены негативы фотографий).

Морфологические исследования развития сияний сначала принесли наилучшие результаты при изучении особенностей активности полярных сияний, которая статистически наиболее рельефно выявляется в течение ночи на отдельных обсерваториях. На станциях зоны сияний типичными формами полярных сияний являются спокойные дуги в вечерние часы, активные лучистые полосы около полуночи и пятна в утренние часы. В результате этих исследований



Р и с. 15. Схема, иллюстрирующая фиксированную картину полярных сияний, под которой Земля совершает один оборот за сутки.

в течение долгого времени предполагалось, что существует фиксированное распределение активности полярных сияний, под которым Земля совершает один оборот в сутки. Другими словами, полярные сияния обычно имеют спокойную форму в вечерние часы, активную

форму около полуночи и форму пятен в утренние часы (рис. 15)\*.

Однако тщательный анализ одновременных фотографий всего неба с большого числа обсерваторий показал, что представление о фиксированном распределении активности полярных сияний не дает правильной картины планетарной активности сияний в высокоширотных областях. В определенный период все сияния в д о л ь о в а л а (а не вдоль з о н ы) полярных сияний могут иметь спокойную форму. Но эти спокойные условия время от времени нарушаются, в частности в период геомагнитных бурь. Нарушение спокойных условий часто происходит внезапно и прежде всего проявляется на экваториальной границе овала в полуденном секторе. Затем активизация сияний распространяется по всем направлениям: к полюсу, к западу и к востоку вдоль овала, к экватору. После этого взрывного расширения активность сияний постепенно убывает всюду вдоль овала полярных сияний. Активность сияний во всей области высоких широт описана в терминах суббури в полярных сияниях [1]\*\*.

Распространение активности сияний к западу характеризуется специфичной особенностью, которая называется *движущимся к западу изгибом*. Эта деталь перемещается быстро вдоль спокойной дуги, располагающейся в вечернем секторе овала. Активизация сияний в вечернем секторе длится недолго, так как изгиб быстро перемещается в поле зрения отдельной станции через небосвод от восточного до западного горизонта. Скорость движения изгиба  $\sim 1$  км/сек; после его прохождения восстанавливается спокойное состояние. Поэтому эта особенность развития сияний не выявляется при статистическом исследовании и спокойная форма является наиболее часто наблюдаемой характеристикой вечернего сектора. Кроме того, поскольку овал обычно располагается в вечернем секторе, по крайней мере на несколько сот километров к полюсу от типичных станций зоны полярных сияний, таких, как Колледж (гм. широта  $64,7^\circ$ ), Кируна (гм. широта  $65,3^\circ$ ), Маккуори (гм. широта  $-61,1^\circ$ ), визуальные наблюдения (или камера полного

---

\* Полярные сияния в дневном секторе на широте  $\sim 76^\circ$  появляются в зените так же часто, как и в ночном на широте  $\sim 67^\circ$  [Я. И. Фельдштейн, сб. «Исследования полярных сияний», Изд-во АН СССР, № 4, 61—78 (1960)]. Отсутствие сияний в дневные часы на рис. 15 и 16 объясняется тем, что в период, когда появились эти рисунки, Акасофу исследовал распределение сияний только в ночном секторе [S.-I. Akasofu, Space Sci. Rev., 4, 498—540 (1965); S. Chappin, S.-I. Akasofu, Research in Geophys., 1, 367—400 (1965)]. — Прим. ред.

\*\* В [1] активность сияний при развитии суббури описана только для ночного сектора. Дневной сектор рассмотрен в работе Г. В. Старкова, Я. И. Фельдштейна [Геомагнетизм и аэронавтика, 7, 367—369 (1967)], в которой впервые приведена планетарная схема развития суббури в полярных сияниях, аналогичная изображенной на рис. 17. — Прим. ред.

обзора неба) дают недостаточную информацию об активных особенностях сияний в вечерние часы.

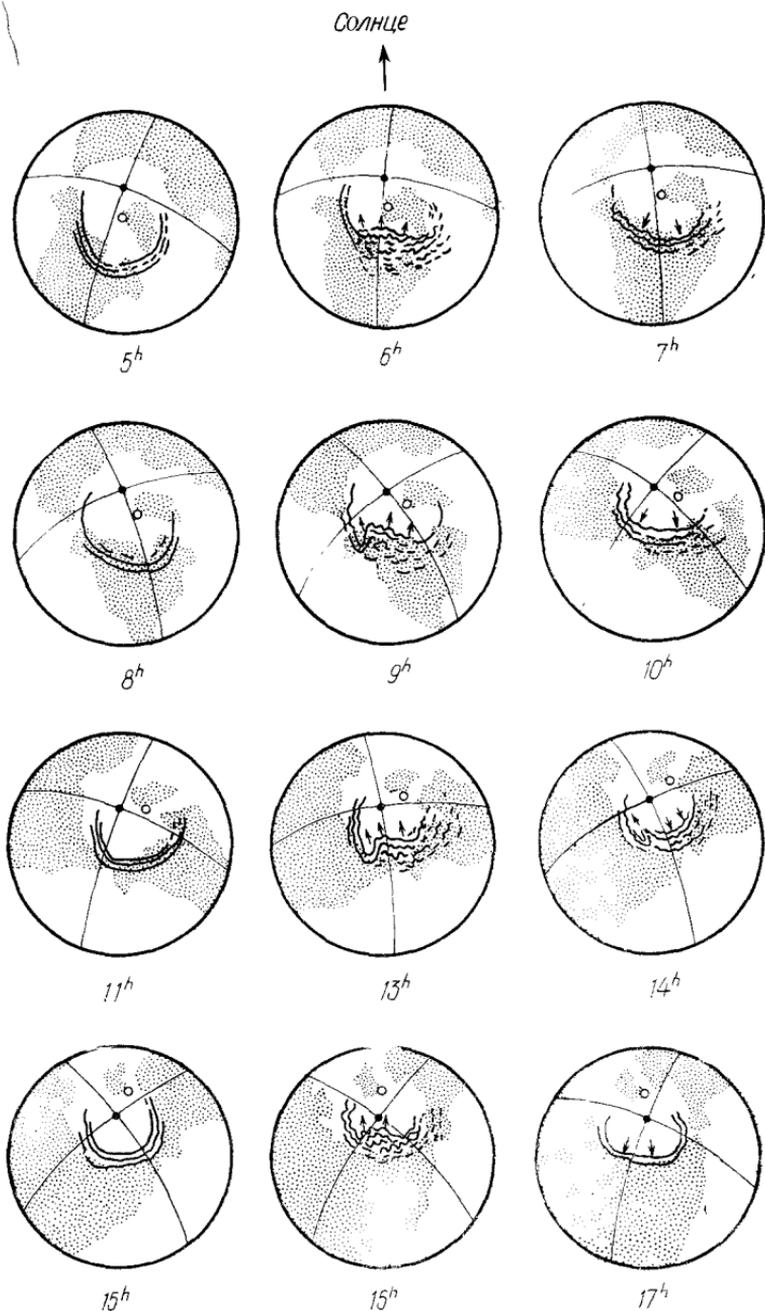
В утренние часы формы полярных сияний распадаются на пятна даже при слабой суббуре. Это явление особенно хорошо выявляется после эпохи максимума суббури в полярных сияниях. Поэтому если суббури происходят очень часто — с интервалом меньше нескольких часов, — то полярные сияния не восстанавливают полностью первоначальной спокойной формы. По этой причине полярные сияния в виде пятен в утренние часы имеют наибольший статистический вес.

Таким образом, нетрудно согласовать кажущиеся различия между представлениями о фиксированном распределении сияний и суббуре. Если полагать, что распределение активности сияний, приведенное на рис. 15, имеет место только время от времени, то это и будет в очень приближенном виде концепция суббури в полярных сияниях. Спокойные формы существуют во всех секторах местного времени в период между двумя суббурами в полярных сияниях. Это положение легко обосновать тем, что фиксированное распределение сияний (см. рис. 15) не может описать развития активности полярных сияний, изображенного на рис. 14.

Концепция суббури в полярных сияниях предполагает, что начало активного периода развития сияний определяется всемирным временем, тогда как характеристики этой активности вдоль овала в период суббури зависят от местного времени (рис. 16).

В 5<sup>h</sup> UT спокойные дуги располагаются вдоль всего овала полярных сияний. Центральная Канада располагается в это время в полуденном секторе. Предположим, что суббуря начинается несколько ранее 6<sup>h</sup> UT. Быстрое движение к полюсу всей системы форм полярных сияний наблюдается в центральной Канаде в период фазы развития. В 6<sup>h</sup> UT — через 10 мин после начала суббури — самая северная полоса сияний достигает геомагнитной широты почти 80°. В это время только незначительное увеличение яркости спокойных дуг можно наблюдать на Аляске, но большинство дуг на утренней стороне распадается на пятна. Пятна дрейфуют к востоку, т. е. к утреннему сектору. Сияния, которые располагаются вдоль полуденной части овала, у побережья Сибири, становятся в это время ярче. В 7<sup>h</sup> UT суббуря начинает затухать, и некоторые дуги в полуденном секторе возвращаются к своему исходному положению. В вечернем секторе движущийся к западу изгиб, образованный движением к полюсу в полуденном секторе, вырождается в неправильную полосу после перемещения на значительное расстояние. Однако активные полосы распадаются на пятна. К 8<sup>h</sup> UT восстанавливаются спокойные условия.

Немного ранее 9<sup>h</sup> UT начинается другая суббуря. Граница между Аляской и Канадой, где наблюдается быстрое движение сияний к полюсу, располагается в это время в полуденном секторе.

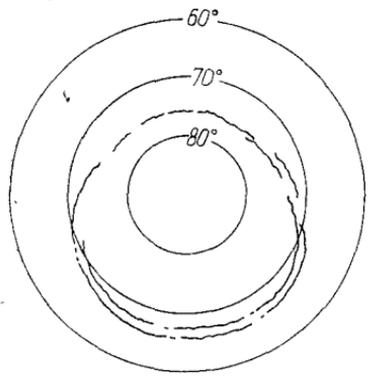


Р и с. 16. Схема, иллюстрирующая концепцию суббури в полярных сияниях, в предположении, что четыре суббури появляются между 5 и 17<sup>h</sup> UT, а именно в 6, 9, 13 и 16<sup>h</sup> UT.

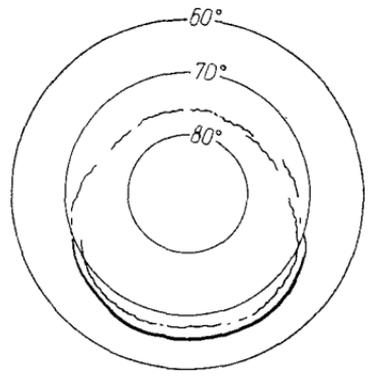
На центральной Аляске, которая передвинулась в поздний вечерний сектор, движение к полюсу наблюдается сначала как интенсивное свечение у восточного горизонта, а затем как большая складка, быстро перемещающаяся к западу. Позже складка может наблюдаться (обычно через 10—15 мин) как движущийся к западу изгиб на небосводе Восточной Сибири. Полярные сияния над американским континентом разрушаются и наблюдаются в виде дрейфующих к востоку пятен. В 10<sup>h</sup> UT активные полосы начинают возвращаться к начальному положению от самого северного положения, которого они достигли над Северным Ледовитым океаном. Полуденные сияния над островами Шпицберген также становятся активными. К 11<sup>h</sup> UT вторая суббурия в основном заканчивается, и на ночном полушарии наблюдаются три спокойные дуги.

Незадолго до 13<sup>h</sup> UT начинается новая суббурия, и наиболее активное развитие сияний наблюдается над Восточной Сибирью и Беринговым проливом, которые в это время расположены в полуночном секторе. Над Аляской иррегулярные складчатые полосы быстро дрейфуют к востоку. Дуги над центральной Канадой распадаются на пятна вскоре после начала суббурии. В 14<sup>h</sup> UT суббурия вступает в фазу восстановления; группа петель дрейфует вдоль побережья Северного Ледовитого океана в Сибири. Полуденные сияния над Гренландией также становятся активными. Суббурия практически заканчивается к 15<sup>h</sup> UT, и полярные сияния вдоль овала приобретают спокойную форму. Следующая суббурия начинается немного ранее 16<sup>h</sup> UT. В период этой суббурии наибольшие изменения при развитии сияний наблюдаются в центральной Сибири и к западу от нее. Дуги над Аляской распадаются, и образующиеся дрейфующие пятна видны в сумеречном небе.

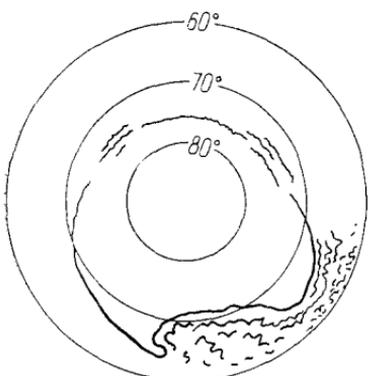
Концепция суббурии в полярном сиянии была развита, чтобы систематически описать такую активность полярных сияний. На рис. 17 приведена модель развития и затухания суббурии в полярных сияниях ( $A \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$ ). Суббурия в полярных сияниях характеризуется двумя фазами: фазой развития и фазой восстановления. Первым указанием на начало суббурии является внезапное уярчение одной из спокойных дуг, расположенных в полуночном секторе овала, или внезапное образование новой дуги ( $B$ ;  $T=0-5$  мин). В большинстве случаев после усиления яркости существующей дуги или образования новой дуги начинается ее быстрое движение к полюсу, приводящее к появлению «выпуклости» в полярных сияниях в околополуночном секторе ( $V$ ;  $T=5-10$  мин). Так называемый распад сияний происходит в выпуклости, но он не характеризует целиком развитие сияния. По мере развития суббурии выпуклость расширяется во всех направлениях ( $G$ ;  $T=10-30$  мин). На вечерней стороне расширяющейся выпуклости появляется крупномасштабная складка, которая быстро движется к западу вдоль дуги. Она получила название движущегося к западу изгиба. На



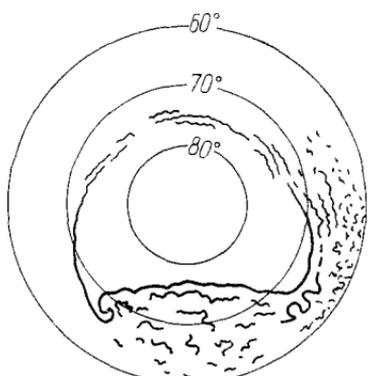
А.  $T=0$



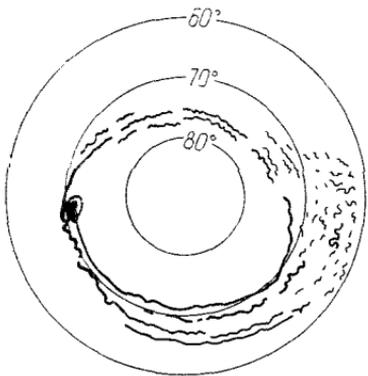
Б.  $T=0 \sim 5 \text{ мин}$



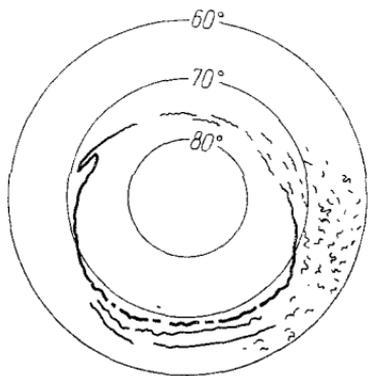
В.  $T=5-10 \text{ мин}$



Г.  $T=10-30 \text{ мин}$



Д.  $T=30 \text{ мин} - 1 \text{ час}$



Е.  $T=1-2 \text{ час}$

Р и с. 17. Схема, иллюстрирующая развитие суббури в полярных сияниях.

утренней стороне выпуклости дуги распадаются на пятна, которые дрейфуют к востоку со скоростью  $\sim 300$  м/сек.

Когда расширяющаяся выпуклость достигает наибольшей широты, начинается фаза восстановления суббури ( $D$ ;  $T=30$  мин — 1 час). Выпуклость начинает сжиматься. Движущийся к западу изгиб может все еще продолжать движение на значительные расстояния после окончания фазы развития, но в конце концов вырождается в иррегулярные полосы. В утреннем секторе движущиеся к востоку пятна сохраняются до конца фазы восстановления ( $E$ ;  $T=1-2$  час). В конце суббури общая ситуация аналогична той, которая была до начала суббури.

Концепцию суббури в полярном сиянии можно проверить, фотографируя всю полярную область установленной на спутнике камерой или наблюдая полярные сияния в определенном интервале местного времени в течение нескольких часов. Если концепция суббури в полярных сияниях справедлива, то наблюдатель, который остается постоянно в полуночном или позднем вечернем секторе, будет регистрировать чередующиеся всплески активности от спокойных форм полярных сияний, т. е. спокойные дуги время от времени будут переходить в активные лучистые полосы. На рис. 16 спокойные дуги, наблюдаемые в полуночном секторе в  $5^h$  UT, становятся активными в  $6^h$  UT. Но спокойные формы восстанавливаются после окончания суббури ( $8^h$  UT); новая суббуря начинается около  $9^h$  UT. Если же верны прежние представления о фиксированном распределении сияний по местному времени, то полярные сияния в полуночном и позднем вечернем секторах будут всегда оставаться активными (как в  $6$  или  $9^h$  UT).

Высокоскоростные реактивные самолеты позволили находиться в течение нескольких часов в одном и том же интервале местного времени вдоль географической параллели  $60^\circ$  или в более высоких широтах. Ниже будут описаны результаты, которые были получены весной 1968 г. самолетной экспедицией по исследованиям полярных сияний НАСА. Полеты начинались в Черчилле (гм. широта  $68,7^\circ$ ) и кончались в Фэрбенксе (гм. широта  $64,7^\circ$ ).

Самолет вылетел из Черчилля в  $5^h 21^m$  UT 3 марта 1968 г. ( $K_p$  2+, 1+, 3-, 3-, 2+, 3+, 4<sub>0</sub>, 4-) и достиг форта Юкон в  $9^h 06^m$  UT. Местная полночь в этих двух пунктах приходится на  $6$  и  $10^h$  UT, а местная геомагнитная полночь наступает около  $7^h 25^m$  и  $11^h 40^m$  UT соответственно. Полет проходил таким образом, что самолет летел примерно вдоль зоны полярных сияний — вдоль геомагнитной параллели  $67^\circ$ . Таким образом, самолет был приблизительно в позднем вечернем секторе овала полярных сияний в течение 3 час 45 мин. Достигнув форта Юкон, самолет повернул на юг и подлетел к Анкориджу в  $9^h 55^m$  UT, пролетев над Фэрбенксом в  $9^h 24^m$  UT. Затем самолет повернул на север и приземлился в Эйелсоне (близ Фэрбенкса) в  $10^h 36^m$  UT. Общее время полета соста-



Р и с. 18. Фотографии, полученные камерой полного обзора неба, при полете реактивного самолета 3 марта 1968 г., находившегося в позднем вечернем секторе в период всего полета от Черчилля до Фэрбенкса.

вило 5 час 15 мин. В период полета между Черчиллем и фортом Юкон сияния наблюдались как к северу, так и к югу, поэтому во время этой части полета самолет был в пределах овала.

С момента взлета ( $5^{\text{h}} 21^{\text{m}}$  UT) до  $7^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  UT сияния на всем небосводе характеризовались время от времени некоторыми активными особенностями (см. фотографии  $6^{\text{h}} 30^{\text{m}}$  и  $6^{\text{h}} 34^{\text{m}}$  UT на рис. 18), но оставались в основном спокойными. В  $7^{\text{h}} 10^{\text{m}}$  UT сияния внезапно стали яркими в восточной части небосвода, и началась суббуря в полярных сияниях.

Эта активность обусловлена чрезвычайно интенсивным движущимся к западу изгибом. Изгиб располагался над самолетом около  $7^{\text{h}} 13^{\text{m}}$  UT; самолет находился в это время около западного побережья Большого Неволничьего озера ( $62^{\circ}$  с.ш.,  $117^{\circ}$  з.д.). (См. фотографии с  $7^{\text{h}} 10^{\text{m}}$  до  $7^{\text{h}} 15^{\text{m}}$  UT.) Значительная активность в полярных сияниях продолжалась до  $8^{\text{h}} 21^{\text{m}}$  UT. К  $9^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  UT, незадолго до того, как самолет достиг форта Юкон, суббуря практически закончилась.

После  $9^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  UT до начала новой суббури в  $10^{\text{h}} 02^{\text{m}}$  UT преобладали спокойные сияния в южной части небосвода. Это подтвердилось последующим полетом самолета к югу. Как можно видеть на фотографии небосвода в  $9^{\text{h}} 30^{\text{m}}$  UT, полярные сияния состояли из нескольких спокойных дуг, расположенных в основном несколько севернее Фэрбенкса. Такие спокойные условия соответствуют изображенным на рис. 16 между  $7^{\text{h}}$  и  $9^{\text{h}}$  UT. Различие состоит лишь в том, что суббуря при полете самолета началась около  $7^{\text{h}} 10^{\text{m}}$ . В  $10^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  UT — через 5 мин после поворота самолета на север — спокойные сияния наблюдались далеко к северу.

Новая вспышка активности началась вдоль спокойной формы сияния около  $10^{\text{h}} 02^{\text{m}}$  UT. Фотография, сделанная в  $10^{\text{h}} 15^{\text{m}}$  UT, показывает интенсивный изгиб, который двигался вдоль сияния, очень спокойного в  $10^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  UT. Различие в расположении двух изгибов на фотографиях обусловлено положением самолета относительно изгибов в сияниях. Типичное развитие полярных сияний, характерное для изгиба, зарегистрировано в Колледже около зенита примерно в  $10^{\text{h}} 13^{\text{m}}$  UT. Условия в это время были совершенно аналогичны изображенным на рис. 16 для  $9^{\text{h}}$  UT.

## 2. 1. 2. Полярная магнитная суббуря

Суббуря в полярных сияниях связана с интенсивными геомагнитными возмущениями. Так же как и развитие полярных сияний в период суббурь, начало полярных магнитных суббурь зависит от всемирного времени, тогда как характеристики возмущенного магнитного поля определяются местным временем. Такие геомагнитные возмущения называются полярными магнитными суббурями. Последние достижения в изучении геомагнитных возмущений позволили

получить трехмерную токовую систему, которая может быть причиной полярной магнитной суббури.

В дальнейшем для изучения полярных магнитных суббурь применяются два полностью независимых приближения. Первое приближение заключается в получении одновременных векторов геомагнитного возмущения на большом числе станций и построении токовой системы, которая может дать наблюдаемое увеличение магнитного возмущения. Такой метод назван в монографии *SD-анализом*. Как правило, предполагается, что токи расположены на сферической оболочке (в ионосфере). Однако этот результат не означает, что такая токовая система существует в ионосфере, а просто выражает распределение векторов геомагнитного возмущения. Поэтому она называется *эквивалентной токовой системой*, и ее не следует смешивать с реальной токовой системой. Другое приближение основано на амплитуде геомагнитных возмущений (обычно *H*-составляющей) и их суточных и сезонных характеристиках, а не на векторах возмущений. В монографии это приближение называется *спиральным анализом* [12, 21, 23, 24, 29—32].

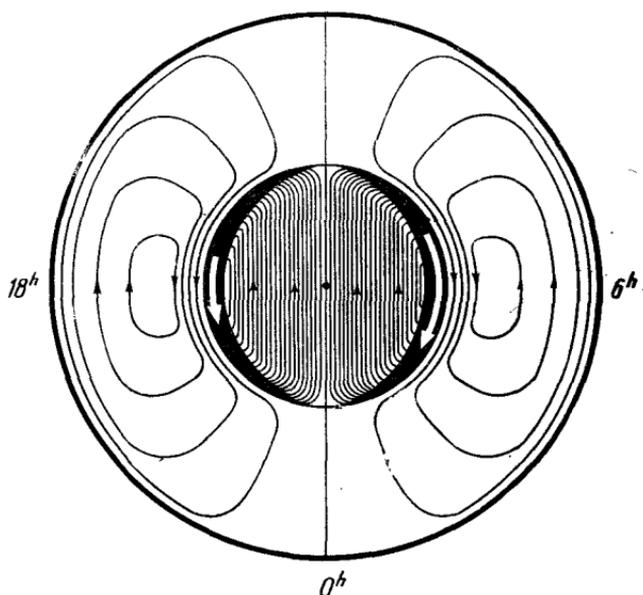
1. *SD-анализ*. Чепмен [13, 14], основываясь на методе Муса, установил так называемую *SD*-токовую систему. Его анализ эквивалентен анализу Фурье возмущенного поля (*D*-поля) *вдоль кругов постоянной геомагнитной широты*

$$D = c_0 + \sum_n c_n \sin(n\varphi + \varepsilon_n), \quad (1)$$

где  $\varphi$  — геомагнитная долгота, а  $\varepsilon_n$  — фазовый угол. Первый член соответствует  $D_{st}$ -компоненте, а второй член — *DS*-компоненте. Чепмен впервые получил *SD*-вариацию, которая представляет среднюю *DS*-вариацию за первые два дня бури. Токовая система *SD*-вариаций приведена на рис. 19. Она представляет собой статистическое распределение суточных вариаций магнитного поля в терминах эквивалентной токовой системы.

Позднее Вестин [34], Силсби и Вестин [28] и Фукушима [18] получили эквивалентные токовые системы или распределение возмущенных векторов магнитного поля и подтвердили результаты Чепмена. Как будет видно из дальнейшего изложения, этот анализ придавал особое значение геомагнитной параллели  $67^\circ$ , т. е. зоне полярных сияний, которая, как теперь известно, имеет только статистический смысл. Поэтому в то время не удалось выявить эксцентricности распределения геомагнитных явлений в полярной области, т. е. установить, что основные геофизические явления протекают вдоль овала, а не вдоль зоны полярных сияний. Этот недостаток, конечно, нельзя полностью отнести на счет анализа; частично он обусловлен трудностями выявления эксцентricности овальной системы при использовании геомагнитных координат, особенно когда в полярной шапке отсутствует густая сеть обсерваторий.

Солнце  
12<sup>h</sup>



Р и с. 19.  $SD$ -токовая система.

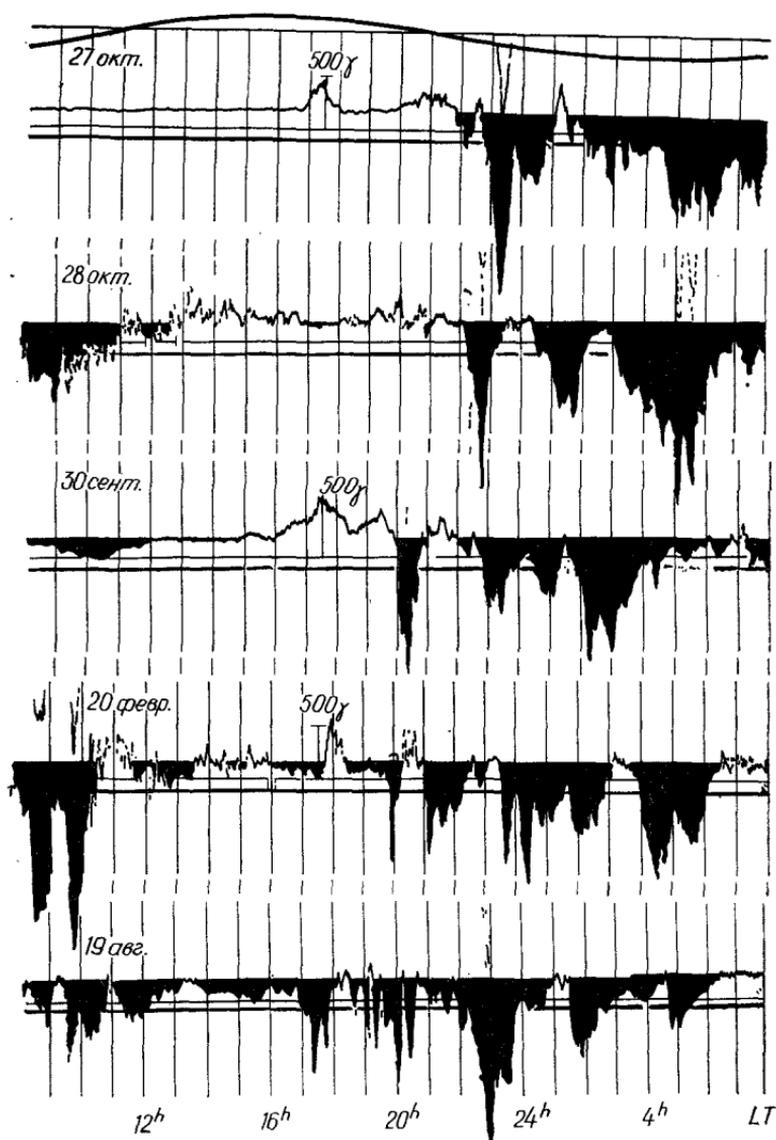
Высшие гармонические члены в уравнении (1) были названы  $D_i$ , где индекс  $i$  означает иррегулярную компоненту [15]. Таким образом, уравнение (1) можно переписать в виде

$$D \approx D_{st} + DS_1 + DS_2 + D_i,$$

где  $DS_1$  — суточная компонента, а  $DS_2$  — полусуточная компонента  $DS$ ; обычно  $DS_1 \gg DS_2$ . На рис. 20 сопоставлены  $(D_{st} + DS_1)$  и типичные суточные магнитограммы Колледжа (гм. широта  $64,7^\circ$ ).  $D$  (в гаммах) определяется из соотношения [33]

$$D(H) \approx -60 + 182 \sin(\varphi + 206^\circ)$$

вдоль зоны сияний для больших бурь. Из сопоставления действительных вариаций  $H$  и приведенных в верхней части рисунка  $D(H)$  непосредственно следует, что, хотя  $DS_1$  указывает правильный знак изменений поля, реальные магнитограммы состоят из короткоживущих импульсов, которые значительно больше, чем амплитуда  $DS_1(H)$ . На рис. 20 понижения напряженности поля, так называемые *отрицательные бухты*, заштрихованы, чтобы подчеркнуть их импульсную природу. Поэтому  $D_i$  — это не малые иррегулярные флуктуации, накладывающиеся на  $DS$ , а важная особенность геомагнитных возмущений в зоне полярных сияний. Такие импульсные



Р и с. 20. Несколько примеров магнитограмм горизонтальной составляющей, полученных на обсерватории Колледж в 1950 г. Верхняя кривая —  $SD$ -вариация для большой бури [33].

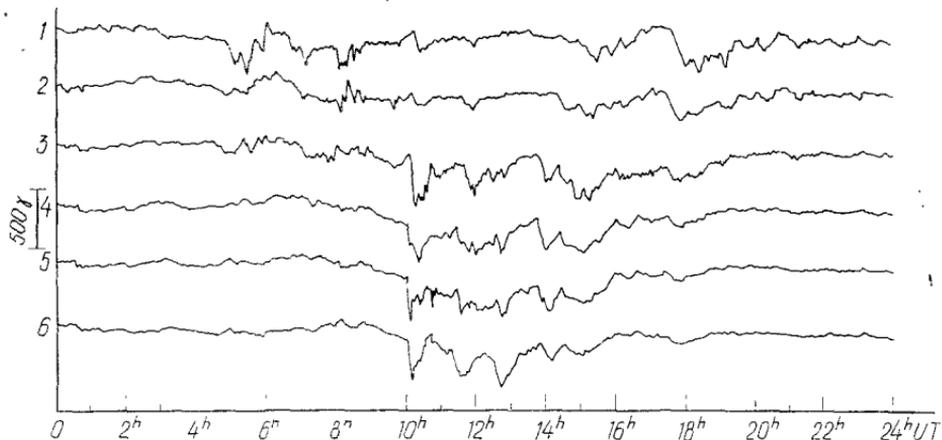
изменения являются одним из основных проявлений полярной магнитной суббури:

$$D \approx \sum D_i = \sum \text{Полярные магнитные суббури.}$$

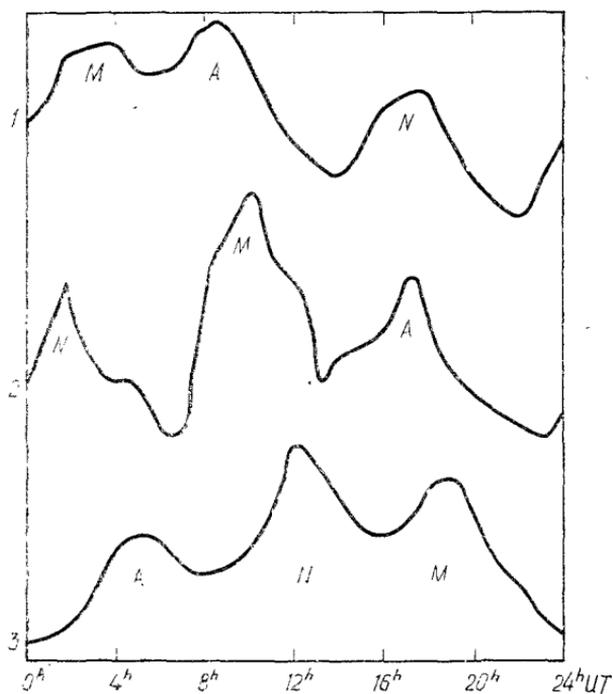
Теперь следует коренным образом изменить наши представления о полярных магнитных возмущениях. *SD*-анализ предполагает, что *SD*-токовая система фиксирована относительно Солнца, а Земля вращается под такой фиксированной токовой системой. Принимается, что интенсивность *SD*-токов остается постоянной в течение суток. На станции зоны сияний суточные вариации наблюдаются вследствие того, что станция проходит под различными частями *SD*-токовой системы. Современная точка зрения заключается в том, что токовая система, которая имеет некоторое сходство с *SD*-системой, появляется только время от времени на  $\sim 1-3$  час, как правило, импульсным образом в виде последовательных всплесков, а Земля вращается под этой токовой системой. Следует отметить, что абсолютная величина тока гораздо больше, чем можно ожидать исходя из амплитуды *SD*-вариации. Эта концепция полярной магнитной суббури аналогична той, которую Биркеланд [11] назвал полярной элементарной бурей. Биркеланд отмечал, что имеются по крайней мере четыре типа элементарных бурь: экваториальная положительная и отрицательная и полярные положительная и отрицательная. Экваториальная положительная элементарная буря соответствует в современном представлении внезапному началу бури и начальной фазе геомагнитных бурь, а экваториальная отрицательная элементарная буря отождествляется с главной фазой бури. Два типа полярных элементарных бурь соответствуют основным особенностям полярной магнитной суббури.

На рис. 20 видны возрастания напряженности поля в вечерние часы; они называются *положительными бухтами*. В (эквивалентной) *SD*-токовой системе положительные бухты обусловлены восточным током. Когда вычислялась изображенная на рис. 19 *SD*-токовая система, зона полярных сияний считалась областью мгновенного появления полярных сияний и, следовательно, областью наиболее интенсивной магнитной активности в вечернем секторе. Предполагалось, что восточный ток вдоль зоны полярных сияний наиболее интенсивен и генерирует вторичные токи как к полюсу, так и к экватору от зоны полярных сияний. Лишь сравнительно недавно были обнаружены интенсивные отрицательные бухты на станциях, расположенных на несколько градусов ближе к полюсу, чем зона полярных сияний. Из примера, приведенного на рис. 21, видно, что, когда возрастания напряженности магнитного поля наблюдались на типичных станциях зоны сияний, таких, как Колледж, Хэли, Анкоридж, интенсивные понижения напряженности поля были зарегистрированы на о. Бартер (гм. широте  $70^\circ$ ) [35]. Этот пример показывает, что *SD*-токовая система не точно отображает распределение возмущения (гл. 3).

2. *Спиральный анализ*. Обычно амплитуда геомагнитных возмущений в высоких широтах (гм. широта  $\geq 60^\circ$ ) характеризуется



Р и с. 21. Одновременные записи вариаций  $H$ -составляющей магнитного поля 26 сентября 1958 г., полученные на меридиональной цепочке станций на Аляске [35]. 1 — о. Бартер, гм. широта  $70,0^\circ$ ; 2 — Барроу,  $68,6^\circ$ ; 3 — форт Юкон,  $66,7^\circ$ ; 4 — Колледж,  $64,7^\circ$ ; 5 — Хэли,  $63,6^\circ$ ; 6 — Анкоридж,  $61,0^\circ$ .



Р и с. 22. Суточные вариации амплитуды геомагнитных возмущений на станциях: 1 — бух. Тихая; 2 — Годхааб; 3 — о. Врангеля [25].

тремя максимумами в суточной вариации (рис. 22). Например, на о. Врангеля (гм. широта  $64,7^\circ$ ) первый максимум появляется в послеполуденном секторе ( $\sim 17^{\text{h}}$  LT), второй — в полуночном секторе ( $0^{\text{h}}$  LT) и третий — в утреннем секторе ( $7^{\text{h}}$  LT). На о. Врангеля  $\text{LT} = \text{UT} - 12^{\text{h}}$ . Эти три максимума названы А-, N- и М-максимумами соответственно.

Никольский [24] нашел, что при переходе от гм. широты  $60^\circ$  к полюсу М-максимум имеет тенденцию появляться все позднее в утреннем секторе. Поэтому если моменты наступления М-максимумов изобразить в полярной проекции, то они расположатся вдоль спиральной кривой, так называемой М-спирали. Мэйо [23] и Бурдо [12] провели дальнейший анализ и подтвердили существование этих трех спиралей (см. разд. 1.4 и рис. 6а, 7 и 9). Как указывалось в разд. 1.4, ряд геофизических явлений, таких, как эмиссия  $\text{H}\alpha$  (или  $\text{H}\beta$ ), полярные блэкауты, авроральные радиоотражения, спорадический слой  $E$ , имеют тенденцию появляться вдоль таких спиралей. Совокупность N- и М-спиралей соответствует овалу полярных сияний. Другими словами, N- и М-спирали являются сегментами овала полярных сияний. Спиральный анализ был очень полезен при изучении сложных особенностей геомагнитных возмущений в полярной шапке и действительно обнаружил сегменты овала полярных сияний.

К сожалению, этот анализ оперировал в основном амплитудами магнитных возмущений, а результаты интерпретировались Никольским в терминах вторжения энергичных частиц (так называемая штёрмеровская спираль). Поскольку визуальные сияния, как известно, обусловлены в основном электронами с энергиями в несколько килоэлектронвольт, а то и меньше, такая интерпретация неправдоподобна.

## 2. 2. Суббурия в полярных сияниях и соответствующие магнитные возмущения в полуночном секторе

В этом и в следующих двух разделах будет детально описано развитие сияний в полуночные, вечерние и утренние часы. Будут также рассмотрены геомагнитные возмущения, связанные с развитием полярных сияний в непосредственной близости от сияний.

Типичный пример взрывной фазы суббурии приведен на рис. 23. Серия фотографий была сделана на станции Фэрзуэлл (гм. широта  $61,5^\circ$ ) в полуночном секторе ( $10^{\text{h}}\text{UT} = 0^{\text{h}}\text{LT}$ ) 22 сентября 1957 г. В  $10^{\text{h}} 29^{\text{m}} \text{UT}$  дуга располагалась южнее Фэрзуэлла. Внезапно в  $10^{\text{h}} 30^{\text{m}} \text{UT}$  она стала ярче и начала двигаться к полюсу. К  $10^{\text{h}} 37^{\text{m}} \text{UT}$  (всего через 7 мин после начала) все небо было покрыто активными сияниями. Сияния были настолько яркие и активны, что камерами полного обзора неба было невозможно сфотографировать детали их структуры.

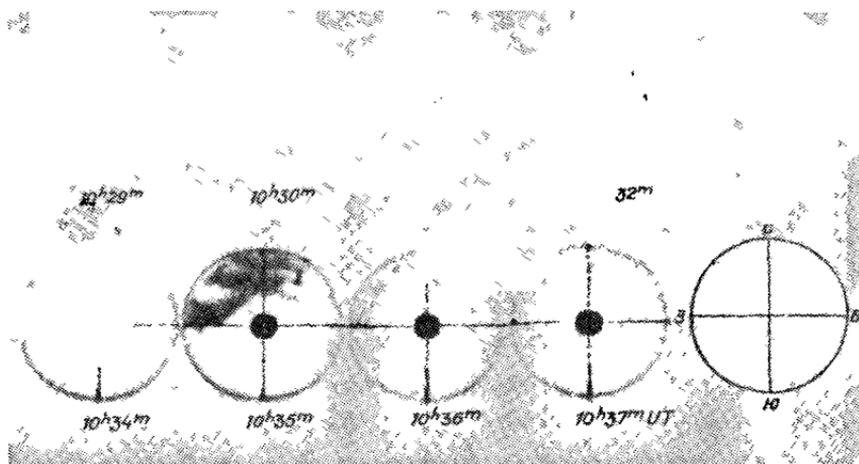
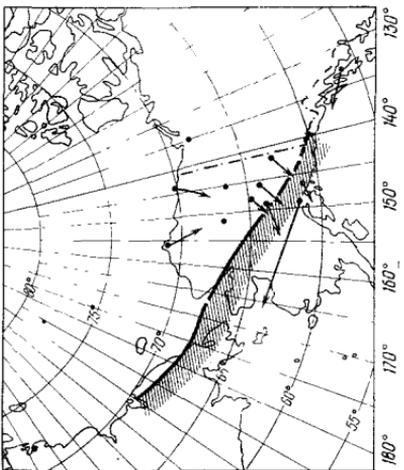
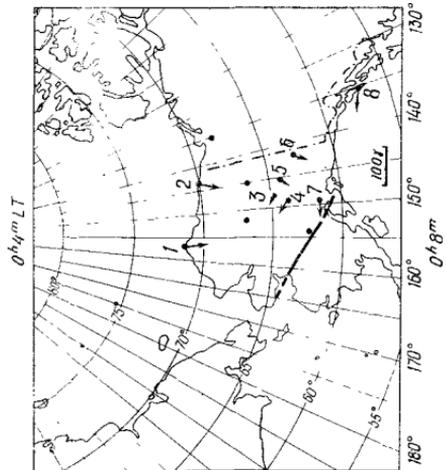
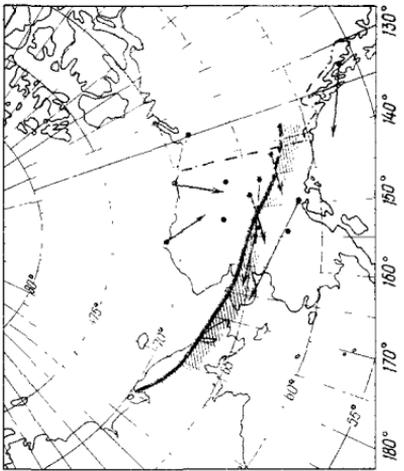
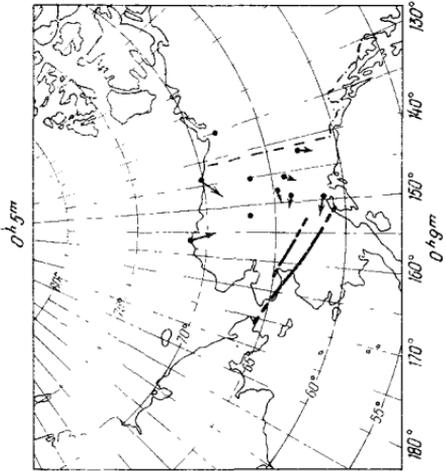
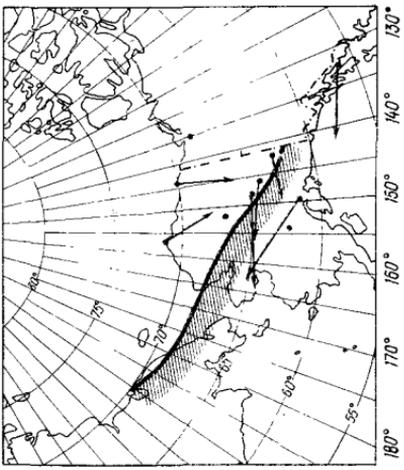
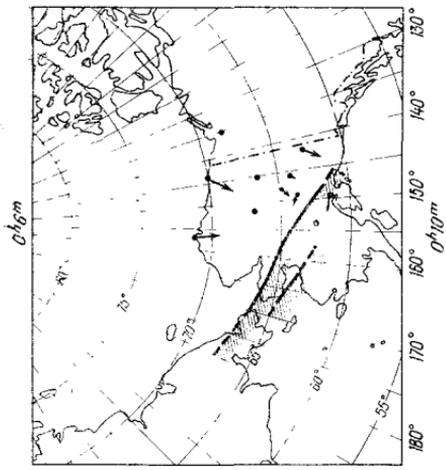


Рис. 23. Типичный пример взрывной фазы суббури в полярных сияниях, наблюдаемый в полуночном секторе. Фотографии камерой полного обзора неба, Фэрзуэлл, 22 сентября 1957 г.

На рис. 24 приведена взрывная фаза развития сияний, которая наблюдалась сетью камер полного обзора неба на Аляске в период МГГ. На первой диаграмме ( $10^{\text{h}}04^{\text{m}}$  UT, или  $0^{\text{h}}04^{\text{m}}$  LT, 12 февраля 1957 г.) слабая дуга наблюдалась около Анкориджа. В  $0^{\text{h}}05^{\text{m}}$  LT новая дуга образовалась ближе к полюсу, чем существовавшая ранее, и начала двигаться к полюсу. Последовательные положения переднего фронта выпуклости в полярных сияниях приведены на последующих диаграммах. В  $0^{\text{h}}18^{\text{m}}$  LT фронт достиг побережья Северного Ледовитого океана. На рис. 24 приведены также векторы эквивалентного тока. Векторы указывают направление эквивалентного тока, а длина их пропорциональна результирующей составляющей возмущенного магнитного поля в горизонтальной плоскости. Масштаб указан на первой диаграмме. Направление векторов магнитного возмущения в горизонтальной плоскости можно получить вращением векторов тока на  $90^\circ$  против часовой стрелки. Усиление магнитного возмущения наблюдается сначала в Анкоридже в  $0^{\text{h}}08^{\text{m}}$  LT, затем в Колледже, Хэли, Биг-Делте, Нортвэе (в  $0^{\text{h}}09^{\text{m}}$  LT).

Наибольшая геомагнитная широта, достигаемая выпуклостью в полярных сияниях, зависит от интенсивности суббури и широты, с которой начинается движение к полюсу. Нередко можно наблюдать выпуклость в высоких геомагнитных широтах  $\sim 80^\circ$ . На рис. 25а и 25б (негативы) показана выпуклость, достигшая обсерватории Моулд-Бей (гм. широта  $79,1^\circ$ ). 2 декабря 1965 г. выпуклость появилась только у горизонта в  $9^{\text{h}}50^{\text{m}}$  UT. Во втором случае в период интенсивной суббури, наблюдавшейся около  $9^{\text{h}}20^{\text{m}}$  UT 5 ноября



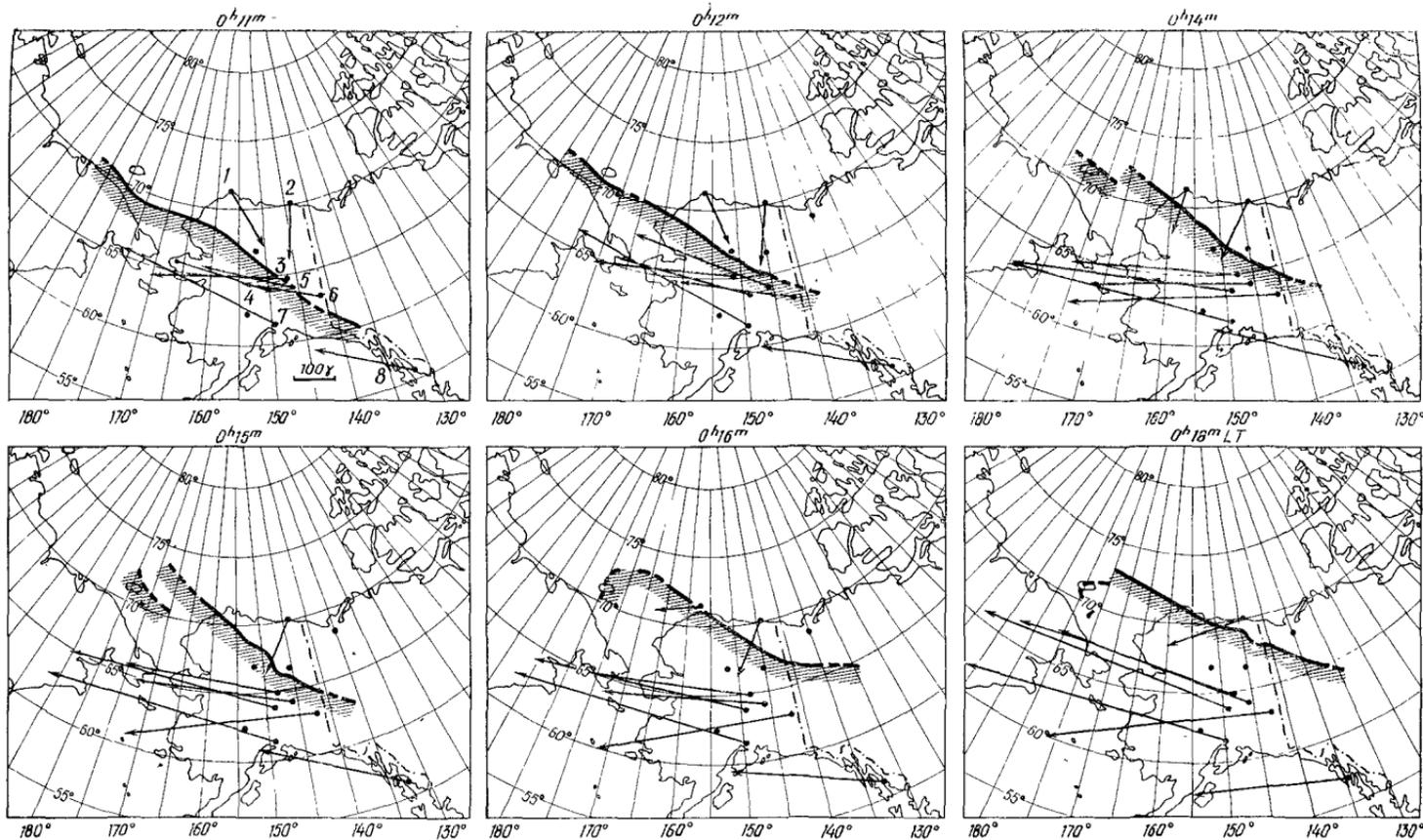
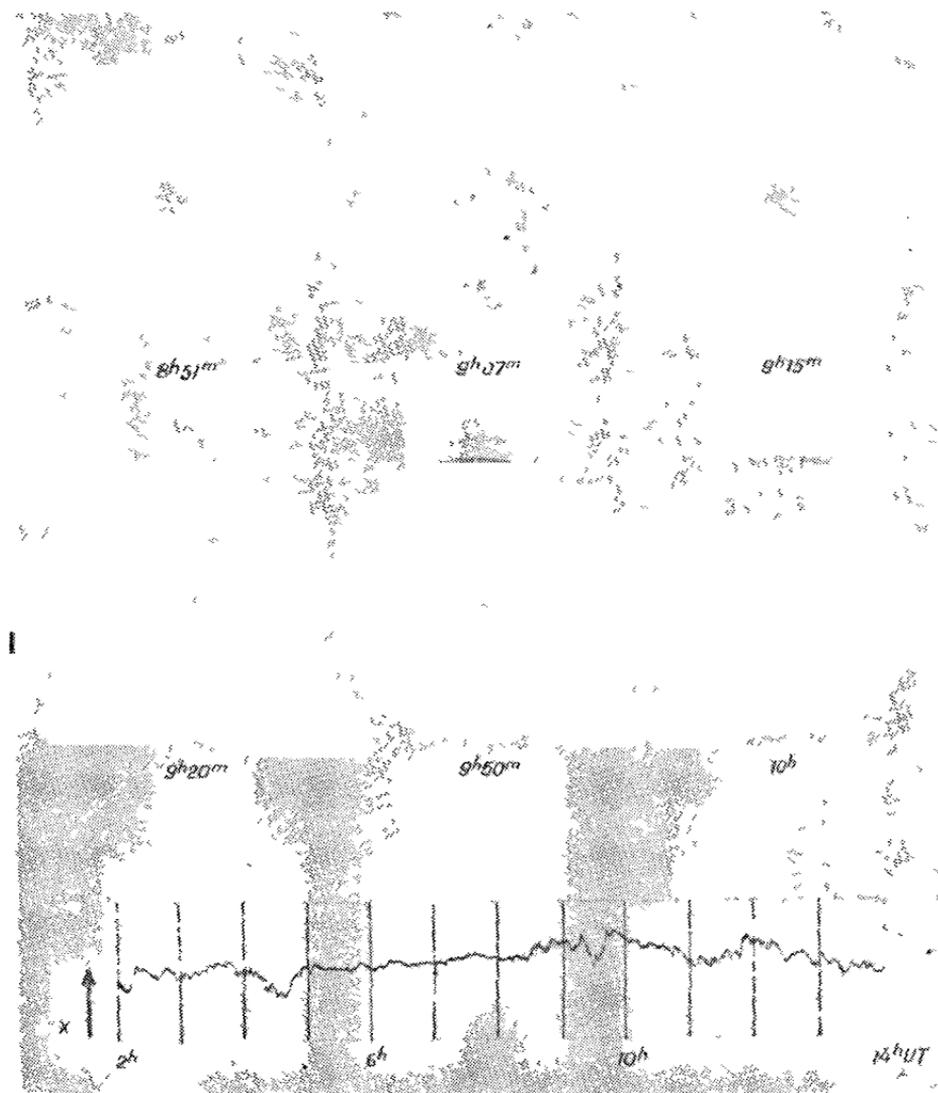


Рис. 24. Движение к северу фронта выпуклости в полярных сияниях 12 февраля 1958 г. Приведены эквивалентные токовые векторы магнитных обсерваторий: 1—Барроу; 2—о. Бартер; 3—Колледж; 4—Хэлл; 5—Биг-Делта; 6—Нортвэй; 7—Анкоридж; 8—Ситка.



Р и с. 25а. Расширяющаяся выпуклость в полярных сияниях, наблюдавшаяся в обсерватории Моулд-Бей (Канада) 2 декабря 1965 г. Приведена также запись одновременных вариаций геомагнитного поля.

1965 г., выпуклость достигла зенита обсерватории Моулд-Бей. На рис. 25а и 25б приведены также изменения магнитного поля ( $X$ -компонента), связанные с этой активностью полярных сияний. Во время суббури 2 декабря 1965 г. наблюдалось только небольшое уменьшение напряженности поля, тогда как суббурия 5 ноября 1965 г.

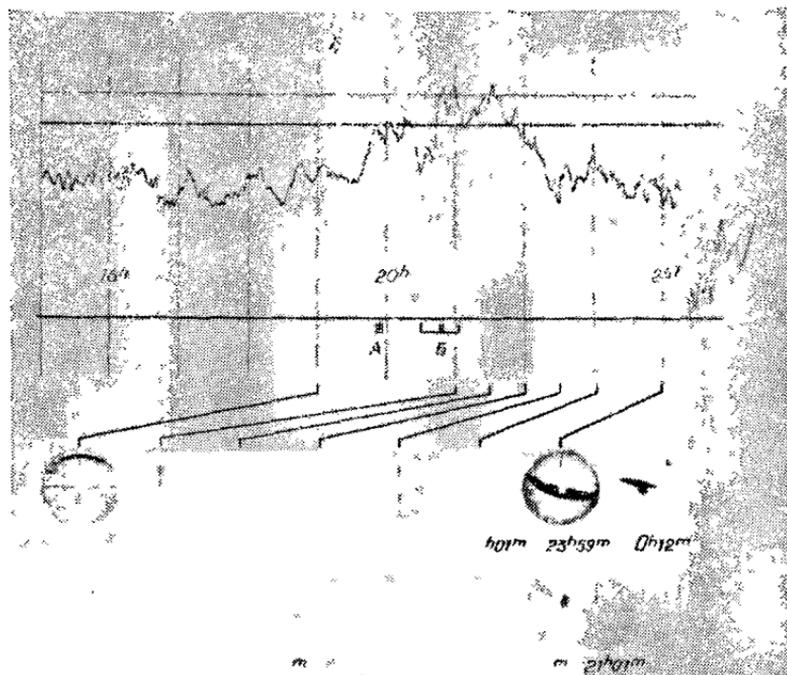
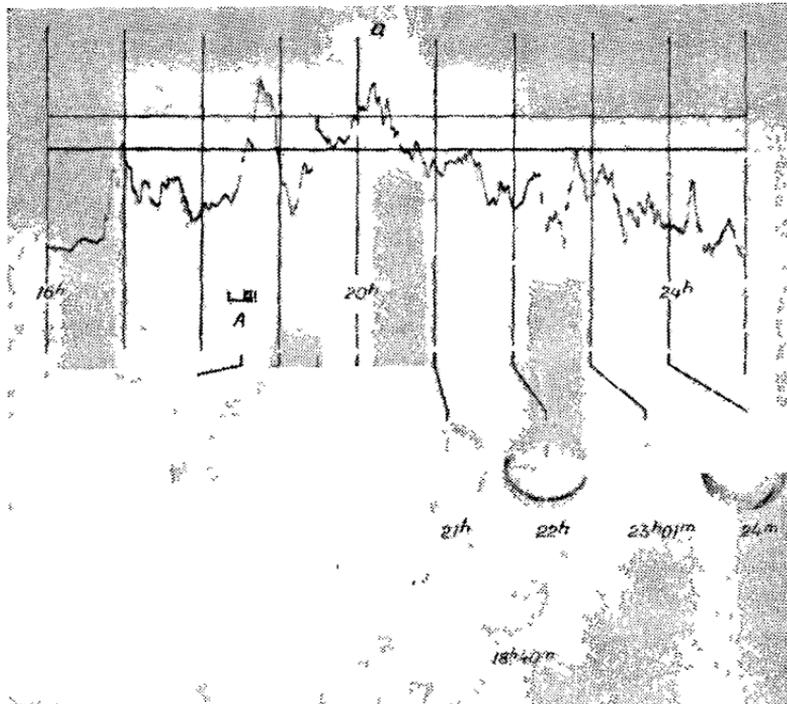
сопровождалась интенсивной отрицательной бухтой, которая наложилась на постепенное возрастание напряженности. Такой характер изменения поля свидетельствует о том, что западный ток движется вместе с фронтом выпуклости в полярных сияниях до широт обсерватории Моулд-Бей. Детальное рассмотрение распространения выпуклости к полюсу выполнено Акасофу и др. [7].

### 2.3. Суббурия в полярных сияниях и соответствующие магнитные возмущения в вечернем секторе

В вечерние часы (20—21<sup>h</sup> LT) расстояние между центральной линией овала и типичными станциями зоны сияний, такими, как Колледж и Кируна, порядка 500 км. Поэтому полное детальное описание активности сияний, например движущихся к западу изгибов, нельзя сделать, основываясь на наблюдениях станций зоны сияний. До последнего времени мало внимания уделялось изучению



Р и с. 256. То же, что на рис. 25а, 5 ноября 1965 г.



Р и с . 26. Примеры, показывающие, что положительная магнитная бухта регистрируется в Колледже (типичная станция зоны сияний), когда интенсивный движущийся к западу изгиб перемещается на северной части небосвода в форте Юкон. Вверху— 13—14 февраля 1958 г., внизу — 18—19 февраля 1958 г. Время местное.

Р и с. 27. Движущийся к западу изгиб, зарегистрированный на станции Пирамида (гм. широта  $74,5^\circ$ ) 13 декабря 1957 г. в ранние вечерние часы.

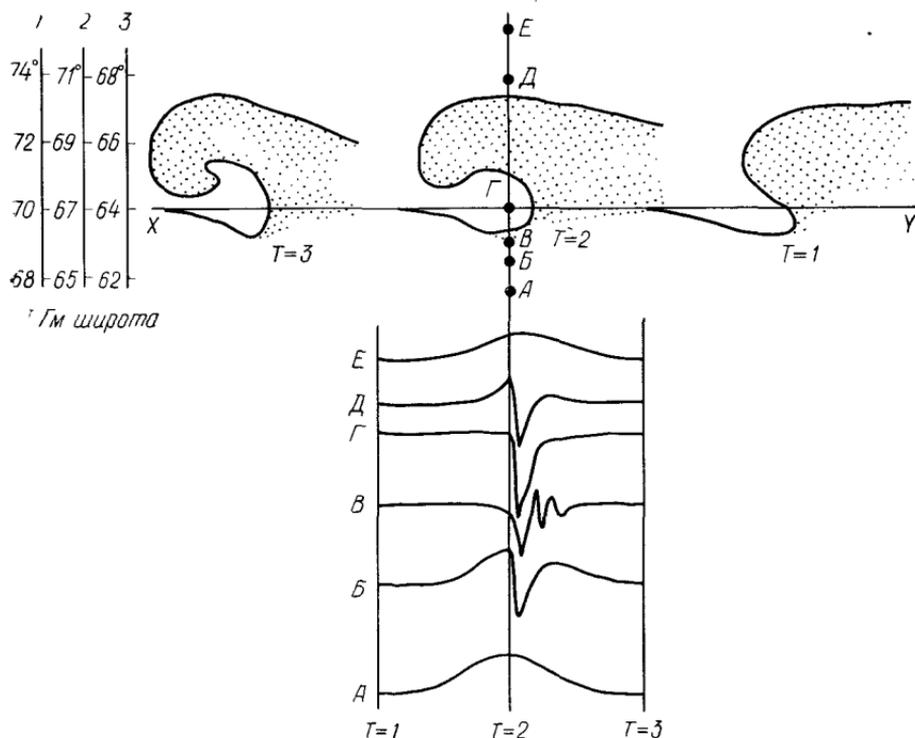
картины активизации сияний вдоль овала, так как предполагалось, что зона полярных сияний является основным районом активности сияний независимо от местного времени. Только в период МГГ по наблюдениям на сети камер полного обзора неба была обнаружена высокая активность сияний на обращенной к полюсу стороне зоны в вечерние часы.

На рис. 26 (негативы) приведены примеры движущихся к западу изгибов, наблюдавшихся в форте Юкон, расположенном на 200 км севернее Колледжа. Фотографии в верхнем ряду показывают, как изменяются сияния через интервалы 30—60 мин (в зависимости от того, сколь существенно меняются условия в сияниях). Фотографии в нижнем ряду иллюстрируют прохождение изгибов. В верхней части каждого рисунка приведены магнитограммы  $H$ -составляющей в Колледже. На рис. 26,а первый изгиб появляется в  $18^{\text{h}}33^{\text{m}}$  LT и движется через северную половину небосвода в течение 10 мин. Прохождение изгиба связано с возрастанием поля, или так называ-

емой положительной бухтой, в Колледже. Расстояние между изгибом и Колледжем  $\sim 300$  км. Впоследствии наблюдалось еще несколько изгибов, которые были видны в форте Юкон на северной половине небосвода. Южная граница овала в этот период постепенно смещалась к экватору.

В ночь на 18 февраля 1958 г. (рис. 26,б) два интенсивных изгиба наблюдались в форте Юкон около  $19^{\text{h}}50^{\text{m}}$  и  $20^{\text{h}}40^{\text{m}}$  ЛТ. В период прохождения обоих изгибов в Колледже была зарегистрирована положительная бухта. Расстояние между центром изгиба и Колледжем в обоих случаях составляло  $\sim 300$  км.

Движущиеся к западу изгибы перемещаются на большое расстояние. Нередко их можно наблюдать в ранние вечерние часы на геомагнитных широтах  $70^\circ$  и более. На рис. 27 (негатив) приведен пример изгиба, наблюдавшегося на станции Пирамида (гм. широта  $74,5^\circ$ ) в ранние вечерние часы. Изгиб вызвал интенсивную отрицательную бухту на близлежащей обсерватории Мерчисон-Бей (гм. широта  $75,2^\circ$ ).



Р и с. 28. Магнитные вариации ( $H$ -составляющая) в окрестности движущегося к западу изгиба. 1 — спокойные условия; 2 — умеренное возмущение; 3 — сильное возмущение.

При рассмотрении результатов наблюдений, приведенных на рис. 26, отмечалось, что положительная бухта регистрировалась в Колледже, когда движущийся к западу изгиб перемещался севернее станции. Это наиболее простая ситуация. Как правило, характеристики магнитных вариаций, связанных с изгибом, чрезвычайно сложны. Однако после исследования большого числа отдельных явлений можно суммировать полученные результаты следующим образом. На рис. 28 приведены три последовательных положения изгиба ( $T=1, 2, 3$ ) и типичная магнитная вариация горизонтальной составляющей на меридиональной цепочке магнитных обсерваторий ( $A, B, B, G, D$ ) [2—5].

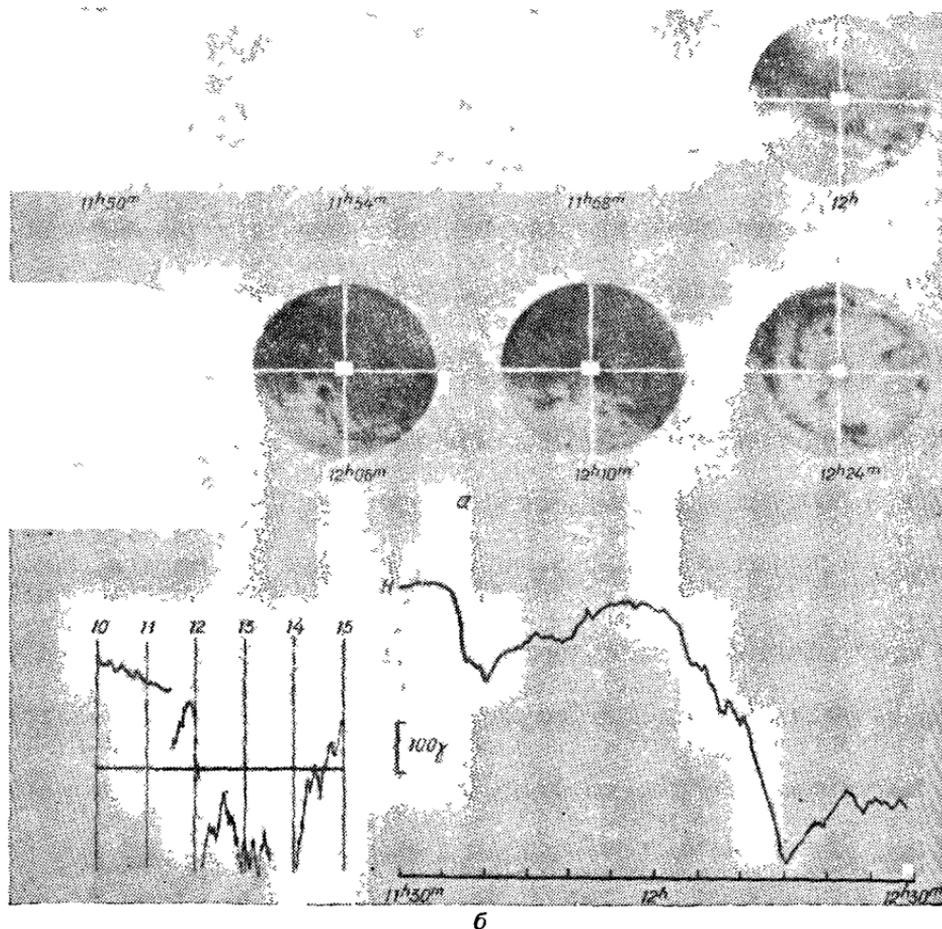
Станция  $A$ , которая расположена непосредственно к экватору от изгиба, регистрирует только положительную бухту; обычно изменение поля начинается здесь по крайней мере на несколько минут раньше, чем на других станциях. На станции  $B$  соответствующая вариация аналогична наблюдаемой на станции  $A$  в начальной фазе явления. Однако положительная бухта внезапно сменяется отрицательной, когда изгиб приближается к станции. На станции  $B$  соответствующие вариации иррегулярны, но первое изменение отрицательно с последующим положительным изменением. На станции  $G$  наблюдается резко выраженная интенсивная отрицательная бухта. Вариации на станциях  $D$  и  $E$  подобны вариациям на станциях  $B$  и  $A$  соответственно. Положение линии  $XU$ , представляющей начальное положение дуги, т. е. центральной линии овала, существенно зависит от уровня магнитного возмущения.

Шкалы широт в левой части рисунка соответствуют трем различным условиям (спокойные, умеренное возмущение и сильное возмущение) в вечерние часы. Шкалы можно использовать для трех интенсивностей изгибов: слабой, средней и сильной соответственно. Такой анализ подчеркивает, что необходимо знать расстояние между станцией и овалом, а не геомагнитную широту станции. В возмущенный период центральная линия овала может спуститься ниже  $64^\circ$ . Тогда на станции  $G$ , представляющей типичную станцию зоны сияний, такую, как Колледж, будет наблюдаться аномально раннее появление активных сияний и отрицательной бухты в вечерние часы. Приведенная на рис. 28 схема будет широко использована в последующих главах. Более детальное рассмотрение движущегося к западу изгиба и соответствующих магнитных возмущений дано в [2—6, 8].

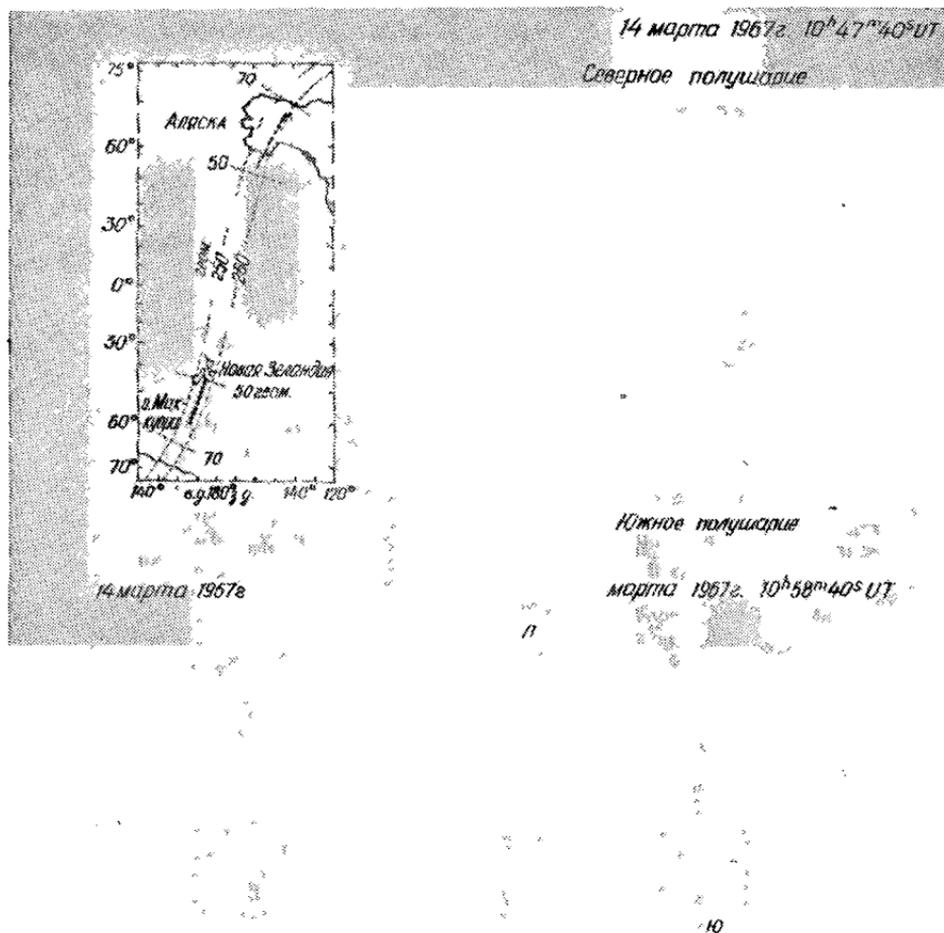
#### 2. 4. Суббурия в полярных сияниях и соответствующие магнитные возмущения в утреннем секторе

Активность полярных сияний в утреннем секторе в период суббури зависит от положения станции относительно овала полярных сияний. Если станция располагается к полюсу от овала до начала суббури, то наблюдается либо расширение сияний к полюсу, либо

движущийся к востоку изгиб. Как правило, движущийся к востоку изгиб не так хорошо выражен, как движущийся к западу изгиб в вечернем секторе. В большинстве случаев незначительное движение дуг к экватору наблюдается до начала движения к полюсу. В пределах овала наиболее часто отмечается дрейф иррегулярных полос к востоку. На станциях около экваториального края овала наиболее часто происходит распад дуг и дрейф к востоку образующихся пятен. До распада дуг наблюдается небольшое движение их к экватору. Распад начинается сначала на экваториальной границе овала в полуденном секторе и быстро распространяется к востоку и к полюсу. Образовавшиеся в результате распада пятна дрейфуют к востоку со скоростью 200—300 м/сек. На рис. 29 (негативы) приведен пример



Р и с. 29. Примеры распада дуг в утреннем секторе 21 февраля 1958 г. *а* — Минук; *б* — Колледж. Время всемирное.



Р и с. 30. Фотографии камер полного обзора в геомагнитносопряженных точках [10].

распада дуг, наблюдавшегося в Минуке 21 февраля 1958 г.; он начался примерно через 20 мин после начала полярной магнитной суббури на Аляске. Распад дуг связан с отрицательной бухтой; начало отрицательной бухты в утренние часы выражено менее резко, чем ночью, и по величине бухта также меньше. Детальное рассмотрение сияний в утреннем секторе выполнено Акасофу и др. [9].

Сэндфорд [26, 27] обнаружил обширное свечение в линиях  $\lambda 3914$  и  $5577\text{\AA}$  вдоль зоны полярных сияний в утреннем секторе и назвал его *сиянием типа мантии*. Он отметил, что эти сияния наблюдались при отсутствии дискретных визуально наблюдаемых форм сияний. Девис и Девитт [16] нашли, что чрезвычайно тесно расположенные пятна часто покрывают весь небосвод в утренние часы на станции о. Берд (гм. широта  $-71^\circ$ ). Поэтому вполне возможно, что сияния типа мантии часто состоят из таких пятен. Интенсивность сияний типа мантии меняется в зависимости от индекса  $K_p$ .

## 2. 5. Суббури в полярных сияниях в геомагнитносопряженных областях

Девитт [17] показал, что полярные сияния, наблюдаемые в обсерваториях Фэрзуэлл (гм. широта  $61,4^\circ$ ) и о. Кэмпбелл (гм. широта  $-57,3^\circ$ ), которые сопряжены, имеют подобные формы и движения. Кроме того, сопряженные сияния изменяются по яркости и распадаются одновременно.

Белон и др. [10] провели очень тщательное исследование развития сияний в сопряженных областях при помощи двух реактивных самолетов. Они показали, что развитие сияний (яркость, образование складок и петель) аналогично в сопряженных областях (рис. 30). Основываясь на современной модели постоянного геомагнитного поля, они показали, что полярные сияния южного полушария, спроецированные вдоль геомагнитных силовых линий в северное полушарие, совпадают по форме с сияниями северного полушария.

### ЛИТЕРАТУРА

#### Общая

- A k a s o f u S.-I., Dynamic morphology of auroras, Space Sci. Rev., 4, 498—540 (1965).  
A k a s o f u S.-I., Electrodynamics of the magnetosphere: Geomagnetic storms, Space Sci. Rev., 6, 21—143 (1966).

#### Цитированная в тексте

1. A k a s o f u S.-I., The development of the auroral substorm, Planet. Space Sci., 12, 273—282 (1964).
2. A k a s o f u S.-I., M e n g C.-I., The abnormally early appearance of active auroras, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 601—602 (1967).
3. A k a s o f u S.-I., M e n g C.-I., The abnormally early appearance of the eastward motion of auroras in the evening, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1029—1031 (1967).
4. A k a s o f u S.-I., M e n g C.-I., Intense negative bays inside the auroral zone. I, The evening sector, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 965—973 (1967).
5. A k a s o f u S.-I., M e n g C.-I., Auroral activity in the evening sector, J. Atmos. Terr. Phys., 29, 1015—1018 (1967).
6. A k a s o f u S.-I., K i m b a l l D. S., M e n g C.-I., Dynamics of the aurora, II. Westward traveling surges, J. Atmos. Terr. Phys., 27, 173—187 (1965).

7. Akasofu S.-I., Kimball D. S., Meng C.-I., Dynamics of the aurora, V. Poleward motions, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 497—503 (1966).
8. Akasofu S.-I., Meng C.-I., Kimball D. S., Dynamics of the aurora, IV. Polar magnetic substorms and westward traveling surges, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 489—496 (1966).
9. Akasofu S.-I., Meng C.-I., Kimball D. S., Dynamics of the aurora, VI. Formation of patches and their eastward motion, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 505—511 (1966).
10. Belon A. E., Mather K. B., Glass N. W., The conjugacy of visual aurorae, *Antarctic J. U.S.*, **2**, 124—127 (1967).
11. Birkeland K., The Norwegian aurora polaris expedition, 1902—1903, Vol. I, Sections 1 and 2, H. Aschehoug and Co., Christiania, 1908—1913.
12. Бурдо О. А., О некоторых закономерностях магнитных возмущений в высоких широтах, Физика солнечных корпускулярных потоков и их воздействие на верхнюю атмосферу Земли, Изд-во АН СССР, М., 1957, стр. 159—166.
13. Chapman S., An outline of a theory of magnetic storms, *Proc. Roy. Soc.*, **A95**, 61—83 (1918).
14. Chapman S., The electric current-systems of magnetic storms, *Terr. Magn.*, **40**, 349—370 (1935).
15. Chapman S., The earth's magnetism, rev. 2nd ed., Methuen and Co., London, 1951.
16. Davis T. N., DeWitt R. N., Twenty-four-hour observations of aurora at the southern auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **68**, 6237—6241 (1963).
17. DeWitt R. N., The occurrence of aurora in geomagnetically conjugate areas, *J. Geophys. Res.*, **67**, 1347—1352 (1962).
18. Fukushima N., Polar magnetic storms and geomagnetic bays, *J. Fac. Sci. Tokyo Univ.*, **8**, 293—412 (1953).
19. Harang L., The aurorae, Wiley, New York, 1951.
20. Нерпнер J. P., Time sequences and spatial relations in auroral activity during magnetic bays at College, Alaska, *J. Geophys. Res.*, **59**, 329—338 (1954).
21. Hope E. R., Low-latitude and high-latitude geomagnetic agitation, *J. Geophys. Res.*, **66**, 747—776 (1961).
22. Хорошева О. В., Пространственно-временное распределение полярных сияний и их связь с высокоширотными геомагнитными возмущениями, *Геомагнетизм и аэрномия*, **1**, 695—701 (1961).
23. Mauid P. N., Activité magnétique dans les régions polaires, *Ann. Geophys.*, **12**, 84—101 (1956).
24. Никольский А. П., Dual laws of the course of magnetic disturbances and the nature of mean regular variations, *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, **52**, 147—173 (1947).
25. Никольский А. П., Магнитные возмущения в околополюсном районе Арктики, *Проблемы Севера*, **1**, 116—132 (1958).
26. Sandford V. P., Aurora and airglow intensity variations with time and magnetic activity at southern high latitudes, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 749—769 (1964).
27. Sandford V. P., High latitude night-sky emissions, *Aurora and Airglow*, ed. B. M. McCormac, Reinhold Publ. Co., New York, 1967, p. 443—452.
28. Silsbee H. C., Vestine E. H., Geomagnetic Bays, their frequency and current-systems, *Terr. Magn.*, **47**, 195—208 (1942).
29. Stagg J. M., Hourly character-figures of magnetic disturbance at Kew Observatory Richmond, 1913—1923, *Meteorol. Office (London), Geophys. Mem.*, **32**, (1926).
30. Stagg J. M., Numerical character-figures of magnetic disturbance in relation to geomagnetic latitude, *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, **40**, 255—262 (1935).
31. Stagg J. M., The diurnal variation of magnetic disturbance in high latitudes, *Proc. Roy. Soc. London*, **A149**, 298—311 (1935).

32. Stagg J. M., Aspects of the current system producing magnetic disturbance, Proc. Roy. Soc. London, **A152**, 277—298 (1935).
33. Sugiura M., Chapman S., The average morphology of geomagnetic storms with sudden commencement, Abhandl. Akad. Wiss. Göttingen, Sonderheft № 4, 1960.
34. Vestine E. H., Disturbance field of magnetic storms, Trans. Wash. Assem; 1939 Publ. IATME, Bull. № 11, 360—381 (1940).
35. Wescott E. M., Mather K. B., Magnetic conjugacy from  $L=6$  to  $L=1.4$ , 1. Auroral zone: conjugate area, seasonal variations and magnetic coherence, J. Geophys. Res., **70**, 29—42 (1965).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Akasofu S.-I., Auroral observations by the constant local time flight, Planet. Space Sci., **16**, 1365—1370 (1968).
- Akasofu S.-I., Eather R. H., Bradbury J. N., The absence of the hydrogen emission ( $H\beta$ ) in the westward traveling surge, Planet. Space Sci., **17**, 1409—1412 (1969).
- Базаржанов А. Д., Мишин В. М., Немцова Э. И., Трошинчев О. А., Суточный ход магнитной активности в период МГТ, сб. Геомагнитные исследования, № 8, 63—81 (1966).
- Eather R. H., Latitudinal distribution of auroral and airglow emissions: the soft auroral zone, J. Geophys. Res. **74**, 153—158 (1969).
- Мишин В. М., Суточный ход магнитной активности, Труды ИЗМИР АН, вып. 20, 147—262 (1962).
- Мишин В. М., Базаржапов А. Д., Мишина Н. А., Попов Г. В., Сильное влияние главного геомагнитного поля на токи в возмущенной ионосфере, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАГА, Мадрид, сентябрь 1969 г.
- Omholt A., Kvifte G. J., Petterson H., Pulsating aurora, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 131—143.
- Пудовкин М. И., Шумилов О. И., Зайцева С. А., Dynamics of the zone of corpuscular precipitations, Planet. Space Sci., **16**, 881—890 (1968).

# Полярная магнитная суббурия

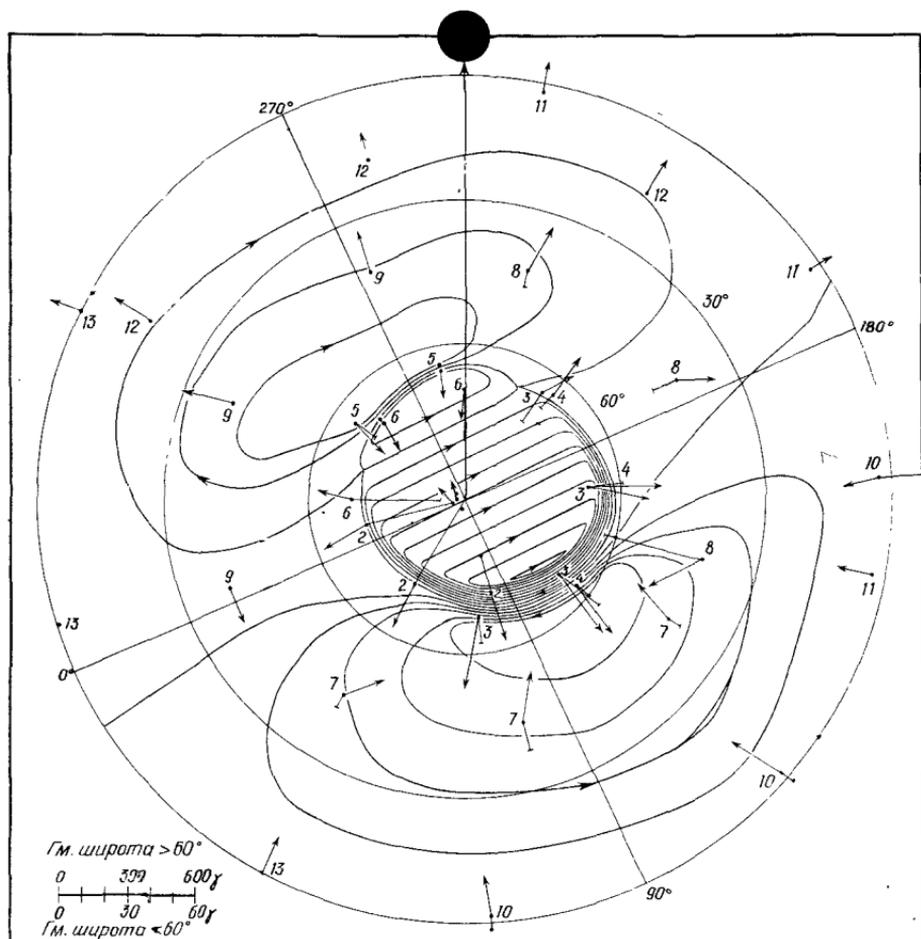
## 3. 1. Введение

В гл. 2 было показано, что суббурия в полярных сияниях связана с особым типом геомагнитных возмущений, названных полярной магнитной суббурией. В разд. 2.2—2.4 были рассмотрены характерные особенности магнитных возмущений, связанных с основными закономерностями развития полярных сияний.

В разд. 2.1 было показано, как анализировались в прошлом поля магнитных возмущений, связанных с полярными магнитными суббуриями. Отмечалось, что *SD*-токовая система будет пересмотрена по крайней мере по двум направлениям. Во-первых, концепция *SD*-токовой системы не отражает импульсной и изменчивой природы полярной магнитной суббурии. Во-вторых, *SD*-токовая (эквивалентная) система не отражает точного распределения поля магнитных возмущений в период полярных магнитных суббурий. Кроме того, в этой главе будет показано, что предположение о том, что *SD*-токовая система целиком расположена в ионосфере, неверно.

Однако в настоящей монографии не преследовалось цели дать обзор исторического развития исследований полярных магнитных суббурий. Просто отметим, что, несмотря на многочисленные исследования полярных магнитных суббурий [5, 10, 19, 20, 22, 23, 28—30], остаются нерешенными две основные проблемы.

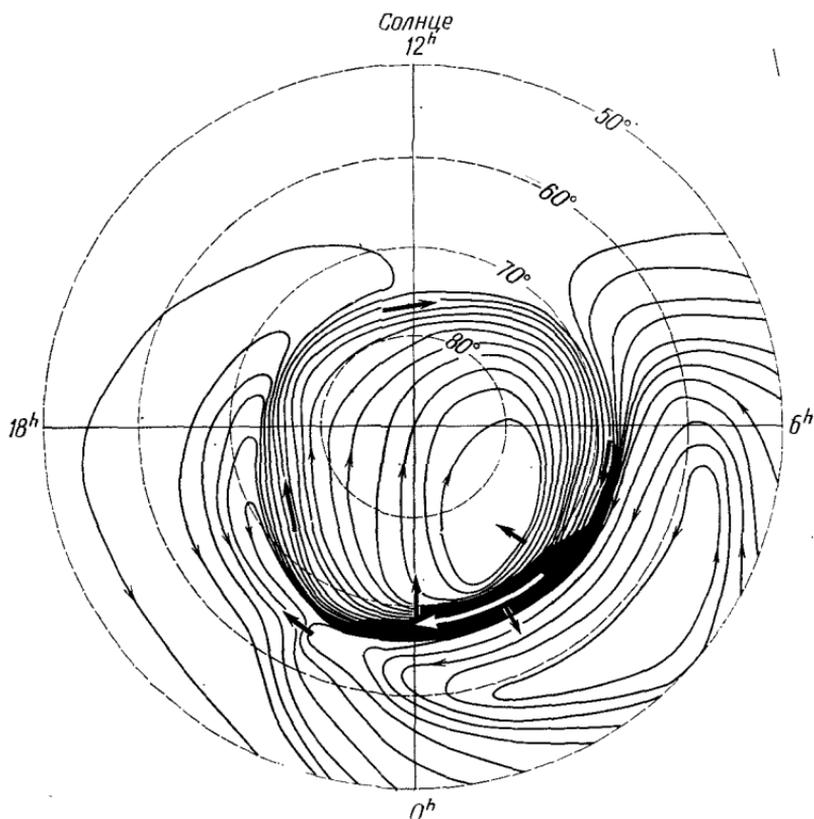
Первая проблема заключается в получении точных изменений распределения векторов магнитного возмущения по всей Земле за время жизни суббурии. Много дискуссий было посвящено расположению полярной электроструи, которая вызывает полярные магнитные суббурии. Нет сомнений, что полярная электроструя течет вдоль овала полярных сияний, который является областью мгновенного положения полярных сияний [5, 17]. В разд. 2.3 отмечалось, что полярная электроструя распространяется к западу вдоль овала полярных сияний и что изгиб сияний является передним краем электроструи. На рис. 31а—31в приведены эквивалентные токовые системы. Рис. 31а дает пример классической эквивалентной токовой системы, которая подобна *SD*-токовой системе. Она состоит из двух полярных электроструй, которые текут вдоль зоны полярных сия-



Р и с. 31а. Эквивалентная токовая система умеренной полярной магнитной суббури [30].

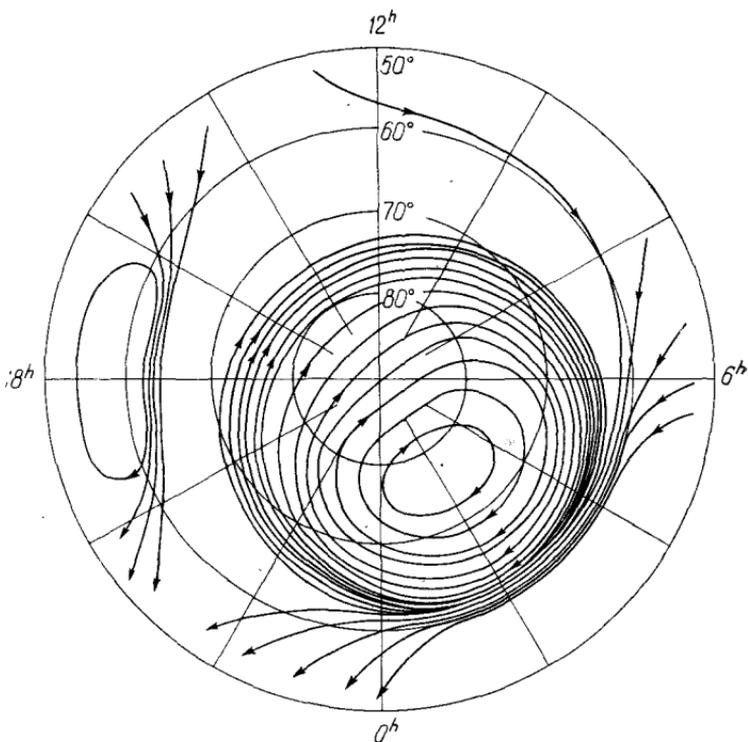
ний: одна к западу, а другая к востоку. Восточная электроструя заметно слабее западной. На рис. 31б и 31в показано, что полярная электроструя течет на запад вокруг всего овала полярных сияний. Однако имеются существенные различия между ними, касающиеся природы восточных токов в послеполуденные и вечерние часы. На рис. 31б предполагается, что восточный ток является током отщепления из электроструи, в то время как на рис. 31в предполагается, что это независимая электроструя. В спиральном анализе (см. разд. 2.1.2) распределение этого особого типа возмущений изображается А-спиралью.

Хотя имела место дискуссия о природе этого восточного тока, существующая сеть обсерваторий недостаточна для точного опре-



Р и с. 316. Эквивалентная токовая система интенсивной полярной магнитной суббури [5].

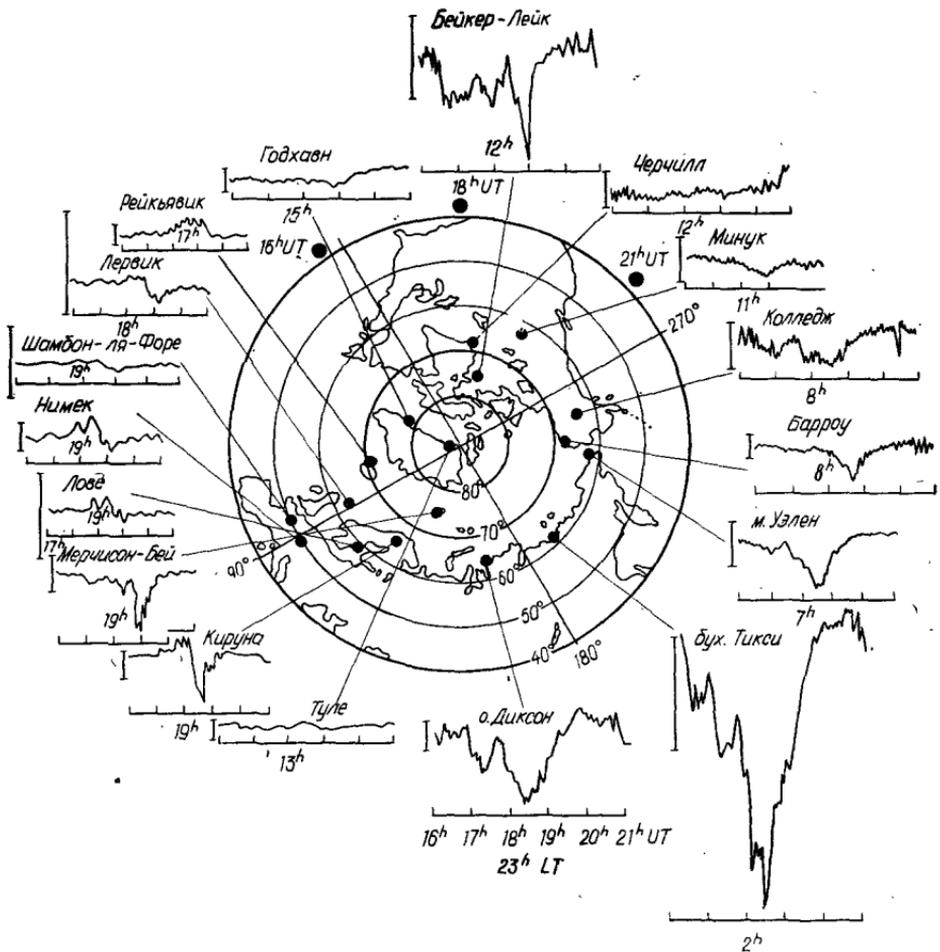
деления распределения полей возмущений во всей полярной области, так что точно определить эквивалентную токовую систему не представляется возможным. Возникающие трудности видны из следующего примера. На рис. 32 приведены одновременные магнитограммы  $H$ - или  $X$ -составляющей полярной магнитной суббури, которая началась между  $18^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  и  $21^{\text{h}} 00^{\text{m}}$  UT 16 декабря 1957 г., по данным ряда станций в северной полярной области. В полуденном секторе (о. Диксон, гм. широта  $63,0^{\circ}$ , и бух. Тикси, гм. широта  $60,4^{\circ}$ ) наблюдалась отрицательная бухта  $\sim 500\gamma$ , наиболее интенсивная в  $18^{\text{h}} 30^{\text{m}}$  UT. В раннем утреннем секторе отрицательная бухта менее интенсивна на станциях зоны сияний м. Уэлен (гм. широта  $61,8^{\circ}$ ), Колледж (гм. широта  $64,7^{\circ}$ ), Барроу (гм. широта  $68,5^{\circ}$ ), Минук (гм. широта  $61,8^{\circ}$ ). В послеполуденном секторе зоны полярных сияний зарегистрирована положительная бухта  $\sim 100\gamma$  в Рейкьявике (гм. широта  $70,2^{\circ}$ ) и комбинация положительной и



Р и с . 31в. Эквивалентная токовая система суточной магнитной вариации [18].

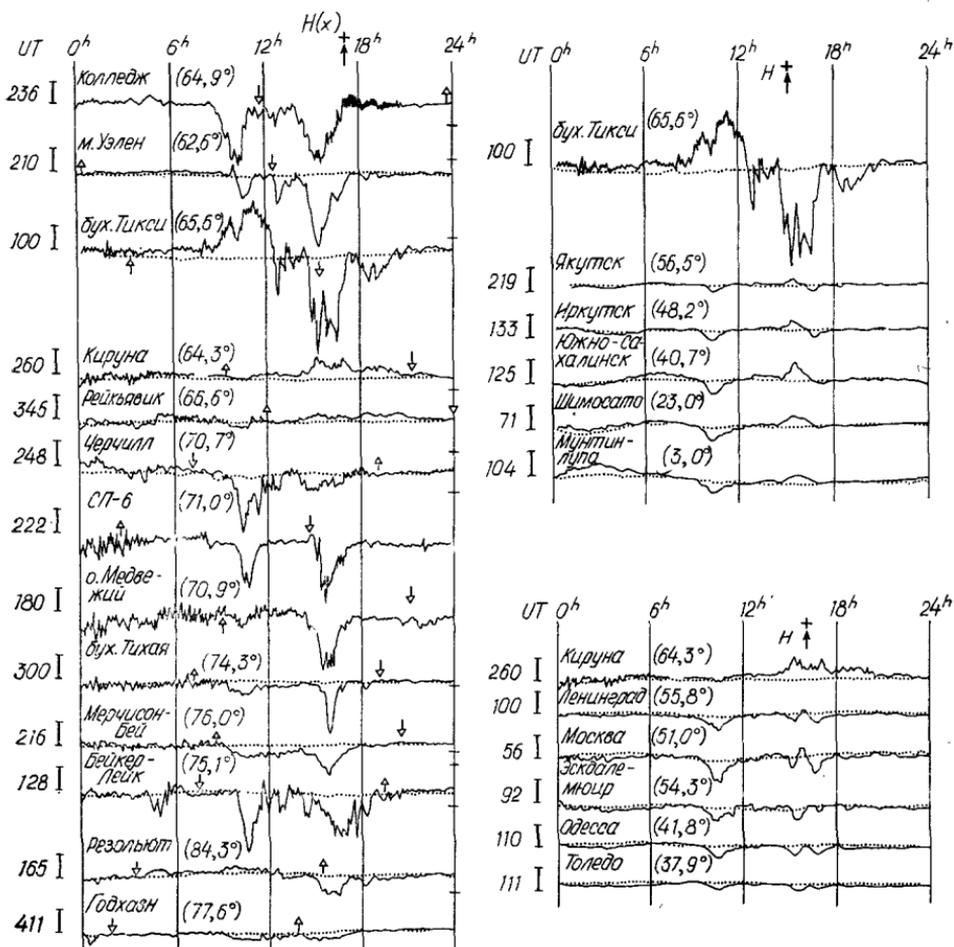
отрицательной бухты в Кируне (гм. широта  $65,3^\circ$ ). Такие изменения происходят, когда изгиб перемещается около северного горизонта станции (см. рис. 28). На станции Мерчисон-Бей (гм. широта  $75,2^\circ$ ) наблюдалась интенсивная отрицательная бухта  $\sim 300\gamma$ , указывающая, что северная граница изгиба достигла этой станции. Имело место почти 30-минутное запаздывание момента максимальной интенсивности на станции Мерчисон-Бей относительно полуночного сектора. В полуденном секторе зоны полярных сияний (например, в Черчилле, гм. широта  $68,7^\circ$ ) наблюдалась очень небольшая систематическая вариация. Однако в обсерватории Бейкер-Лейк (гм. широта  $73,8^\circ$ ) возмущение очень похоже на наблюдавшееся в Мерчисон-Бее и бух. Тикси. Это является важным указанием на то, что часть западной электроструи, которая обуславливает появление отрицательной бухты в бух. Тикси, простирается далеко в вечерний сектор. Вполне очевидно, что на основе данных рис. 32 невозможно построить однозначно эквивалентную токовую систему.

Вторая проблема состоит в том, чтобы получить из распределения возмущенных векторов трехмерную токовую систему в магнитосфе-



Р и с. 32. Магнитограмма ( $H$ - или  $X$ -компоненты) сети полярных магнитных обсерваторий в северном полушарии [5].

ре, а не двумерную эквивалентную токовую систему. Чтобы построить трехмерную модель, необходимо критически пересмотреть общепринятый метод построения эквивалентной токовой системы и кроме того, использовать спутниковые наблюдения вариаций магнитного поля. Например, замечательное сходство одновременных записей изменений магнитного поля с борта синхронного спутника на геоцентрическом расстоянии 6,6 радиуса Земли и обсерватории Гонолулу дает основание полагать, что низкоширотные магнитные возмущения, связанные с полярными магнитными суббурами, внеионосферного происхождения [16] (см. разд. 9.2).



Р и с 33. Магнитограммы сети обсерваторий 13 декабря 1957 г. [39].  
(Указаны исправленные геомагнитные координаты.)

В этой главе мы рассмотрим вариации поля в период нескольких отдельных интенсивных полярных магнитных суббурь, исследуем их развитие и распад в высоких, средних и низких широтах.

### 3. 2. Полярные магнитные суббури 13 декабря 1957 г.

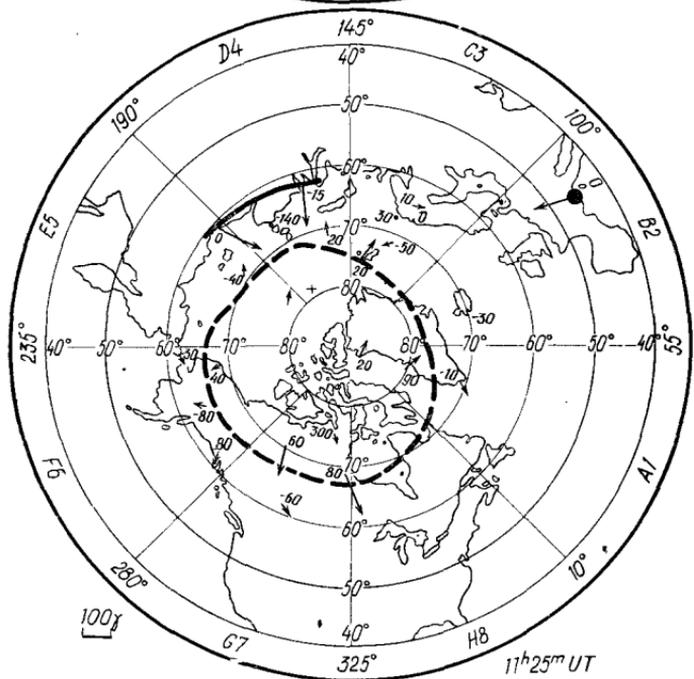
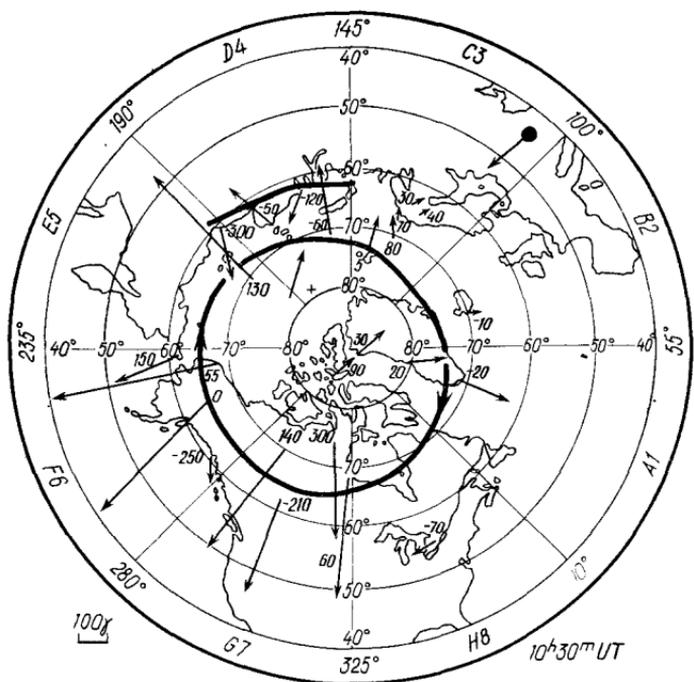
На рис. 33 приведены магнитограммы ряда станций 13 декабря 1957 г. [39]. В этот день наблюдались по крайней мере две интенсивные суббури. Они начались примерно в  $7^{\text{h}}30^{\text{m}}$  и  $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT. Наиболее явно суббури проявились на магнитограмме Кол-

леджа в виде двух отрицательных бухт; подобная отрицательная бухта была зарегистрирована в Черчилле (гм. широта  $68,7^\circ$ ), на дрейфующей станции Северный полюс-6 (гм. широта  $69^\circ$ ) и в Бейкер-Лейке (гм. широта  $73,8^\circ$ ), которые расположены в овале полярных сияний.

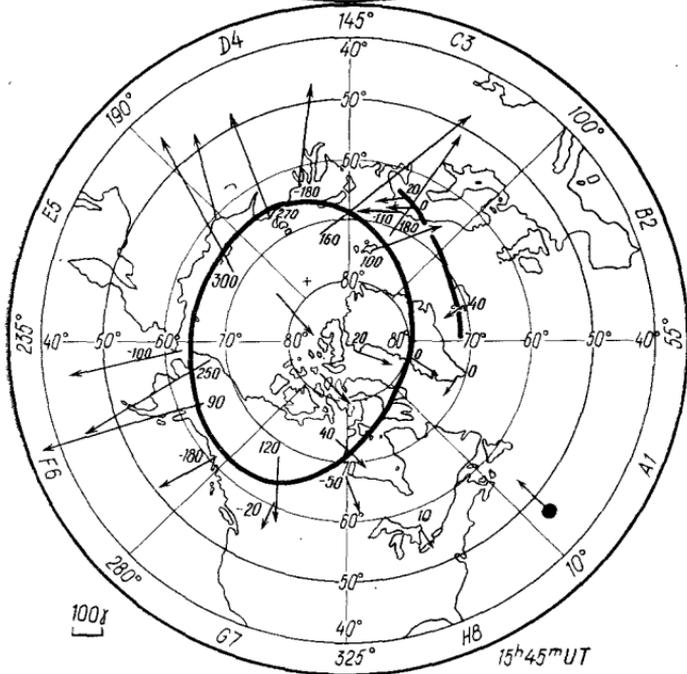
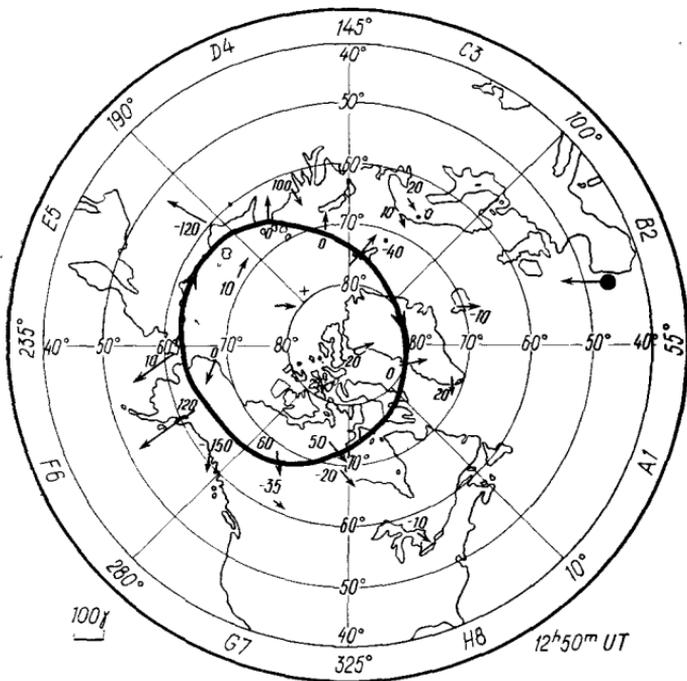
Соответствующие изменения в течение первой бури на других станциях очень сложны. На восточной оконечности Сибири, на м. Уэлен (гм. широта  $61,8^\circ$ ), слабая положительная бухта сменяется более интенсивной отрицательной бухтой; ситуация аналогична станции Б на рис. 28. В бух. Тикси (гм. широта  $60,4^\circ$ ), которая располагалась в это время в раннем вечернем секторе, зарегистрирована положительная бухта (станция А на рис. 28); заметим, однако, что слабая отрицательная бухта накладывалась на положительную бухту в период максимального развития отрицательной бухты в Колледже. Лишь слабые признаки развития суббури имелись в этот период в Кируне (гм. широта  $65,3^\circ$ ) и Рейкьявике (гм. широта  $70,2^\circ$ ). Отрицательная бухта ( $-150\gamma$ ) наблюдалась в бух. Тихой (гм. широта  $71,5^\circ$ ) и Мерчисон-Бее (гм. широта  $75,2^\circ$ ), которые расположены на несколько градусов к северу от Кируны и Рейкьявика. На станциях ниже геомагнитной широты  $60^\circ$  первая суббуря связана с пониженными значениями напряженности поля. Этот особый тип вариаций магнитного поля будет детально рассмотрен в этой главе и в разд. 9.2.

Вторая суббуря зарегистрирована как отрицательная бухта на большинстве станций, за исключением Кируны и Рейкьявика; эти станции во время второй суббури располагались в послеполуденном секторе, в котором течет восточный ток. На станциях с широтами менее  $60^\circ$  вторая суббуря была связана либо с положительными, либо с отрицательными изменениями поля, сопровождающимися положительными.

Зайцев и Фельдштейн [39] определили распределение возмущенных векторов в полярной области в четыре момента (рис. 34). Они также нанесли на карты приблизительное положение западного и восточного токов. Они отмечают, что в  $10^h 30^m$  и  $15^h 45^m$  UT токовая система была аналогична рис. 31в. В период между двумя суббурями ( $11^h 25^m$  и  $12^h 50^m$  UT) распределение векторов возмущенного поля менее систематично. В разд. 2.1 было отмечено, что, когда поле полярной суббури выражается в терминах эквивалентного тока, токовая система, имеющая определенное сходство с *SD*-током, появляется только время от времени. Суточная вариация возмущенного поля в полярной области не является следствием вращения Земли под фиксированной токовой системой постоянной интенсивности. Исследование Зайцева и Фельдштейна [39] предполагает, что токовая система, изображенная на рис. 31в, появляется время от времени и чередуется со спокойными интервалами между суббурями.



Р и с. 34. Распределение векторов магнитного возмущения 13 декабря 1957 г.

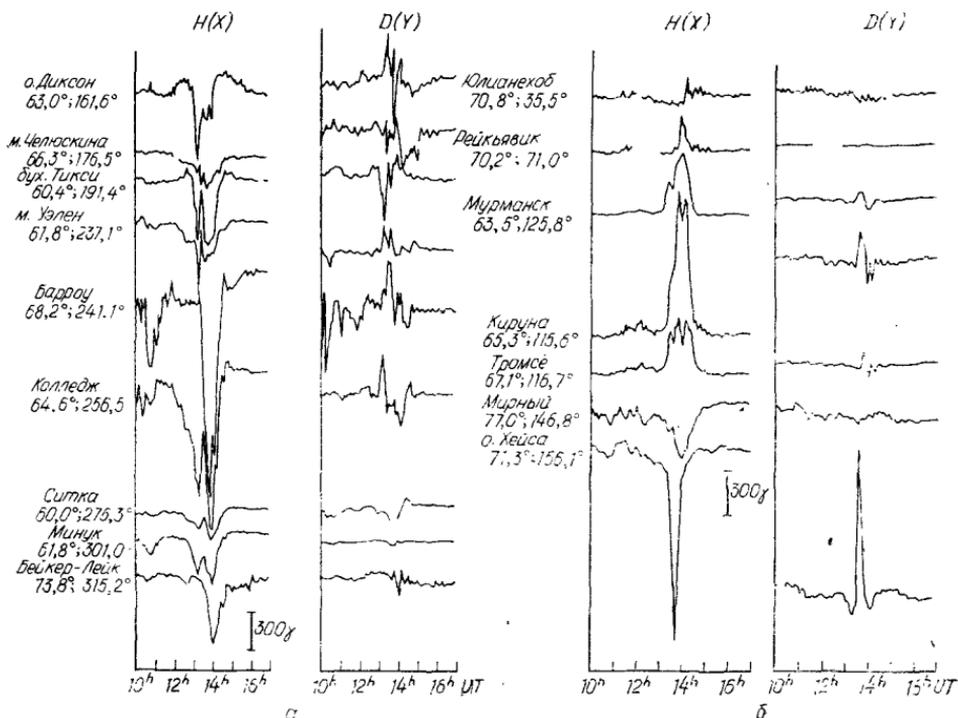


[39] (стрелка — в горизонтальной плоскости, цифра — в вертикальной).

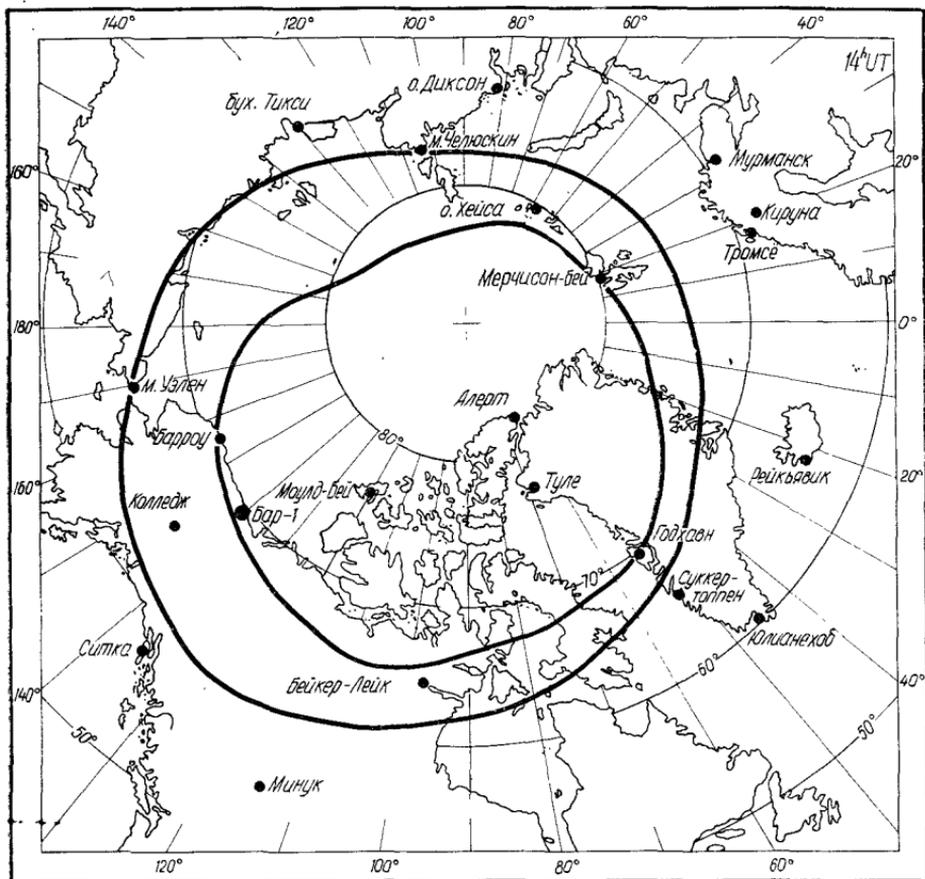
### 3. 3. Полярная магнитная суббуря 16 декабря 1964 г.

На рис. 35 приведены магнитограммы  $H$ - и  $D$ -составляющих, полученные со станций, расположенных вблизи овала полярных сияний. На рис. 36 дано примерное положение овала в  $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT относительно станций, записи которых приведены на рис. 35. Овал представляет собой полосу, в которой очень велика вероятность появления спокойных дуг полярных сияний. В период суббурь ширина овала на ночном полушарии резко увеличивается (он становится значительно шире, чем показано на рис. 36). Станции на рис. 35,б расположены в основном в освещенном полушарии.

На магнитограмме Колледжа эта полярная суббуря имеет двойной максимум. Полярная электроструя начинает усиливаться около  $12^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT в районе Колледжа, но не проявляется в Барроу. Камера полного обзора неба на станции Бар-1 (см. рис. 36) — единственная станция на Аляске, где в эту ночь была хорошая погода, — зарегистрировала внезапное усиление яркости сияний вблизи южного горизонта между  $12^{\text{h}}39^{\text{m}}$  и  $12^{\text{h}}45^{\text{m}}$  UT. Однако активность полярных сияний ограничена областью вблизи южного горизонта,



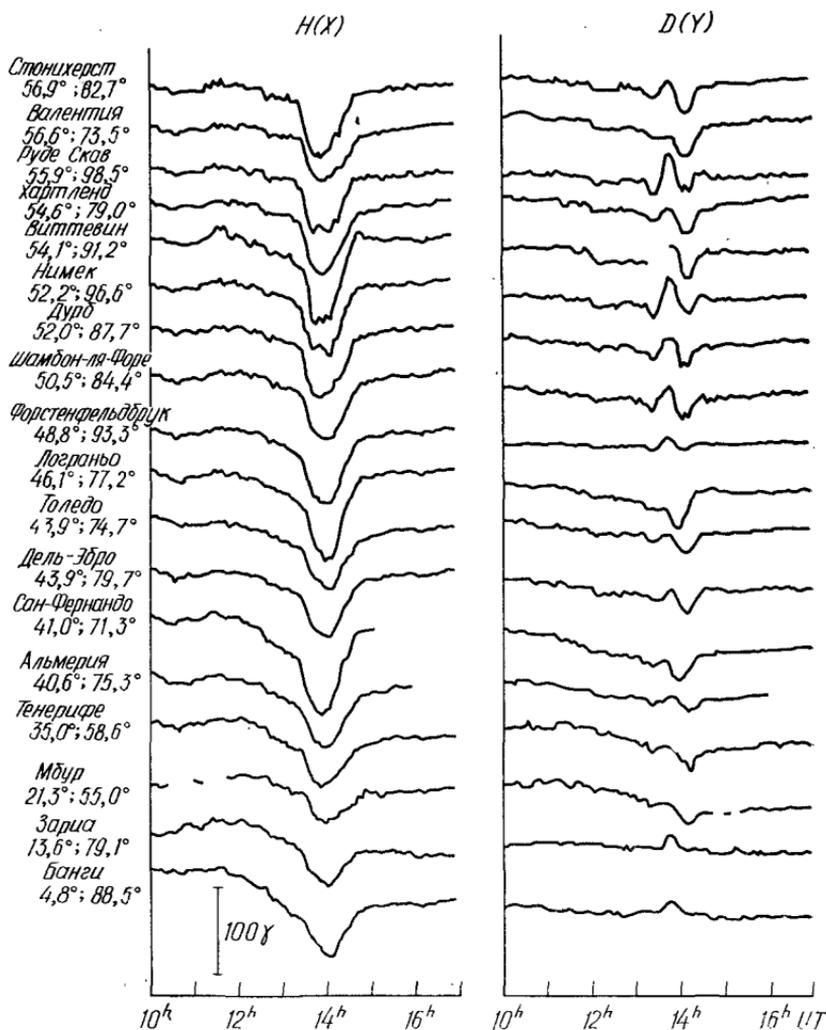
Р и с. 35. Магнитограммы  $H$ - и  $D$ -компонент, полученные на обсерваториях, расположенных в районе овала полярных сияний, 16 декабря 1964 г. [4]. [Масштаб  $H(X)$  в Кируне в 3 раза меньше указанного на рисунке.]



Р и с. 36. Примерное положение овала полярных сияний и расположение обсерваторий, магнитограммы которых использованы на рис. 35 [4].

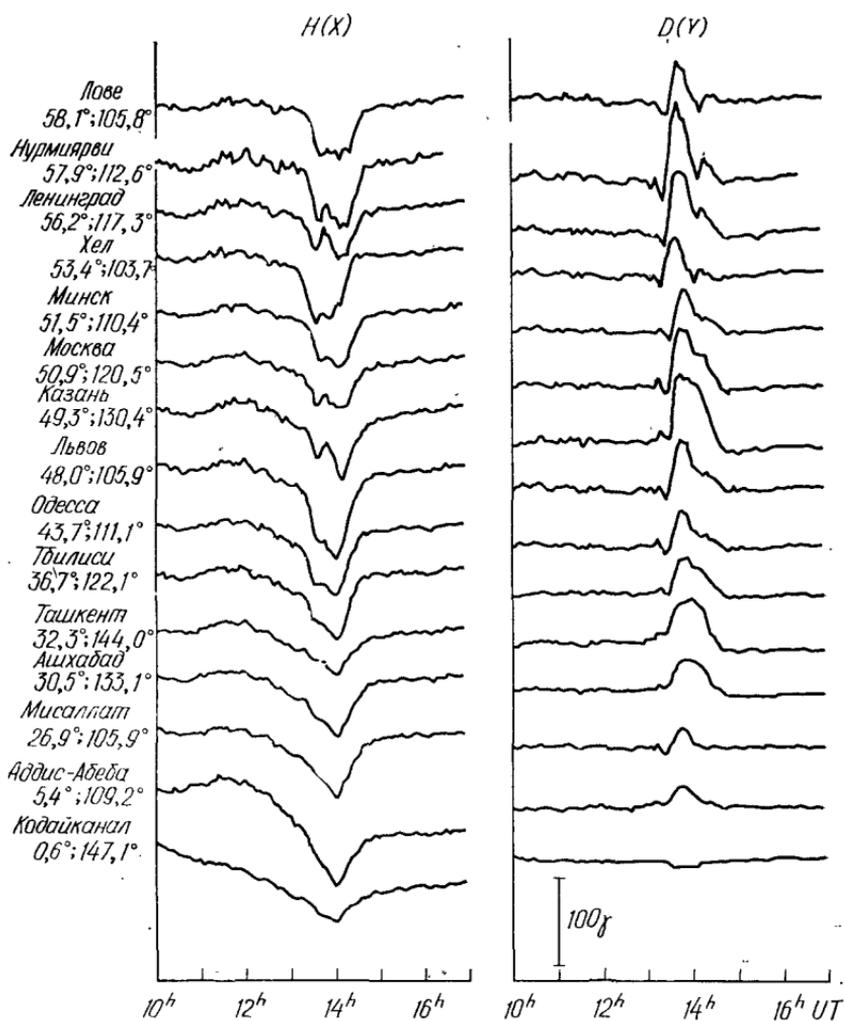
так что усиление электроструи, по-видимому, происходит на геомагнитной широте  $65^\circ$  на Аляске. Около  $13^{\text{h}}20^{\text{m}}$  UT полярная электроструя начинает ослабевать, но спустя 10 мин (около  $13^{\text{h}}30^{\text{m}}$  UT) она внезапно усиливается вдоль всего овала полярных сияний [Колледж, м. Уэлен, о. Хейса, Годхавн ( $-150\gamma$ ) и Бейкер-Лейк]. К сожалению, магнитная обсерватория Мерчисон-Бей не функционировала после МГГ, но сопряженная станция в южном полушарии — Мирный — зарегистрировала отрицательную бухту. Менг [24] показал, что в декабре отношение амплитуд бухт в Мерчисон-Бее и Мирном составляет 2,3. Отсюда можно заключить, что интенсивность отрицательной бухты, если бы ее наблюдали в Мерчисон-Бее, была бы около  $-825\gamma$ .

Снимки камер полного обзора неба, полученные на станции Бар-1, указывают на стремительное взрывообразное движение сия-



Р и с. 37а.  $H$ - и  $D$ -компоненты магнитного поля обсерваторий западноевропейского сектора, расположенных на геомагнитных широтах менее  $60^\circ$ , 16 декабря 1964 г.

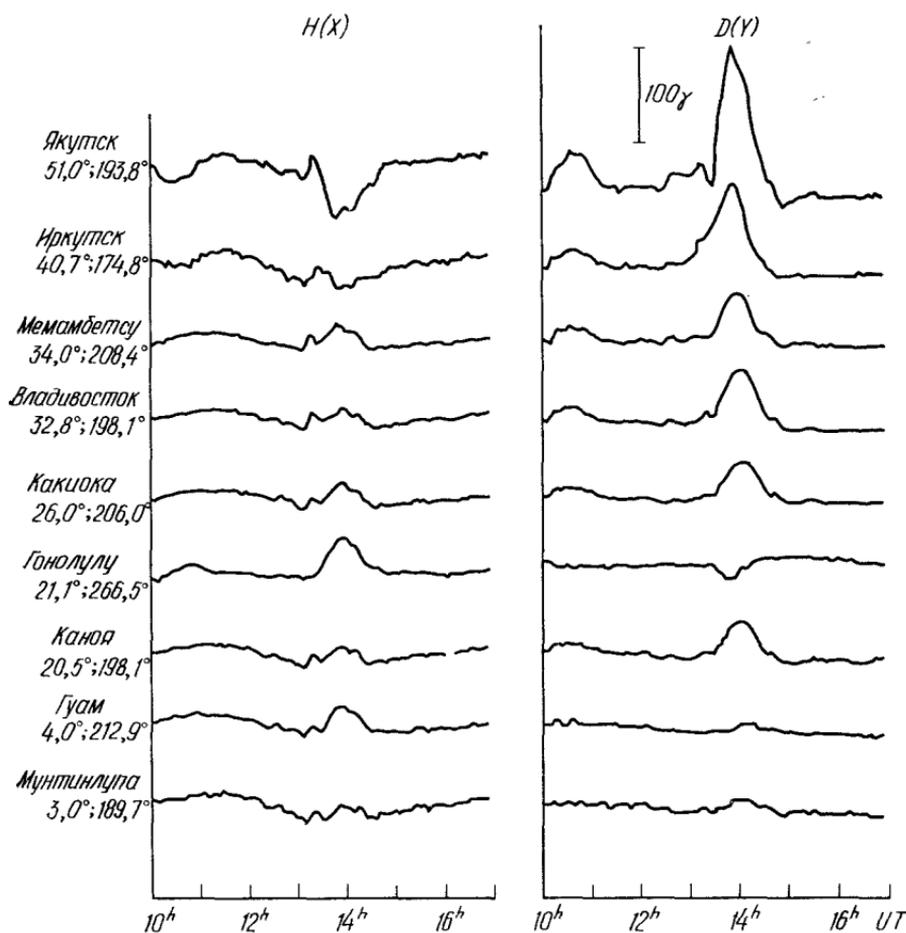
ний к полюсу, которое началось в  $13^{\text{h}}27^{\text{m}}\text{UT}$  около южного горизонта. Движущаяся к полюсу выпуклость прошла зенит в  $13^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT}$  и достигла северного горизонта в  $13^{\text{h}}35^{\text{m}}\text{UT}$ . Выпуклость, по-видимому, достигла района станции Моулд-Бей (гм. широта  $79,1^\circ$ ), так как интенсивная отрицательная бухта ( $\sim 300\gamma$ ) наблюдалась там в это время; аналогичный случай рассматривался в разд. 2.2. Отрицательные бухты наблюдались также к югу от овала (о. Диксон, бух. Тикси, Ситка, Минук) в темном секторе. Это означа-



Р и с. 376. То же, что на рис. 37а, для восточноевропейского сектора.

ет, что одновременно с увеличением интенсивности резко возросла ширина полярной электроструи как к северу, так и к югу.

К югу от овала в освещенном полушарии на некоторых станциях в послеполуденном секторе зоны полярных сияний (Тромсё, Кируна, Мурманск, Рейкьявик, Юлианехоб) наблюдались положительные бухты. Положительная бухта уменьшилась к полудню. На о. Диксон и в бух. Тикси слабая положительная бухта появилась при развитии отрицательной бухты в Колледже, но она резко сменилась интенсивной отрицательной бухтой в период внезапного усиления бухты в Колледже. Такие сложные изменения магнитного

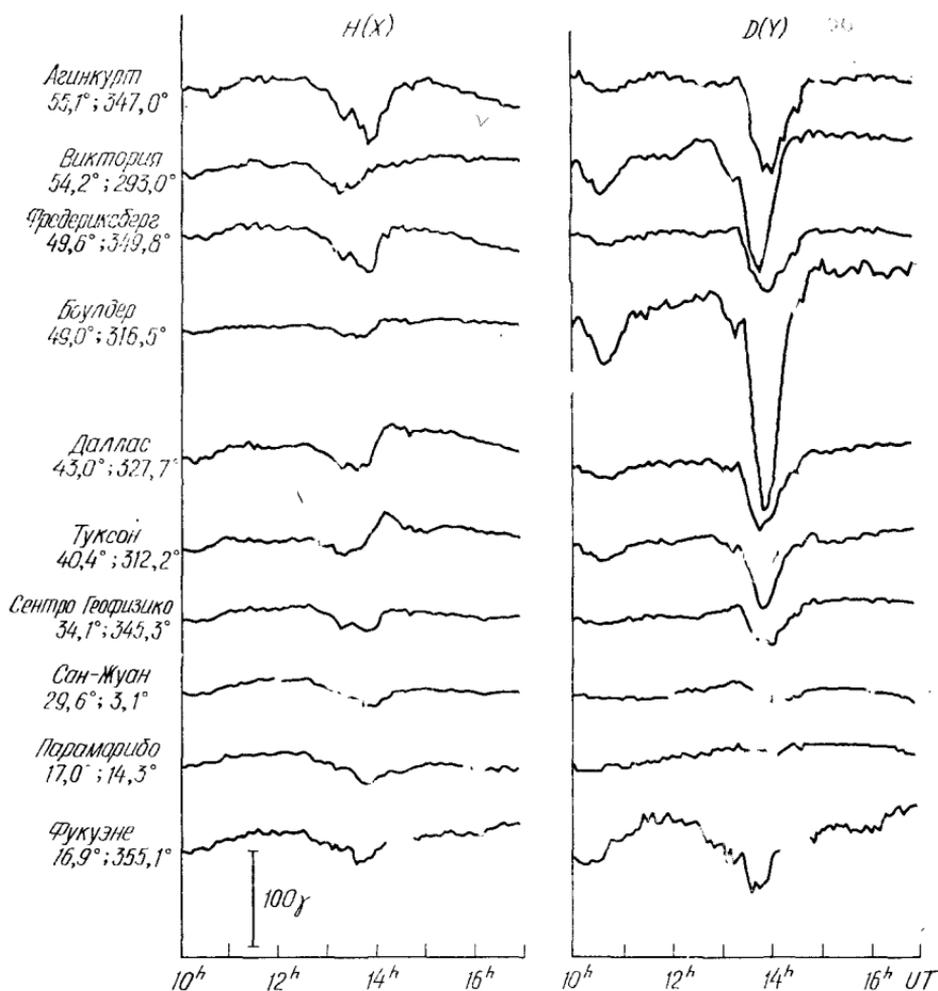


Р и с. 37в. То же, что на рис. 37а, для тихоокеанского сектора.

поля и соответствующая активность полярных сияний рассматривались в разд. 2.3 (см. рис. 28). В период этих довольно систематических изменений  $H$ -составляющей  $D$ -составляющая изменялась иррегулярно на всех станциях, за исключением о. Хейса.

На рис. 37а—37г приведены магнитные вариации в Западной Европе (гм. долгота  $<100^\circ$ ), в Восточной Европе (гм. долгота  $>100^\circ$ ), в Тихом океане и в Америке. Магнитные вариации существенно различаются от сектора к сектору, а в пределах каждого сектора наблюдается хорошее подобие между вариациями на разных станциях.

В послеполюденном секторе (рис. 37а и 37б) наиболее существенной особенностью вариаций геомагнитного поля является отри-

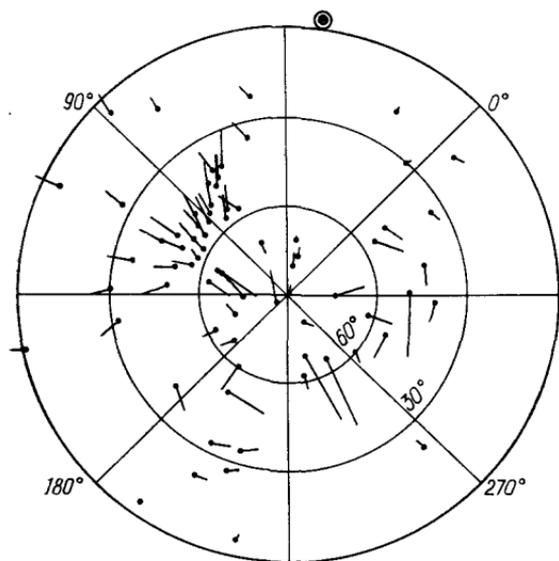


Р и с. 37г. То же, что на рис. 37а, для американского сектора.

пательная бухта, охватившая весь исследуемый интервал широт в  $13^{\text{h}}$  UT, когда усилилась полярная электроструя. Другой важной особенностью является небольшое возрастание  $H$ -составляющей в период отрицательной бухты на высокоширотных станциях в восточноевропейском секторе (рис. 37б). Даже на высокоширотных станциях к востоку от геомагнитной долготы  $90^{\circ}$  (рис. 37а) Руде Скков (гм. долгота  $98,5^{\circ}$ ), Виттевин (гм. долгота  $91,2^{\circ}$ ) и Нимек (гм. долгота  $96,6^{\circ}$ ) отмечается такая же тенденция. Изменения  $H$ -составляющей в каждом секторе подобны, но этого нельзя сказать об изменениях  $D$ -составляющей. В частности, в восточноевропейском

секторе наблюдается довольно значительная восточная составляющая, систематически уменьшающаяся к низким широтам.

В тихоокеанском секторе (рис. 37в) около полуночи заметны систематические возрастания  $H$ -составляющей, начавшиеся около  $13^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT между Мемамбетсу и Мунтинлупой. Изменения  $H$ -составляющей в Якутске представляют собой «переходный тип», детально изученный Ростокером [28]. Вариации поля в Иркутске



Гм. широта < 60°



Гм. широта > 60°

Р и с. 38. Распределение векторов магнитного возмущения в  $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT 16 декабря 1964 г. [4].

по форме промежуточные между наблюдаемыми в Якутске и Мемамбетсу.  $D$ -составляющая характеризуется сильным ростом, уменьшающимся к низким широтам. Исключение составляет Гонолулу, которая располагается на восточном краю тихоокеанского сектора. Вариации  $D$ -составляющей на этой станции по форме больше соответствуют американскому сектору (рис. 37г).

Вариации  $H$ -составляющей в американском секторе, располагавшемся в утреннем секторе, хотя и сложные, но изменяются систематически с широтой. Изменения в Агинкурте и Фредериксберге аналогичны вариациям поля в Минуке: вначале отрицательная вариация переходит в положительную. Интенсивность положительных вариаций зависит от широты. Вариация  $D$ -составляющей отри-

цательна, наибольшее изменение наблюдалось в Боулдере, оно уменьшалось к высоким и низким широтам. На рис. 38 приведено распределение векторов магнитного возмущения в  $14^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT, которое соответствует максимуму развития суббури. Подробности временных вариаций распределения векторов возмущенного поля приведены Акасофу и Менгом [4].

### 3. 4. Трехмерная модель токовой системы

В прошлом для удобства наблюденное распределение векторов магнитного возмущения обычно выражалось в терминах эквивалентной токовой системы, расположенной на сферической оболочке, концентричной с Землей над ее поверхностью. Это простейший и математически правильный способ, при помощи которого можно представить распределение наблюдаемых на поверхности Земли векторов магнитного возмущения.

В качестве примера рассмотрим эквивалентную токовую систему, построенную Силсби и Вестином [30] и приведенную на рис. 31а. На рис. 31а, где приведены осредненные данные по многим бухтам, изображена токовая система в предположении, что токи текут только на сферической оболочке, т. е. что на оболочке выполняется условие  $\text{div } \mathbf{J} = 0$ . Западная полярная электроструя на ночной стороне замыкается возвратными токами в основном через полярную шапку и частично также через низкие широты. Низкоширотные возвратные токи направлены к востоку в ночном и к западу в дневном секторе, обуславливая положительные и отрицательные бухты соответственно.

Эквивалентную токовую систему суббурь не следует смешивать с действительной токовой системой. Раньше предполагалось, что сферической оболочкой, на которой располагается токовая система, является ионосфера, и поэтому эквивалентная токовая система интерпретировалась как чисто ионосферная. По этой причине для выяснения локализации токовой системы имеют существенное значение дополнительные наблюдения, помимо проведенных на поверхности Земли. В настоящее время имеются по крайней мере два типа данных, которые необходимо принимать во внимание: 1) магнитные наблюдения синхронного спутника (название спутника АТС) на геоцентрическом расстоянии 6,6 радиуса Земли, которые позволяют определить, являются ли низкоширотные бухты (как положительные, так и отрицательные) в период полярных магнитных суббурь следствием внеионосферных токов [16]; 2) магнитные наблюдения на спутнике с полярной орбитой, которые позволяют проверить, текут ли электрические токи к овалу или из овала полярных сияний [40, 41].

Существует поразительное сходство между бортовыми магнитограммами спутника на синхронной орбите над Тихим океаном и

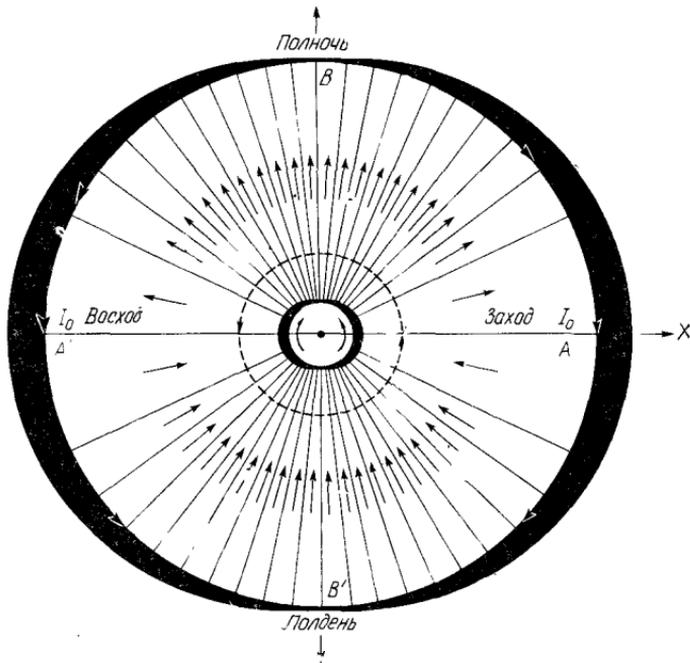
магнитограммами обсерватории Гонулулу [16] (см. разд. 9.2). Таким образом, эквивалентную токовую систему нельзя интерпретировать как чисто ионосферную. Ионосферная компонента, по-видимому, вносит в нее меньший вклад, чем магнитосферная. Если бы бухты были обусловлены в основном ионосферным током, то направления вектора возмущения на поверхности Земли и на геостационарной орбите были бы противоположны. Основываясь на изучении асимметричного развития главной фазы бури и нормальной величины  $SD$ -вариации в Гуанкайо, к аналогичным выводам пришли Акасофу и Чепмен [1, 2]. Они заключили, что  $SD$ -вариация в средне- и низкоширотном поясе не может быть следствием ионосферного тока. Детальное изучение поля низкоширотных отрицательных бухт по данным меридиональной цепочки станций подтвердило этот вывод [3].

Рассмотрим данные, приведенные на рис. 38. Векторы возмущенного магнитного поля направлены к западу в утреннем секторе и к востоку в позднем вечернем секторе. Они быстро уменьшаются по величине к низким широтам; это следует из данных, приведенных на рис. 37б—37г. На рис. 31а векторы таких направлений можно описать ионосферными токами, сходящимися по направлению к полюсу и расходящимися к экватору. Поскольку низкоширотные положительные и отрицательные бухты обусловлены в основном внеионосферными токами, существенная часть этих восточных и западных векторов также обусловлена внеионосферными токами.

Поэтому в настоящей книге исследована модель токовой системы, в которой ток течет в высокоширотную ионосферу вдоль силовых линий в утреннем секторе, затем вдоль зоны полярных сияний к западу в темном и к востоку в освещенном полушарии и наконец вытекает вдоль силовых линий в вечернем секторе. Ток замыкается в экваториальной плоскости в магнитосфере. Направление магнитосферного тока восточное в темном и западное в освещенном секторе. Предполагается, что магнитное поле дипольное, а токи текут вдоль силовых линий, пересекающих экваториальную плоскость на расстоянии 6,55 радиуса Земли. Эти силовые линии пересекают поверхность Земли на широте  $67^\circ$ .

Такая модель токовой системы подобна токовой системе магнитной бури, предложенной Биркеландом [10] и Альвеном [6—8]. Они предполагали, что полярные магнитные суббури обусловлены электрическими токами, которые втекают в полярную ионосферу вдоль силовых линий в дневном секторе, затем текут вдоль зоны полярных сияний и вытекают вдоль силовых линий в ночном секторе. Биркеланд предполагал, что ток обусловлен потоком электронов, приходящим непосредственно от Солнца. Альвен принимал, что ток обусловлен пространственными зарядами, которые генерируются на почти круговой границе, названной им *запрещенной областью*. Ниже, отвлекаясь от природы и причины токов, мы рассмотрим,

может ли такая токовая система удовлетворительно воспроизвести наблюдаемое распределение магнитных векторов. Используемая модель является несколько модифицированной версией модели Киркпатрика [21], которая приведена на рис. 39. Основное отличие заключается в том, что токовая система Киркпатрика повернута по часовой стрелке на  $90^\circ$  относительно направления Солнце — Земля, так что полуденный меридиан в его модели стал меридианом  $6^h$  в модели, используемой в монографии. Таким образом, принимая



Р и с . 39. Модель трёхмерной токовой системы Киркпатрика [21].

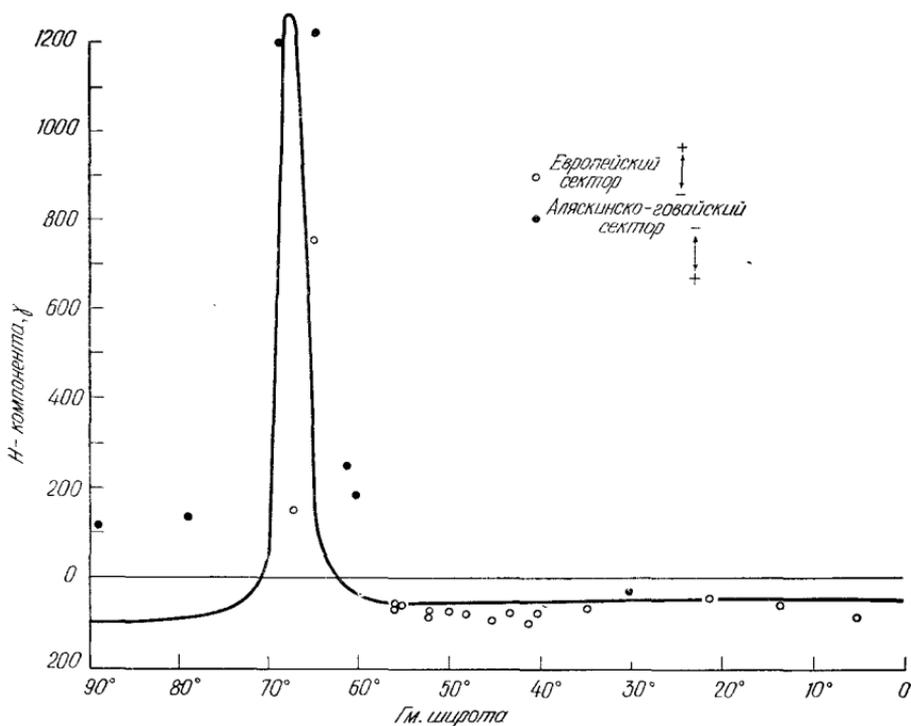
системы координаты  $(x, y, z)$  и  $(r, \theta, \varphi)$  с осью  $Oy$ , направленной к Солнцу, получаем, что токовая система состоит из

а) токовой поверхности с интенсивностью тока  $J_0 \sin(\varphi + 3\pi/2)$  на радиан  $\varphi$ , текущего вдоль силовой линии ( $r = 6,55 R_\oplus \sin \theta$ ), где  $R_\oplus$  — радиус Земли;

б) линейного тока с интенсивностью  $J_0 \sin \varphi$ , текущего вдоль зоны полярных сияний ( $\theta \approx 23^\circ$ ), который расположен на высоте 100 км;

в) линейного тока с интенсивностью  $2J_0 \sin(\varphi + \pi)$ , текущего вдоль экваториальной окружности радиуса  $6,55R_\oplus$ , где прямо  $J_0 = 10^6 \text{ а}$ .

На рис. 40а и 40б приведены вычисленные широтные распределения результирующей  $H$ -составляющей вдоль полуденно-полу-



Р и с. 40а. Сопоставление широтного распределения  $H$ -составляющей модельной токовой системы с результатами наблюдений [4]. Сектор утро — полдень, 14<sup>h</sup>UT.

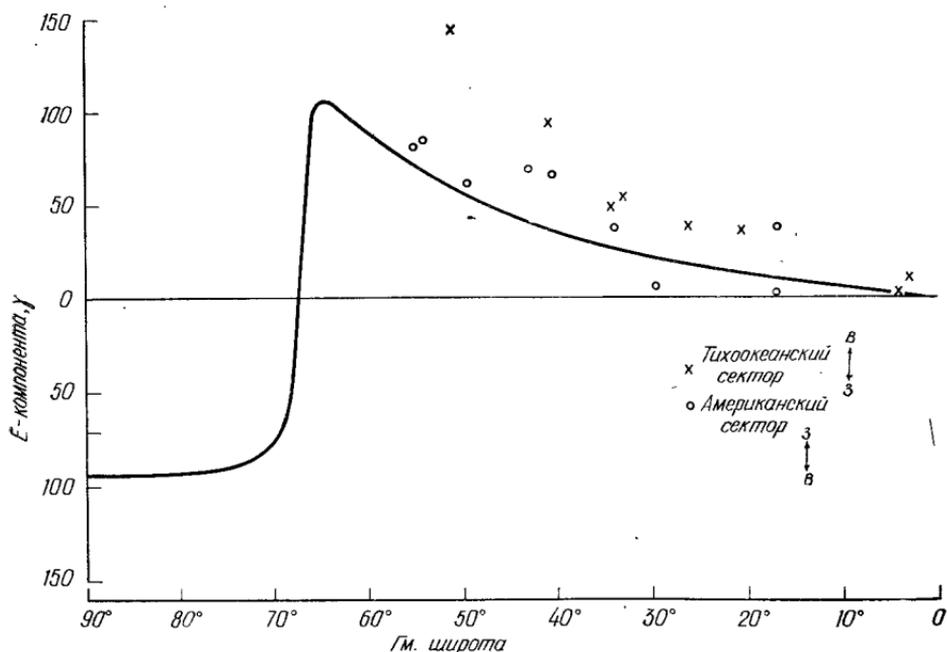
ночного меридиана и  $E$ -компоненты вдоль меридиана утро — вечер. Там же приведены величины наблюдаемых  $H$ - и  $E$ -составляющих на этих меридианах в 14<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT. Вычисления, выполненные на основе принятой модели, довольно хорошо воспроизводят наблюдаемое распределение обеих компонент на геомагнитных широтах ниже 55°.

Токовую модель Киркпатрика можно получить путем деформации сферической (ионосферной) токовой системы на рис. 31а в поверхность, образованную вращением силовой линии диполя, пересекающей экваториальную плоскость на расстоянии 6,55 радиуса Земли, вокруг оси диполя.

Очевидно, модель токовой системы, принятая в этой монографии, чрезвычайно упрощена и не может воспроизвести наблюдаемого распределения магнитных векторов на геомагнитных широтах выше 55°. Расхождения между данными наблюдений и вычислений на основе модели могут быть обусловлены неадекватностью модели вблизи овала полярных сияний. Чтобы рассчитать распределение векторов магнитного поля в полярных областях, модель токовой системы нужно модифицировать следующим образом.

а) Западная электроструя течет вдоль овала, а не вдоль зоны полярных сияний, поэтому внеионосферный ток будет втекать в овал или вытекать из него. Это подтверждается данными спутников на полярных орбитах, которые показали, что токи вдоль силовых линий наблюдаются только над овалом полярных сияний и нигде более.

б) Ширина овала полярных сияний в полуночном секторе в период полярной магнитной суббури настолько велика, что ее нельзя представить линейным током, как принято в нашей модели. Ток течет вдоль широкой полосы, охватывающей, вероятно, интервал геомагнитных широт от несколько севернее  $60$  до  $80^\circ$  в максимуме развития суббури, хотя этот ток более сконцентрирован к зоне полярных сияний; в Ситке  $Z$ -компонента была порядка  $-300\gamma$  в  $14^{\text{h}}00^{\text{m}}\text{UT}$ . Это хорошо иллюстрируется данными, приведенными на рис. 40а для сектора Аляска — Гавайские острова. Ранее отмечалось, что активные сияния движутся к полюсу от зоны полярных сияний до геомагнитной широты  $\sim 80^\circ$ . Следовательно, полярная шапка сильно подвержена воздействию непрерывно меняющегося концентрированного струйного тока. Такая изменчивость затрудняет использование распределения вектора возмущения магнитного поля в полярной шапке в качестве основы для выбора соответствующей токовой модели суббури. Вестин и Чепмен [32] и Киркпатрик

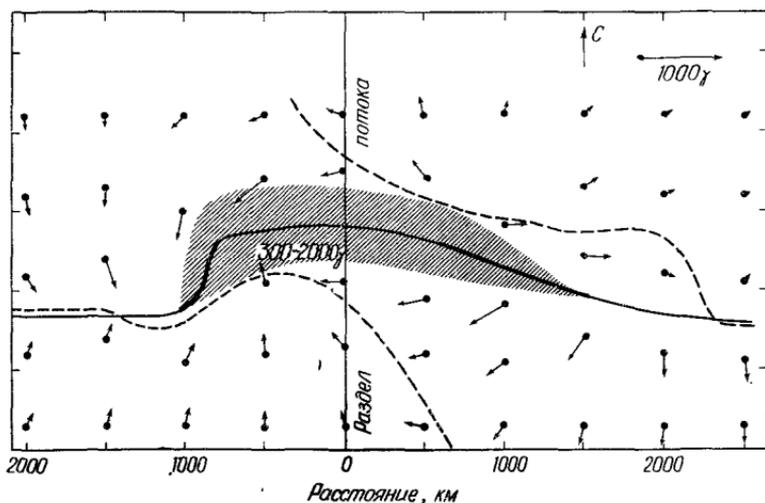


Р и с. 40б. Сопоставление широтного распределения  $E$ -составляющей модельной токовой системы с результатами наблюдений [4]. Сектор утро—вечер,  $14^{\text{h}}\text{UT}$

[21] нормировали это распределение, используя наблюдаемые значения возмущенного поля на полюсе геомагнитного диполя, и показали, что модель Биркеланда — Альвена не в состоянии правильно воспроизвести распределение магнитного поля в низких широтах.

в) Поскольку электроструя, по-видимому, течет вдоль активных сияний (в высокопроводящей полосе ионосферы), каулинговская проводимость играет существенную роль в ионосферной части токовой системы (ток Каулинга) [12]. Кроме того, так как ионосфера в целом характеризуется анизотропной проводимостью, ток Холла может генерироваться введением пространственных зарядов из магнитосферы в ионосферу, как подразумевается в нашей модели.

Аткинсон [9] показал путем аналогичных численных модельных вычислений, что комбинация токовой системы с токами вдоль силовых линий (аналогичной используемой в данной монографии) и ионосферного тока Холла может хорошо описать чрезвычайно сложные распределения магнитных векторов вблизи областей активных сияний. В своих модельных вычислениях Аткинсон [9] принимал во внимание распределение активных сияний, в частности движущуюся к полюсу выпуклость и перемещающийся к западу



Р и с . 41. Распределение возмущенных векторов в выпуклости полярных сияний и около нее [9].

изгиб. Результаты его вычислений распределения векторов магнитных возмущений приведены на рис. 41.

Трехмерные модели, аналогичные рассмотренным выше, следует проверить с использованием магнитограмм сети обсерваторий, а также непосредственными наблюдениями *in situ* с ракет или экспериментами с ионизирующимися облаками. Очень важно исследовать,

существует ли интенсивный ионосферный холловский ток через полярную шапку или вариации магнитного поля в полярной шапке обусловлены токами вдоль силовых линий. Идеальным местом для такого эксперимента является геомагнитная широта  $75^\circ$  в полуденном секторе, когда распространяющаяся к полюсу выпуклость в полярных сияниях или движущийся к западу изгиб наблюдается в экваториальном направлении от станции. По ракетным наблюдениям в полярной шапке [15] обнаружен ионосферный ток во время суббури, что дает основание предполагать наличие интенсивного ионосферного тока через полярную шапку.

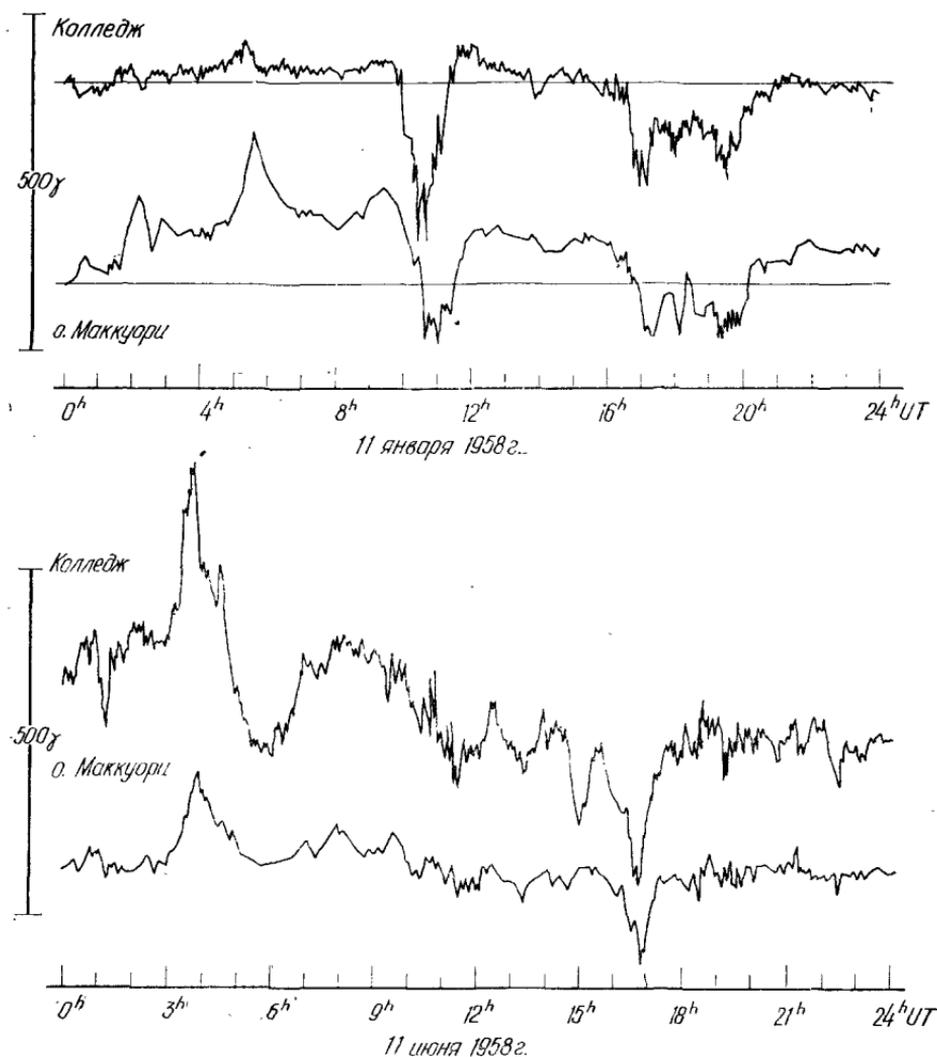
Правильное распределение тока Холла поможет определить электростатическое поле в ионосфере, которое может затем проецироваться в магнитосферу [31] (см. разд. 10.3).

### 3. 5. Полярные магнитные суббури в геомагнитносопряженных областях

Полярные магнитные суббури в геомагнитносопряженных точках обнаруживают поразительное сходство [11, 13, 14, 26, 27, 33—38]. Это означает, что полярные электроструи в геомагнитносопряженных областях обусловлены общим электрическим полем и, следовательно, силовые линии геомагнитного поля, проецирующиеся на зону полярных сияний, в первом приближении эквипотенциальны. На рис. 42 приведены примеры вариаций  $H$ -составляющей в Колледже (гм. широта  $64,7^\circ$ ) и на о. Маккуори (гм. широта —  $61,1^\circ$ ) [25]. Хотя вариации в деталях несколько различны, основные изменения весьма схожи, за исключением величины положительной бухты, которая существенно больше на станции, расположенной в летнем полушарии, чем на станции зимнего полушария [25, 35]. Это очевидное доказательство того, что положительные бухты в корне отличаются от отрицательных бухт.

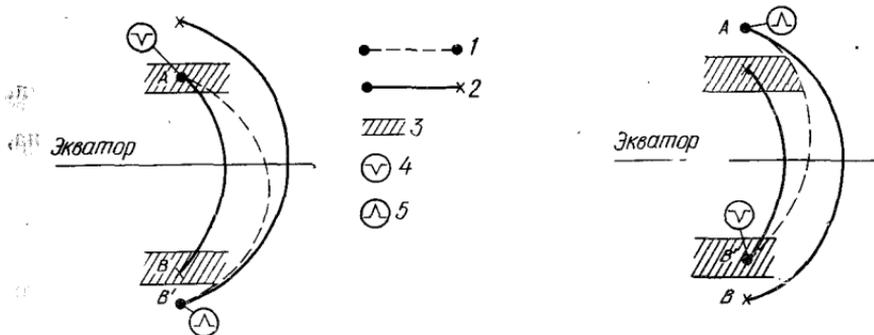
Корреляция значительно хуже для высокоширотных сопряженных пар станций, расположенных внутри овала полярных сияний [37]. Исследование сопряженной пары Шефферд Бей — Скотт Бейз показало, что в некоторых случаях одна станция регистрирует положительную бухту, в то время как другая — отрицательную [37]. Менг и Акасофу [25] исследовали детально эту проблему и нашли, что такое нарушение сопряженности обусловлено асимметрией конфигурации геомагнитного поля относительно экватора.

В разд. 2.3 были рассмотрены магнитные вариации в окрестности движущегося к западу изгиба. Согласно рис. 28, если станция полярной шапки располагается далеко от изгиба, то она регистрирует положительную бухту (станция  $E$ ). Станция  $D$  располагается достаточно близко к интенсивной (западной) электроструе и регистрирует отрицательную бухту. Поэтому если сопряженные

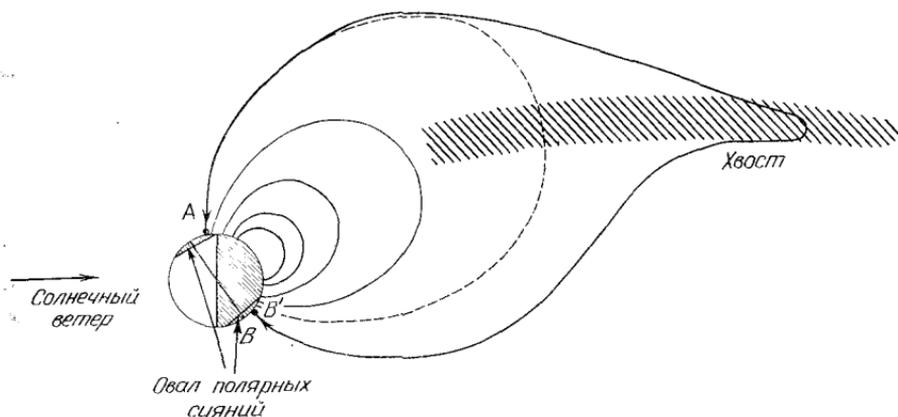


Р и с. 42. Магнитограммы  $H$ -компоненты магнитного поля в геомагнитноспряженных областях [25].

станции наблюдают бухты противоположных знаков, то расстояния между станциями и изгибами должны быть различны. Рис. 43 иллюстрирует схематически эту ситуацию. В северные зиму и лето вариация  $H$ -составляющей поперек изгиба одинакова. Менг и Акасофу [25] отмечают тенденцию более частого появления расширяющихся к полюсу отрицательных бухт в северном полушарии, чем в южном, в период северной зимы (а также большей частоты одиночных положительных бухт в южном полушарии по сравнению с



Р и с. 43. Диаграмма, иллюстрирующая смещение картины магнитных вариаций в северном и южном полушариях, что приводит к плохой корреляции в геомагнитносопряженных областях полярной шапки. 1 — вычисленная сопряженная пара; 2 — действительная сопряженная пара; 3 — овал полярных сияний; 4 — отрицательная бухта; 5 — положительная бухта. Слева — северная зима; справа — северное лето.



Р и с. 44. Схема, иллюстрирующая асимметрию магнитосферы, которая приводит к смещению сопряженных областей.

северным). Это свидетельствует о том, что сопряженные области смещены примерно на 200—500 км. Поэтому приполюсная граница изгиба ( $n$ , следовательно, граница вторжения электронов) ближе к северной сопряженной станции, чем к южной. Рис. 44 иллюстрирует модель для летних месяцев северного полушария. В этой модели сопряженной к станции  $A$  является станция  $B$  (а не  $B'$ ), которая определена с использованием сферических гармонических коэффициентов постоянного магнитного поля Земли. Электроны полярных сияний достигают более высоких широт в южном полушарии (местная зима), чем в северном полушарии (местное лето).

## ЛИТЕРАТУРА

## Общая

- Чарман С., Бартелс J., Geomagnetism, Clarendon Press, London, 1940.
- Матсushита С., Кампбелл W. H., Physics of geomagnetic phenomena, Academic Press, New York, 1967.

## Цитированная в тексте

1. Акасофу S.-I., Чарман С., On the development of magnetic storm fields in low and middle latitudes, Planet. Space Sci., **12**, 607—626 (1964).
2. Акасофу S.-I., Чарман С., The normality of the SD variation at Huancayo and the asymmetry of the main phase of geomagnetic storms, Planet. Space Sci., **15**, 205—207 (1967).
3. Акасофу S.-I., Менг С.-I., Low latitude negative bays, J. Atmos. Terr. Phys., **30**, 227—241 (1968).
4. Акасофу S.-I., Менг С.-I., A study of polar magnetic substorms, J. Geophys. Res., **74**, 293—313 (1969).
5. Акасофу S.-I., Чарман С., Менг С.-I., The polar electrojet, J. Atmos. Terr. Phys., **27**, 1275—1305 (1965).
6. Алфвэн Н., Theory of magnetic storms, I, Kungl. Sv. Vef-Akademiens Handl., **18**, № 3 (1939).
7. Алфвэн Н., Theory of magnetic storms, II, III, Kungl. Sv. Vef-Akademiens Handl., **18**, № 9, (1940).
8. Алфвэн Н., Cosmical electrodynamics, Clarendon Press, Oxford, England, 1950. (Русский перевод 2-го изд.: Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, Космическая электродинамика, 2-е изд., изд-во «Мир», М., 1967.)
9. Аткинсон G., The current system of geomagnetic bays, J. Geophys. Res., **72**, 6063—6067 (1967).
10. Биркеланд K., The Norwegian aurora polaris expedition 1902—1903, Vol. I, Section 2, H. Aschehoug, Christiania, 1913.
11. Бобров М. С., Магнитные возмущения в сопряженных точках как источник данных о верхней атмосфере и солнечной корпускулярной радиации, Геомagnetизм и аэрономия, **3**, 537—545 (1963).
12. Вострöm R., A model of the auroral electrojets, J. Geophys. Res., **69**, 4983—4999 (1964).
13. Вуд G. M., The conjugacy of magnetic disturbance variations, J. Geophys. Res., **68**, 1011—1013 (1963).
14. Брюнелли Б. Е., Вариации магнитного поля в сопряженных точках, Геомagnetизм и аэрономия, **2**, 933—942 (1962).
15. Саhill L. J., Jr., Detection of an electrical current in the ionosphere above Greenland, J. Geophys. Res., **64**, 1377—1380 (1959).
16. Суммингс W. D., Coleman Jr. P. J., Simultaneous magnetic field variations at the earth's surface and at the synchronous equatorial distance, Radio Sci., **3**, 758—761 (1968).
17. Фельдштейн Я. И., Морфология полярных сияний и геомagnetизм, Сб. «Полярные сияния и свечение ночного неба», Изд-во АН СССР, № 10, 121—126 (1963).
18. Фельдштейн Я. И., Зайцев А. Н., Токовая система SD-вариаций в высоких широтах для зимнего сезона в период МГГ, Геомagnetизм и аэрономия, **5**, 1123—1125 (1965).
19. Fukushima N., Polar magnetic storms and geomagnetic bays, J. Fac. Sci. Tokyo Univ., **8**, 293—412 (1953).
20. Херрнер J. P., High latitude magnetic disturbances, Aurora and Airglow, ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York, 1967, p. 75—92.

21. K i r k p a t r i c k C. B., On current systems proposed for  $S_D$  in the theory of magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **57**, 511—526 (1952).
22. K o k u b u n S., Dynamic behaviour and north-south conjugacy of geomagnetic bays, *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*, **19**, 177—200 (1965).
23. М а й с у р а д з е П. А., О динамике поля магнитных вариаций в высоких широтах, *Геомагнетизм и аэрoномия*, **5**, 1071—1077 (1965).
24. M e n g C.-I., Polar auroral and magnetic substorms: their morphology and relation to the ring current, Ph. D. Dissertation, Geophysical Institute, Univ. of Alaska, 1968.
25. M e n g C.-I., A k a s o f u S.-I., Polar magnetic substorms in the conjugate areas, *Radio Sci.*, **3**, 751—757 (1968).
26. N a g a t a T., K o k u b u n S., On the earth storms, IV. Polar magnetic storms, with special reference to relation between geomagnetic disturbances in the northern and southern auroral zones, *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*, **14**, 273—290 (1960).
27. O n d o h T., M e d a H., Geomagnetic-storm correlation between the Northern and Southern Hemispheres, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **14**, 22—32 (1962—1963).
28. R o s t o k e r G., Midlatitude transition bays and their relation to the spatial movement of overhead current systems, *J. Geophys. Res.*, **71**, 79—95 (1966).
29. S c r a s e F. J., The electric current associated with polar magnetic substorms, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **20**, 567—579 (1967).
30. S i l s b e e H. C., V e s t i n e E. H., Geomagnetic bays, their frequency and current-systems, *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, **47**, 195—208 (1942).
31. T a y l o r H. E., H o n e s E. W. Jr., Adiabatic motion of auroral particles in a model of the electric and magnetic fields surrounding the earth, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3605—3628 (1965).
32. V e s t i n e E. H., C h a p m a n S., The electric current-system of geomagnetic disturbance, *Terrest. Mag.*, **43**, 351—382 (1938).
33. W e s c o t t E., Magnetic activity during periods of auroras at geomagnetically conjugate points, *J. Geophys. Res.*, **67**, 1353—1355 (1962).
34. W e s c o t t E. M., M a t h e r K. B., Magnetic conjugacy from  $L=6$  to  $L=1.4$ , 1. Auroral zone: Conjugate area, seasonal variations, and magnetic coherence, *J. Geophys. Res.*, **70**, 29—42 (1965).
35. W e s c o t t E. M., M a t h e r K. B., Magnetic conjugacy from  $L=6$  to  $L=1.4$ , 2. Midlatitude conjugacy, *J. Geophys. Res.*, **70**, 43—48 (1965).
36. W e s c o t t E. M., M a t h e r K. B., Magnetic conjugacy from  $L=6$  to  $L=1.4$ , 3. Low latitude conjugacy, *J. Geophys. Res.*, **70**, 49—52 (1965).
37. W e s c o t t E. M., M a t h e r K. B., Magnetic conjugacy at very high latitude; Shepherd Bay — Scott Base relationship, *Planetary Space Sci.*, **13**, 303—324 (1965).
38. Ю д о в и ч Л. А., Магнитная активность в сопряженных точках, *Геомагнетизм и аэрoномия*, **3**, 723—727 (1963).
39. З а й ц е в А. Н., Ф е л ь д ш т е й н Я. И., Полярные возмущения и система токов по данным зимнего сезона МГТ, *Геомагнетизм и аэрoномия*, **7**, 553—558 (1967).
40. Z m u d a A. J., H e u r i n g F. T., M a r t i n J. H., Dayside magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral oval, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1115—1117 (1967).
41. Z m u d a A. J., M a r t i n J. H., H e u r i n g F. T., Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5033—5045 (1966).

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

A k a s o f u S.-I., M e n g C.-I., A study of polar magnetic substorms, *J. Geophys. Res.*, **74**, 293—313 (1969).

- Block L. P., Fälthammer C.-G., Field aligned currents and auroral precipitation, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac and A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 285—292.
- Block L. P., Fälthammer C.-G., Effects of field-aligned currents on the structure of the ionosphere, J. Geophys. Res., **73**, 4807—4812 (1968).
- Bostrom R., Currents in the ionosphere and magnetosphere, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 445—458.
- Bostrom R., Auroral current systems, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 277—284.
- De Witt R. N., Polarization of the auroral electrojet, J. Geophys. Res., **73**, 6307—6311 (1968).
- Мишин В. М., Немцова Э. И., Некоторые результаты сравнения магнитных возмущений в северном и южном полушариях, Геомагнетизм и аэронавтика, **1**, № 3, 404 (1961).
- Мишин В. М., Попов Г. В., О продольных токах в магнитосфере, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАГА, Мадрид, сентябрь 1969 г.
- Фельдштейн Я. И., Polar geomagnetic disturbances, Space Res., eds. A. P. Mitra, L. G. Jacchia, W. S. Newman, North-Holland Publ. Co. Amsterdam, **8**, 266—292, 1968.
- Фельдштейн Я. И., Зайцев А. Н. Quiet and disturbed solar-daily variations of magnetic field at high latitudes during the IGY, Tellus, **20**, 338—366 (1968).
- Фельдштейн Я. И., Зайцев А. Н., SD variation of the magnetic field in high latitudes with different intensity of magnetic disturbances, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 207—214.
- Fukushima N., Three-dimensional electric current and toroidal magnetic field in the ionosphere, Rep. Ionosph., Space Res. Japan, **22**, 173—195 (1968).
- Fukushima N., Nagata T., Morphology of magnetic disturbance, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 195—205.
- Hultqvist B., Polar magnetic substorms, KGO Rep. № 693, April 1969.
- Iijima T., Nagata T., Constitution of polar magnetic disturbances Rep. Ionosph. Space Res. Japan, **22**, 1—24 (1968).
- Iijima T., Fukushima N., Kamide Y., Worldwide geomagnetic change preceding the onset of auroral electrojet, Rep. Ionosph. Space Res. Japan, **22**, 161—172 (1968).
- Maе M., Nebergall D., Variation of geomagnetic disturbance with latitude, J. Geophys. Res., **74**, 1305—1307 (1969).
- Matsushita S., Polar daily geomagnetic disturbances, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 215—227.
- Meng C.-I., Akasofu S.-I., A study of polar magnetic substorms, 2. Three-dimensional current system, J. Geophys. Res., **74**, 4035—4053 (1969).
- Schild M. A., Freeman J. W., Dessler A. J., A source for field-aligned currents at auroral latitudes, J. Geophys. Res., **74**, 247—256 (1969).

# Ионосферная суббурия

## 4. 1. Введение

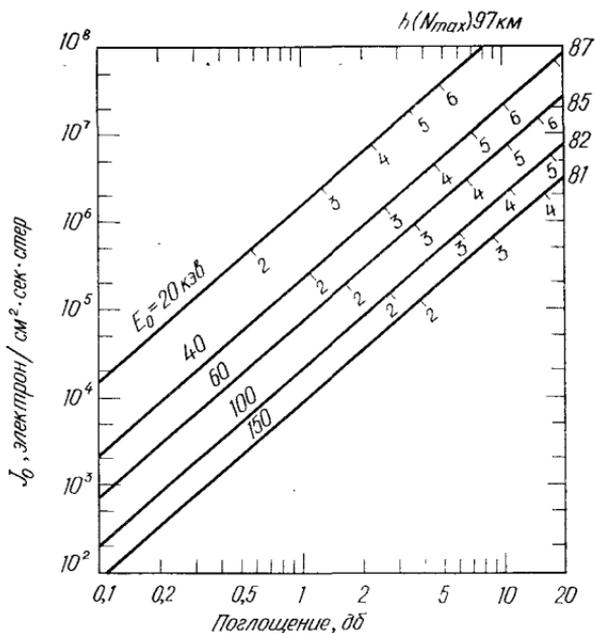
Ионосфера бурно реагирует на суббурию в магнитосфере, что проявляется в различных изменениях ее параметров. В этой монографии будут в основном рассмотрены интенсивная ионизация нижней ионосферы и перераспределение ионизации в период магнитосферных суббурь.

Интенсивная ионизация в нижней ионосфере свидетельствует о вторжении электронов с большими энергиями, чем у электронов, которые вызывают визуально наблюдаемые полярные сияния. Поэтому это проявление ионосферной суббурии тесно связано с суббурей в рентгеновском излучении, которая будет описана в следующей главе. Наиболее подходящим прибором для исследования аномальной ионизации в нижней ионосфере является риометр, который регистрирует сильное поглощение космического радиоизлучения, проходящего через ионизированный слой при движении к поверхности Земли. Аномальную ионизацию можно наблюдать и другими методами: для изучения радиосияний широко применяются радиолокаторы; аномальная ионизация вызывает возмущения в условиях распространения коротких и ультракоротких волн.

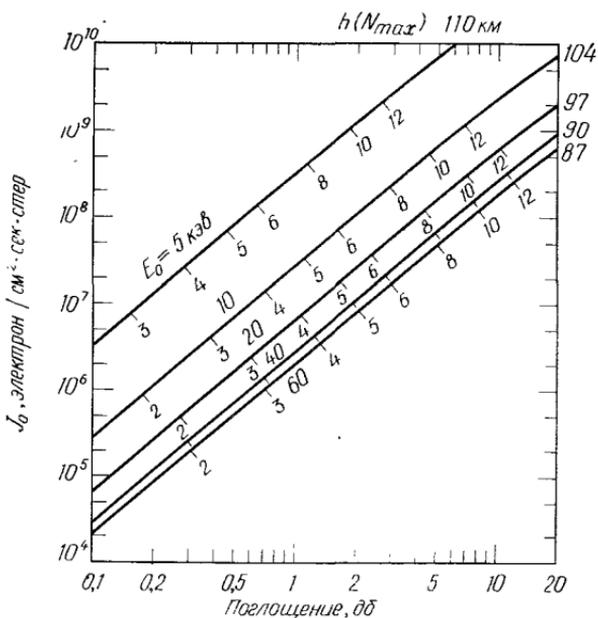
Коэффициент поглощения

$$\kappa \sim \frac{n_e}{v^2 + (\omega \pm \omega_B)^2},$$

где  $n_e$  — концентрация электронов,  $v$  — частота столкновений электронов,  $\omega_B$  — гирочастота электронов относительно компоненты земного магнитного поля вдоль направления распространения [60] и  $\omega$  — частота радиосигнала. Знак плюс соответствует обыкновенной волне, а знак минус — необыкновенной. На рис. 45 и 46 даны интегральные коэффициенты поглощения вертикально падающей плоской обыкновенной волны на частоте 30 Мгц для моделей атмосферы над Колледжем, когда энергия электронов определяется спектром типа  $J(>E) = J_0 e^{-E/E_0}$  [4]. Здесь  $J$  — поток электронов с энергией больше  $E$ ,  $J_0$  — интегральный поток электронов всех энергий, а  $E_0$  — так называемый показатель жесткости спектра.



Р и с. 45. Интегральное поглощение космического радиоизлучения с частотой 30 Мгц при вторжении электронов (характеризуемом параметрами  $J_0$  и  $E_0$ ) в ионосферу над Колледжем днем [4].



Р и с. 46. То же, что на рис. 45, ночью.

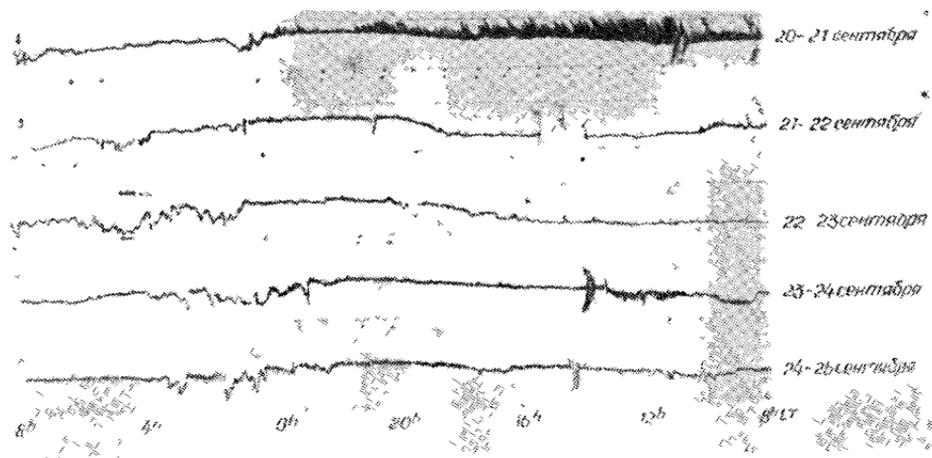
На рис. 45 приведены дневные условия, а на рис. 46 — ночные.  $h(N_{\max})$  — высота, на которой концентрация электронов в ионосфере вследствие вторжения энергичных электронов максимальна. Числа вдоль каждой линии указывают критическую частоту аномальной ионизации (или  $f_oE_s$ ).

#### 4. 2. Типичная суточная вариация уровня поглощения космического радиоизлучения

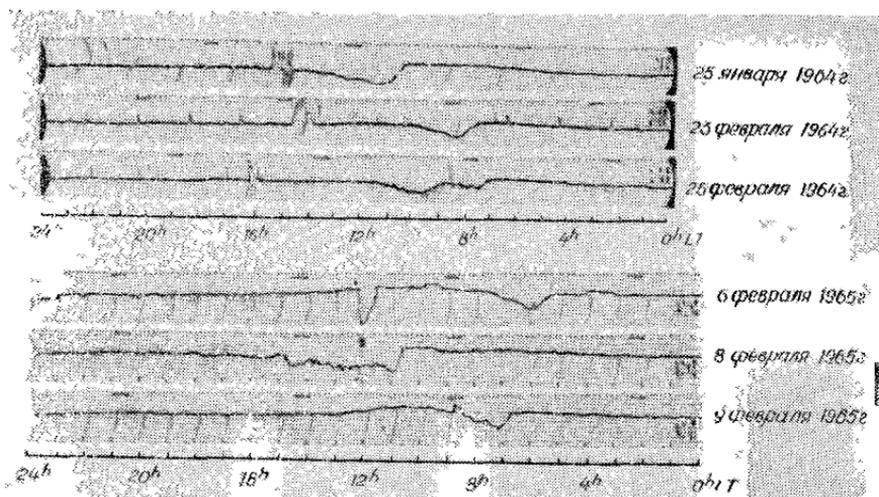
В этом разделе будут рассмотрены типичные суточные записи риометра в Колледже на частоте 27,6 МГц. На рис. 47а приведены записи пяти последовательных дней в сильно возмущенный период в течение МГГ, а на рис. 47б — записи пяти дней в умеренно возмущенные периоды в течение МГСС. На рис. 47а видно интенсивное и почти непрерывное поглощение космического радиоизлучения в дневные часы, особенно 22—23 сентября. Это непрерывное поглощение постепенно уменьшается после 16<sup>h</sup>LT. Поглощение между 16 и 0<sup>h</sup>LT характеризуется кратковременными поглощениями импульсного типа; типичными примерами могут служить случаи поглощения в 20<sup>h</sup>30<sup>m</sup>LT 21 сентября, в 19<sup>h</sup>00<sup>m</sup>, 22<sup>h</sup>00<sup>m</sup> и 23<sup>h</sup>00<sup>m</sup> LT 22 сентября, в 22<sup>h</sup>40<sup>m</sup>LT 23 сентября, в 17<sup>h</sup>20<sup>m</sup> и 22<sup>h</sup>00<sup>m</sup>LT 24 сентября. Этот период резко обрывается в полуночные часы интенсивным поглощением с меняющейся интенсивностью. Примерами поглощения такого типа могут служить записи в 0<sup>h</sup>45<sup>m</sup>LT в ночь с 21 на 22 сентября, в 0<sup>h</sup>50<sup>m</sup>LT в ночь с 23 на 24 сентября и в 0<sup>h</sup>10<sup>m</sup>LT в ночь с 24 на 25 сентября. Тщательное изучение показало, что поглощение такого типа длится от 1 до 3 час и что одно или два аналогичных явления следуют за первым вплоть до рассвета. Например, в ночь с 21 на 22 сентября первое поглощение (0<sup>h</sup>45<sup>m</sup>LT) сопровождалось поглощением, начавшимся в 3<sup>h</sup>40<sup>m</sup>LT. В ночь с 22 на 23 сентября зарегистрированы по крайней мере два случая поглощения после первоначального (0<sup>h</sup>50<sup>m</sup>LT); в ночь с 23 на 24 сентября второе событие резко началось в 2<sup>h</sup>30<sup>m</sup>LT, а в ночь с 24 на 25 сентября — в 2<sup>h</sup>50<sup>m</sup>LT.

В более поздние утренние часы начало аномального поглощения происходит более плавно, чем около полуночи. Это видно на записях в 6<sup>h</sup>40<sup>m</sup>LT 21 сентября, в 6<sup>h</sup>00<sup>m</sup>LT 22 сентября и в 8<sup>h</sup>10<sup>m</sup>LT 23 сентября. На рис. 47б приведено шесть примеров записей риометра в Колледже, которые выбраны для иллюстрации интенсивного поглощения в утренние часы; они будут детально рассмотрены в разд. 4.6.

Результирующая схема суточной вариации поглощения на типичной станции зоны сияний приведена на рис. 48. Кратковременные поглощения импульсного типа в вечерние часы называются типом *E*, сильное поглощение с внезапным началом в околополуночные и ранние утренние часы — типом *N*, а поглощение с постепен-

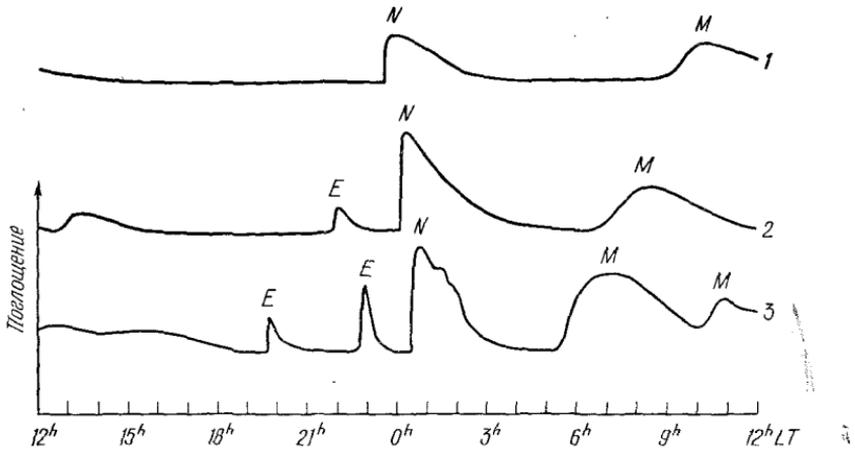


Р и с. 47а. Несколько риометрических записей, сделанных в Колледже в период МГГ (сентябрь 1957 г.)



Р и с. 47б. Несколько риометрических записей в Колледже в период МГСС.

ным началом в поздние утренние часы — типом *M*. Эта классификация основана на особенностях развития полярных сияний в период поглощения каждого типа. В прежних исследованиях типы *E* и *N* объединялись и назывались типом *F* (быстрый) [57] или ночным типом [29]. Тип *M* относился к медленно меняющемуся поглощению (SVA); поглощение типа *M* в поздние утренние часы



Р и с. 48. Схема, иллюстрирующая суточную вариацию поглощения космического радиоизлучения. 1 — довольно спокойный период; 2 — умеренно возмущенный период; 3 — возмущенный период.

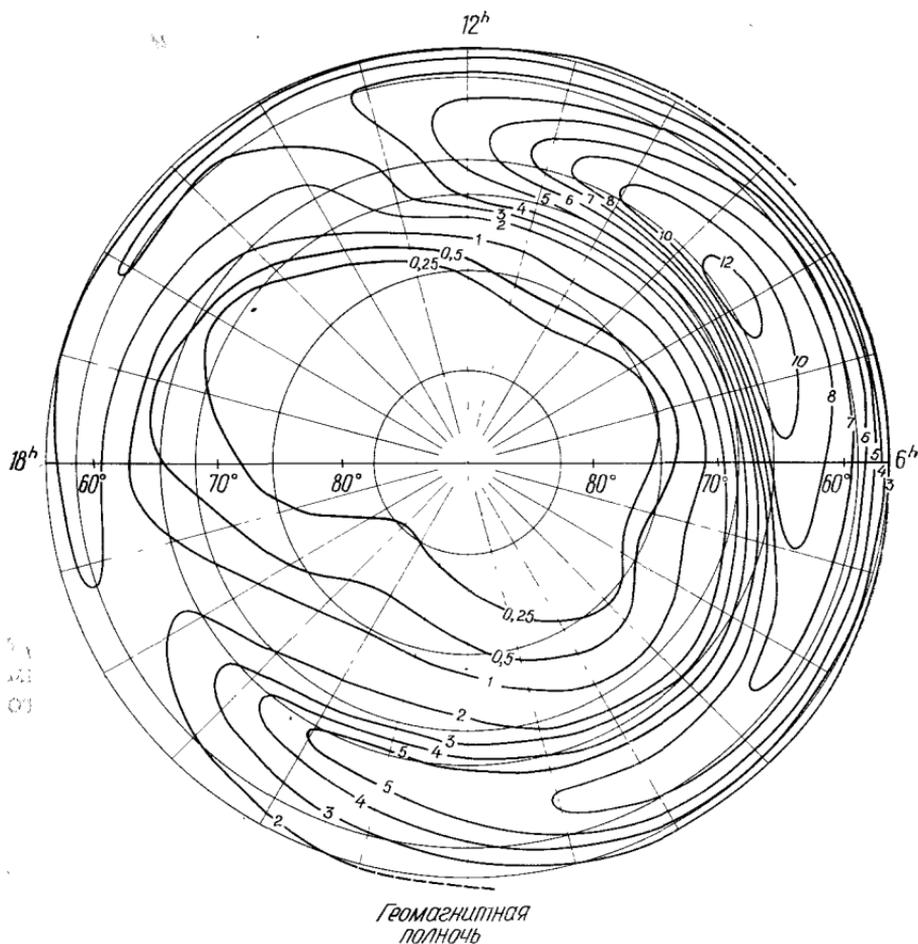
называлось дневным поглощением. Эти три типа поглощения будут рассмотрены в разд. 4.4. — 4.6. Однако сначала мы рассмотрим результаты статистических исследований поглощения космического радиоизлучения.

### 4. 3. Статистическая картина суточной вариации

Суточные записи риометров, аналогичные рассмотренным в разд. 4.2., можно собрать для статистического анализа по большому числу станций, расположенных на различных геомагнитных широтах. Из примеров, приведенных в разд. 4.2, следует, что существуют по крайней мере три важных параметра, которые нужно проанализировать: частота появления, интенсивность и продолжительность [29]. Не следует удивляться, если получатся несколько различающиеся результаты в зависимости от того, какой из трех параметров преобладает в различных статистических выборках.

Хартц и др. [30] провели анализ риометрических записей шести канадских станций. Они составили список появления и продолжительности случаев поглощения интенсивностью более  $1 \text{ } \delta\text{б}$  в каждый получасовой интервал суток. Затем они подсчитали долю времени появления случаев поглощения в функции геомагнитной широты и среднего геомагнитного времени. Результаты приведены на рис. 49а.

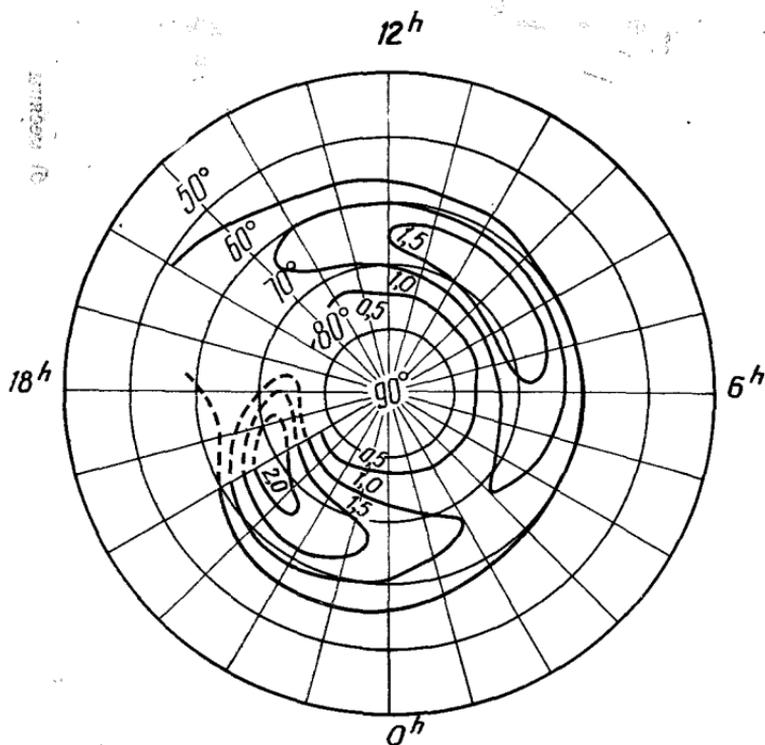
В этом статистическом исследовании наиболее сильное поглощение появляется примерно в  $8^{\text{h}}00^{\text{m}}\text{LT}$  на геомагнитной широте  $67^{\circ}$ .



Р и с. 49а. Доля времени (в процентах), в течение которого поглощение космического радиоизлучения составляло 1 дб или более на частоте 30 Мгц [30].

Кроме того, станция на этой широте характеризуется в течение суток двумя максимумами частоты появления поглощения: одним в ранние вечерние часы ( $\sim 22^{\text{h}}$ LT) и другим около  $8^{\text{h}}$ LT. Станция на геомагнитной широте  $60^{\circ}$  характеризуется одним максимумом около  $8^{\text{h}}$ LT. Аналогичные результаты по данным сети риометров на территории Советского Союза получены Дриацким [20].

Харгривс и Каули [29] получили в полярной проекции распределение медианной интенсивности поглощения с несколько отличающимися результатами. Их данные приведены на рис. 49б. Основное различие между приведенными на рис. 49а и 49б данными состоит в появлении резкого максимума интенсивности поглощения

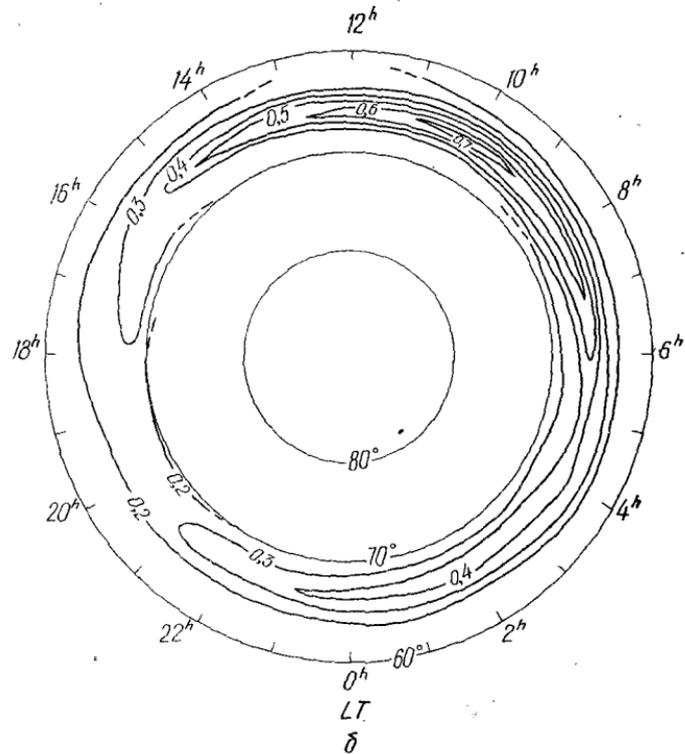
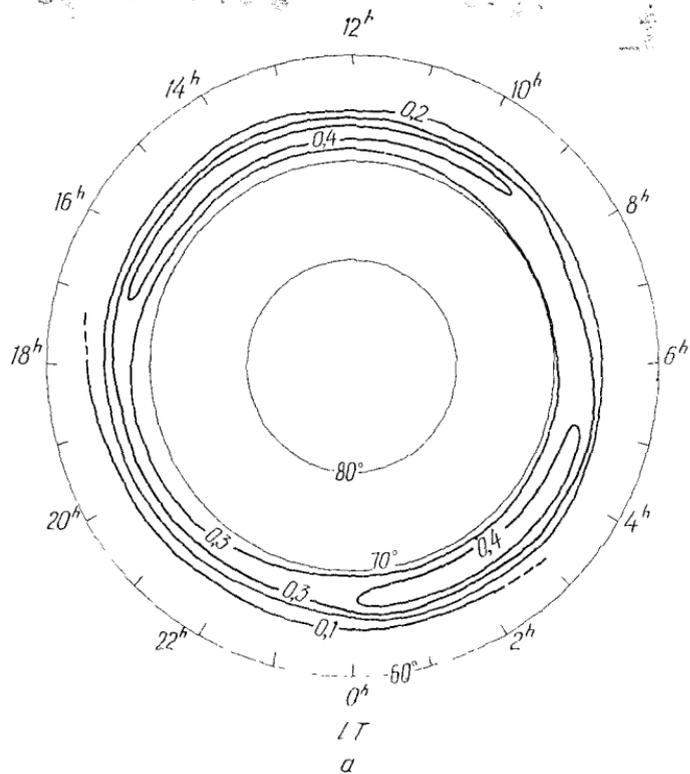


Р и с. 496. Медианная интенсивность случаев поглощений (в децибеллах) в координатах исправленная геомагнитная широта — геомагнитное время [29].

в вечерние часы на геомагнитной широте  $67^\circ$ . Различие обусловлено, по-видимому, тем, что типы *E* и *N* достаточно интенсивны, но менее длительны, чем тип *M*. Поэтому они не выявляются при методе обработки, использованном Хартном и др. [30].

Как отмечалось рядом исследователей (см. [5]), существуют заметные сезонные вариации интенсивности поглощения. На рис. 50 приведены средние значения поглощения для зимы и лета, полученные Хуком [36] по данным сети риометров на Аляске на геомагнитных широтах между  $61^\circ$  и  $69^\circ$ . Видно, что интенсивное поглощение в поздние утренние часы выявляется летом недостаточно четко.

Очевидно, что суточные закономерности поглощения, проиллюстрированные на рис. 48—50, не означают, что суточная вариация поглощения, наблюдаемая в какой-то точке на поверхности Земли, обусловлена ее вращением под фиксированным относительно Солнца распределением поглощения. Наоборот, случаи поглощения (типы *N*, *E*, *M*) длятся несколько часов, как видно из типичных примеров риометрических записей. Поэтому распределение



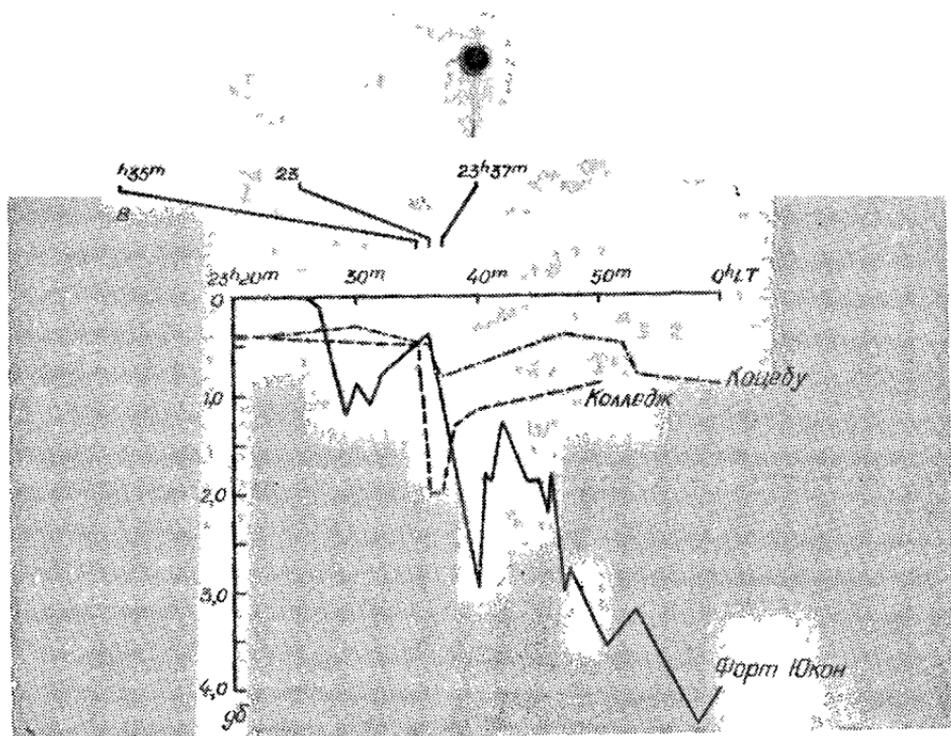
Р и с. 50. Среднее поглощение космического радиоизлучения (в децибеллах) в летние (а) и зимние (б) месяцы 1964—1965 гг. в координатах геомагнитная широта — геомагнитное время [36].

поглощения, подобное изображенному на рис. 48, появляется только время от времени.

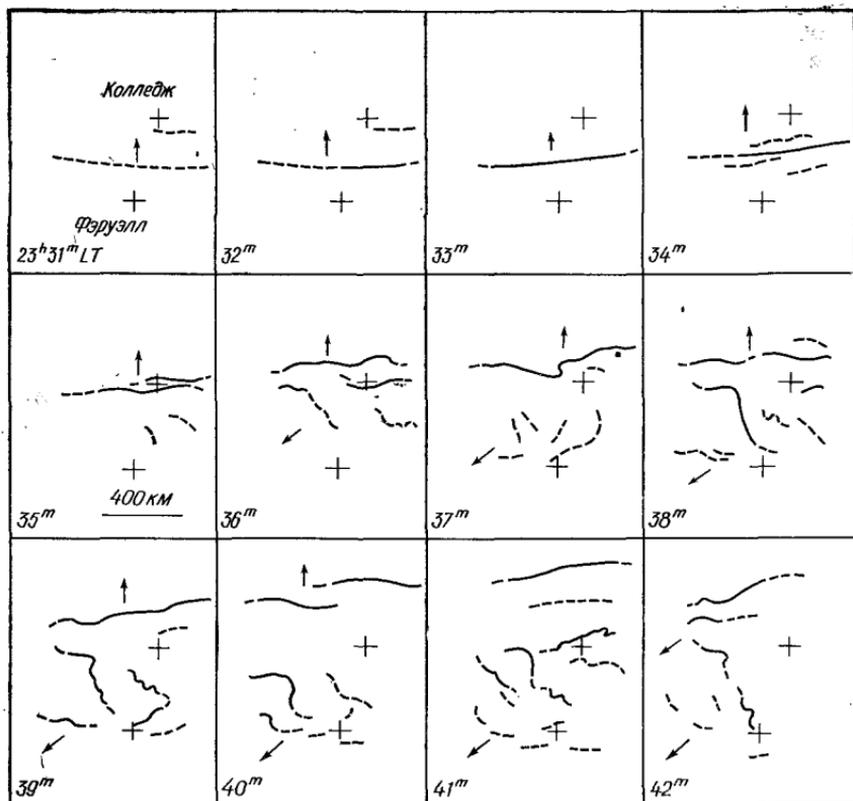
#### 4. 4. Поглощение типа *N*

Поглощение типа *N* и его связь с активностью в полярных сияниях и геомагнитными возмущениями исследовались в большом числе работ [2, 5, 9, 22, 26, 34, 35, 51, 57]. В этом и следующих двух разделах описана взаимосвязь трех типов поглощения с развитием суббури в полярных сияниях и магнитных возмущениях. Это позволит установить картину развития и затухания ионосферной суббури во всей полярной шапке.

Поглощение типа *N* связано с движением сияний к полюсу в период суббури. На рис. 51 приведен случай, имевший место 26 января 1962 г. [57]. Дуга, в  $23^{\text{h}}35^{\text{m}}\text{LT}$  расположенная к югу



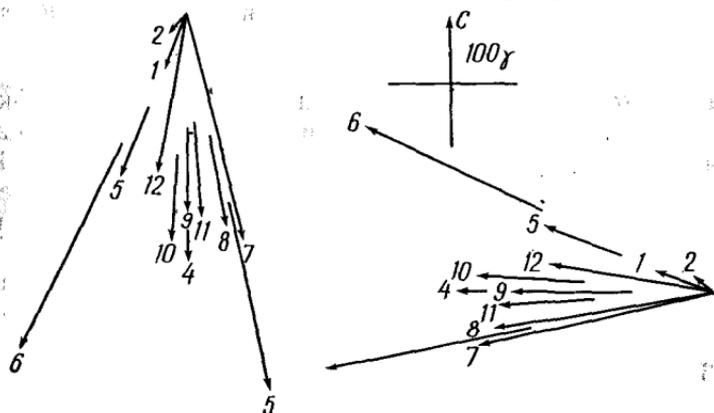
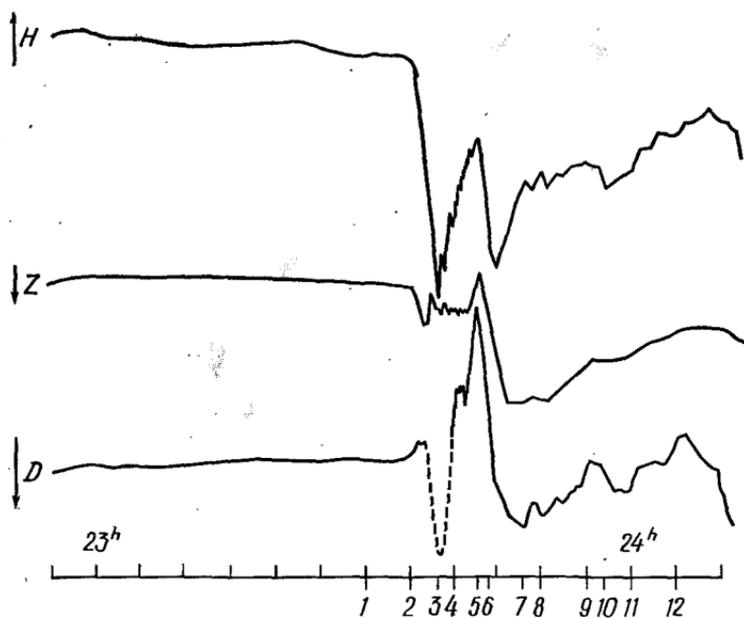
Р и с. 51. Поглощение типа *N* и соответствующая активность полярных сияний [57].



Р и с. 52а. Поглощение типа *N* и соответствующая активность полярных сияний и магнитных возмущений. Полярные сияния 25 декабря 1957 г.

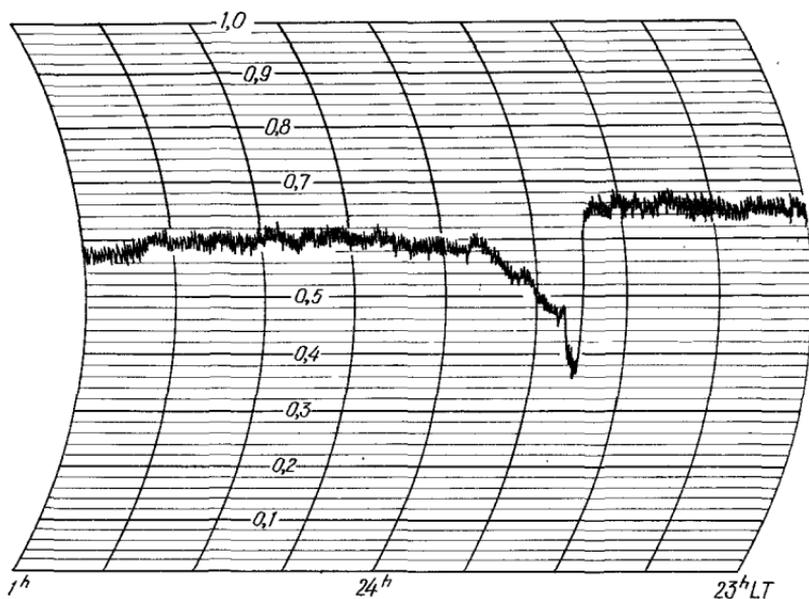
от Колледжа, в  $23^{\text{h}}36^{\text{m}}$  LT, стала внезапно активной и начала быстро двигаться к полюсу. Внезапное и резкое начало суббури в полярных сияниях хорошо заметно при сопоставлении фотографий, сделанных в  $23^{\text{h}}35^{\text{m}}$  и  $23^{\text{h}}36^{\text{m}}$  LT. Поглощение космического радиоизлучения началось сначала в Колледже, но развилось наиболее интенсивно на станции форт Юкон; в Коцебу, примерно в 700 км к западу от Колледжа, в этот период наблюдалось только незначительное поглощение.

На рис. 52а приведен другой пример тесной взаимосвязи между взрывным движением сияния к полюсу и резким началом поглощения. Дуга, которая располагалась между Фэруэллом и Колледжем в  $23^{\text{h}}31^{\text{m}}$  LT, внезапно стала активной в  $23^{\text{h}}32^{\text{m}}$  LT с последующим движением к полюсу. Скорость движения составляла 1070 м/сек. На рис. 52б и 52в приведены вариации магнитного поля и запись риометра в Колледже соответственно.



Р и с. 526. То же, что на рис. 52а, магнитная запись. В нижней части рисунка слева векторы магнитного поля, справа — векторы эквивалентного тока. Колледж, 25 декабря 1957 г.

Поскольку поглощение типа  $N$  связано с движением полярных сияний в полуденном секторе к полюсу в период суббури, нетрудно заключить, что область поглощения расширяется к полюсу в фазе развития и сжимается к экватору в фазе восстановления. На рис. 53а приведен пример такого события по данным меридиональной цепочки канадских риометров [41]. Поглощение началось на станции Валь-д'Ор (гм. широта  $61^\circ$ ) в  $3^{\text{h}}00^{\text{m}}\text{UT}$  15 мая 1964 г. Наблюдалось

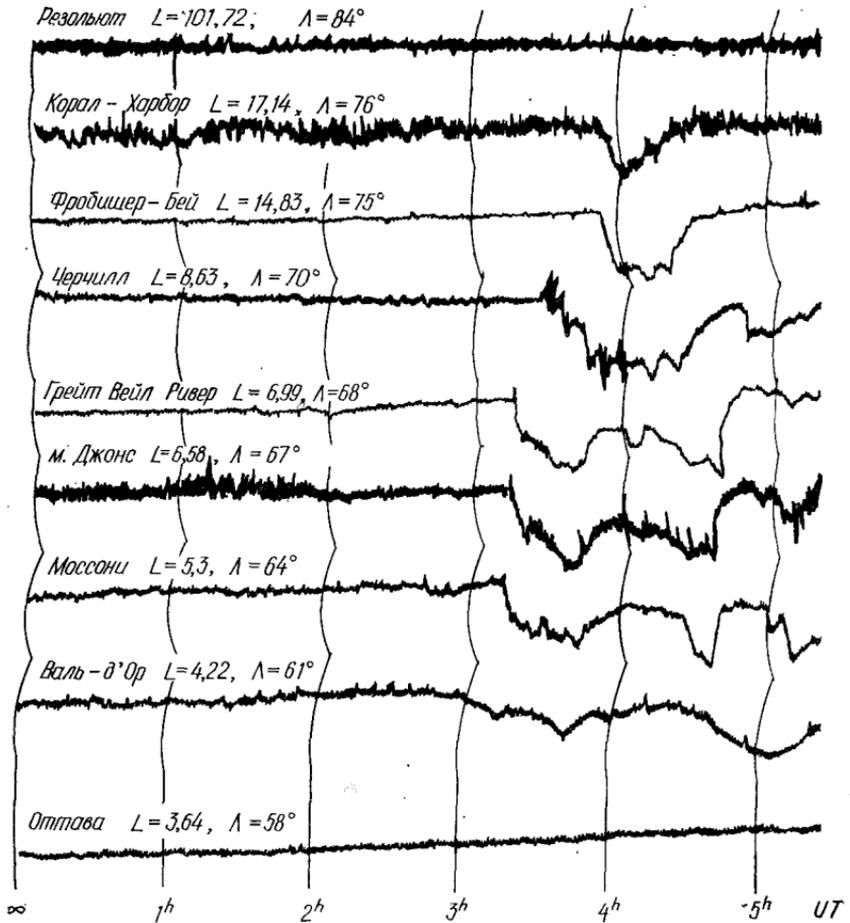


Р и с. 52в. То же, что на рис. 52а, риометрическая запись в Колледже.

систематическое запаздывание начала поглощения на высокоширотных станциях. Движущаяся выпуклость достигла геомагнитной широты  $76^\circ$  к  $3^{\text{h}}50^{\text{m}}$  UT, т. е. через 50 мин после начала. Ряд аналогичных случаев недавно изучила Джелли [40], а также Дриацкий [19], который использовал риометрические записи на станциях о. Диксон, о. Хейса и Северный Полюс-10.

Другой существенной особенностью данных, приведенных на рис. 53а, является явное указание на уменьшение интенсивности поглощения между геомагнитными широтами  $61^\circ$  и  $68^\circ$  немного позже  $3^{\text{h}}40^{\text{m}}$  UT. Это указывает на то, что область наиболее интенсивного вторжения частиц располагалась вблизи фронта выпуклости. Необходимо исследовать аналогичным образом много других случаев, чтобы определить распределение вторгающихся энергичных электронов в районе выпуклости. Данные, приведенные на рис. 53, представляют прекрасный пример настоятельной необходимости использования меридиональной цепочки станций для изучения явлений в полярной верхней атмосфере. Дальнейший прогресс в исследовании полярной верхней атмосферы зависит в большой степени от целесообразного распределения станций.

На рис. 53б приведен другой пример расширения области поглощения, наблюдаемый на канадской меридиональной цепочке риометров 26 сентября 1963 г. [49]. Начало поглощения типа *N* хорошо заметно около  $3^{\text{h}}47^{\text{m}}$  UT на м. Джонс (гм. широта  $67^\circ$ ).

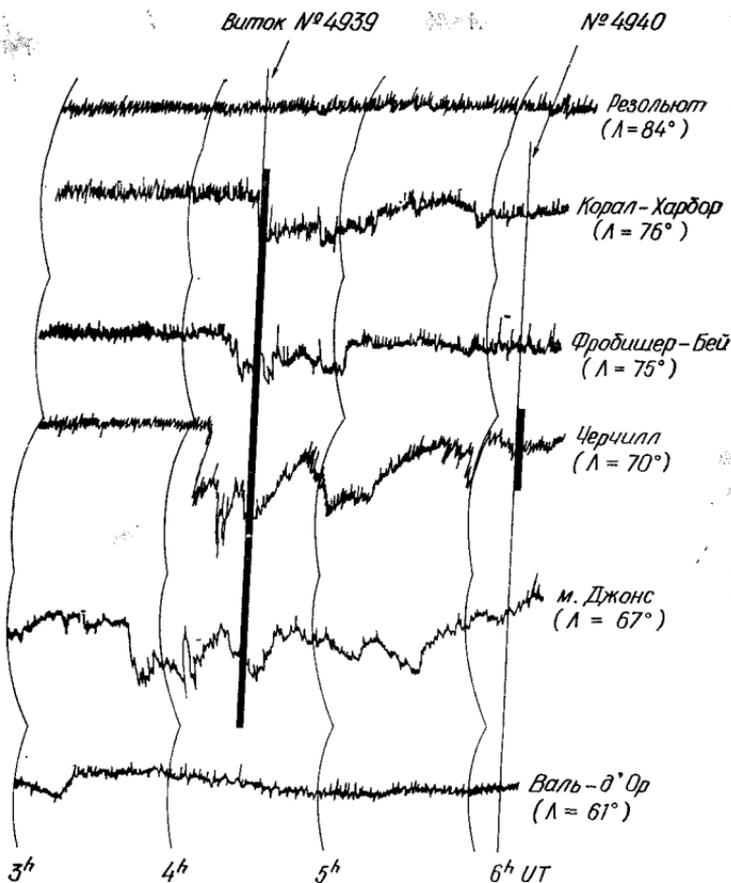


Р и с. 53а. Распространение к полюсу области с поглощением типа  $N$ , зарегистрированное на меридиональной цепочке канадских риометров 15 мая 1964 г. [41].

Область с аномально повышенным поглощением расширяется постепенно к полюсу и достигает Корал-Харбора (гм. широта  $76^\circ$ ) несколько ранее  $4^{\text{h}}30^{\text{m}}$  UT. Спутник «Алуэтт-1» пролетал над Канадой в период суббури и зарегистрировал необычайно высокий поток энергичных электронов ( $>40$  кэВ), подтверждающий расширение к полюсу области вторжения частиц.

#### 4. 5. Поглощение типа $E$

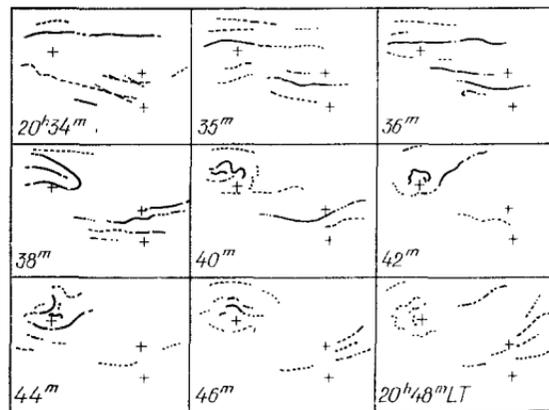
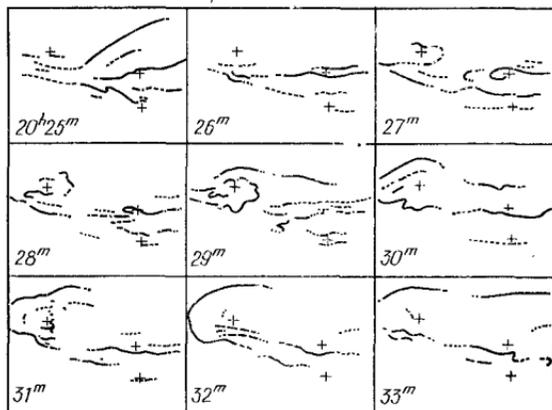
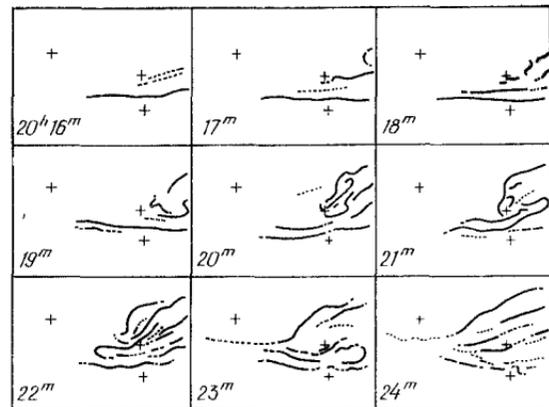
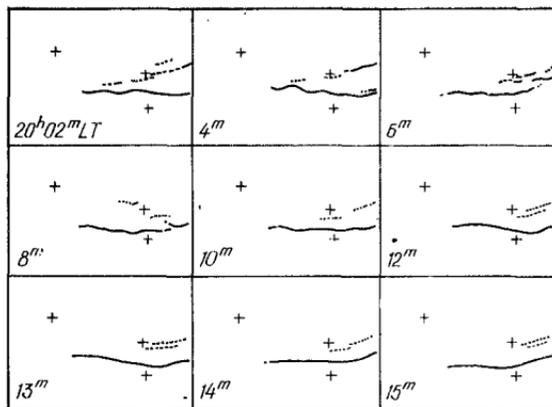
Поглощение типа  $E$  связано с движущимся к западу изгибом. Небольшая продолжительность поглощения этого типа частично обусловлена сильной концентрацией вторгшихся электронов около центральной области изгиба, которая перемещается со скоростью



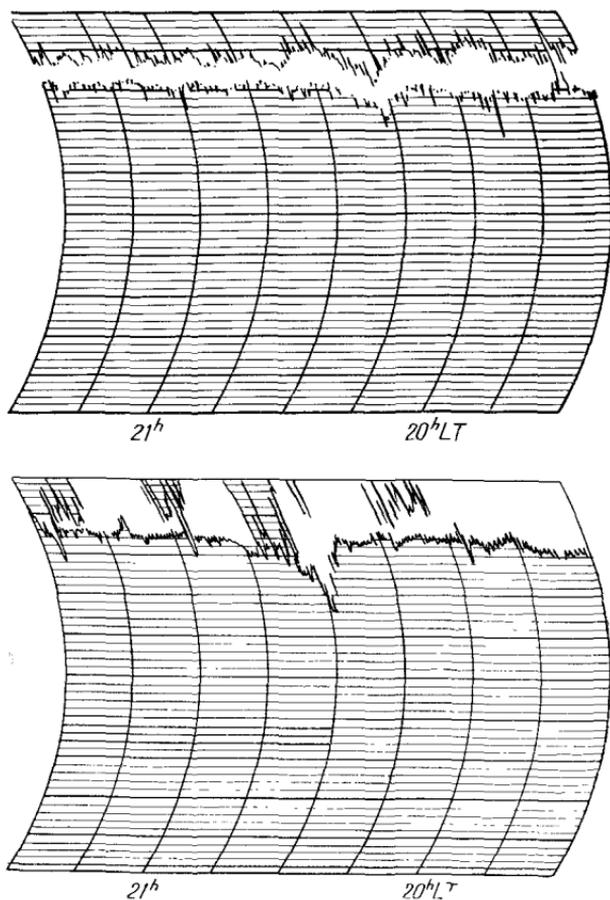
Р и с. 536. Распространение к полюсу области с поглощением типа  $N$ , зарегистрированное на меридиональной цепочке канадских риометров 26 сентября 1963 г. указаны номера витков спутника «Алуэтт-1» [49].

около 1 км/сек. Однако сложность структуры изгиба вряд ли позволяет считать, что это единственная причина кратковременности усиления поглощения. Поглощение менее интенсивно, чем в случае типа  $N$ , хотя яркий изгиб может покрывать значительную часть небосвода. Возможно, это объясняется очень «мягким» спектром электронов в изгибе, так что большая часть их тормозится на высоте  $>100$  км, генерируя интенсивное свечение, но вызывая лишь незначительное поглощение. Берки [9] отметил, что в некоторых случаях незначительное поглощение сопровождается яркими сияниями, покрывающие большую часть небосвода (по его классификации категория  $B$ ).

На рис. 54а и 54б приведен пример интенсивного движущегося к западу изгиба и связанного с ним поглощения в Колледже и Бар-



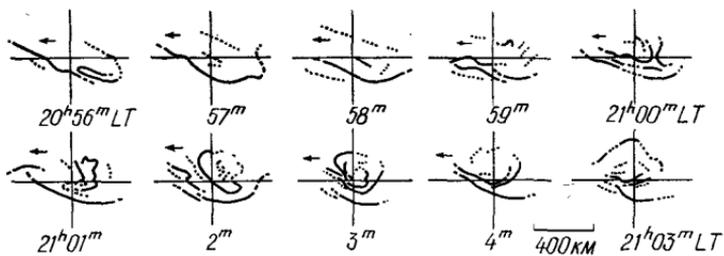
Р и с. 54а. Примеры движущегося к западу изгиба в Колледже и Барроу.



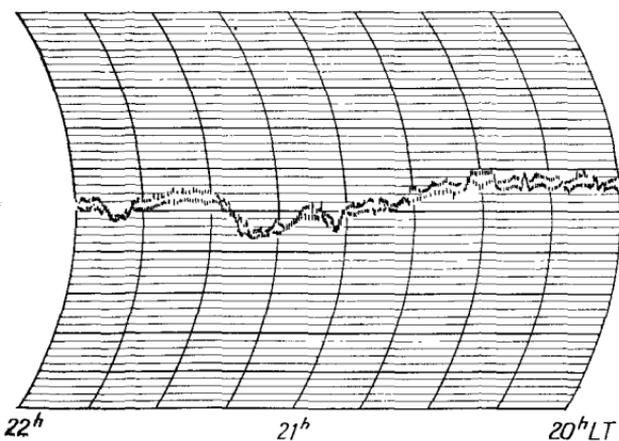
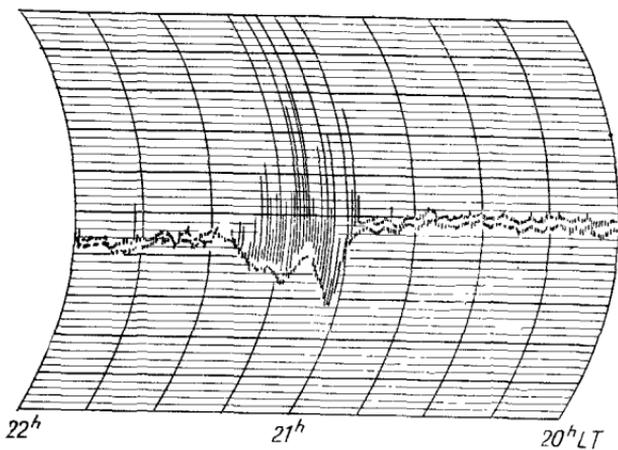
Р и с. 546. Поглощение космического радиоизлучения в Барроу (внизу) и Колледже (вверху) 6 октября 1958 г.

роу. В Колледже поглощение типа *E* зарегистрировано около 20<sup>h</sup>16<sup>m</sup>LT, несколькими минутами раньше изгиб перемещался над фортом Юкон. Изгиб достиг окрестности Барроу около 20<sup>h</sup>27<sup>m</sup>LT, после того как пересек территорию Аляски. В Барроу поглощение типа *E* было зарегистрировано около 20<sup>h</sup>29<sup>m</sup>LT.

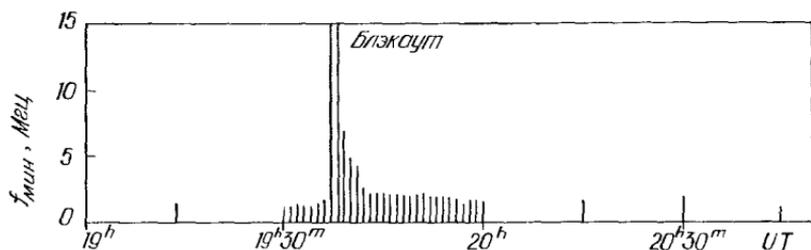
На рис. 55а и 55б приведен другой интенсивный изгиб, который двигался над фортом Юкон 11 февраля 1958 г. Изгиб был связан с крупномасштабным движением сияния против часовой стрелки и был очень ярким. Поглощение типа *E* в форте Юкон достигло максимального значения около 21<sup>h</sup>02<sup>m</sup> или 21<sup>h</sup>03<sup>m</sup>LT. Активность полярных сияний не захватила зенита Колледжа, который расположен в 200 км к югу от форта Юкон, поэтому было зарегистрировано лишь слабое поглощение типа *E*. Несколько примеров поглощения



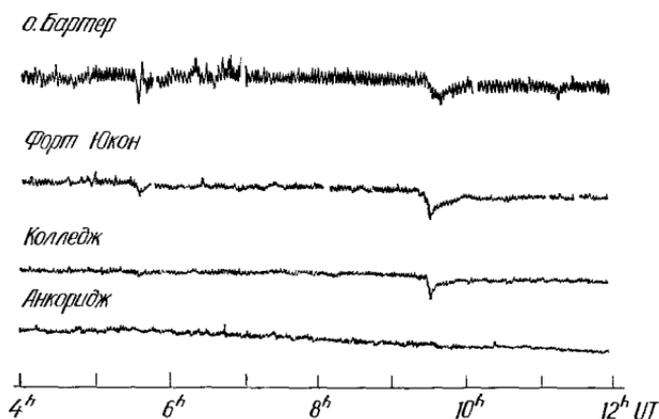
Р и с. 55а. Пример движущегося к западу изгиба в форте Юкон и Колледже 11 февраля 1958 г.; центр креста расположен над фортом Юкон.



Р и с. 55б. Поглощение космического радиоизлучения 11 февраля 1958 г. в форте Юкон (вверху) и Колледже (внизу).

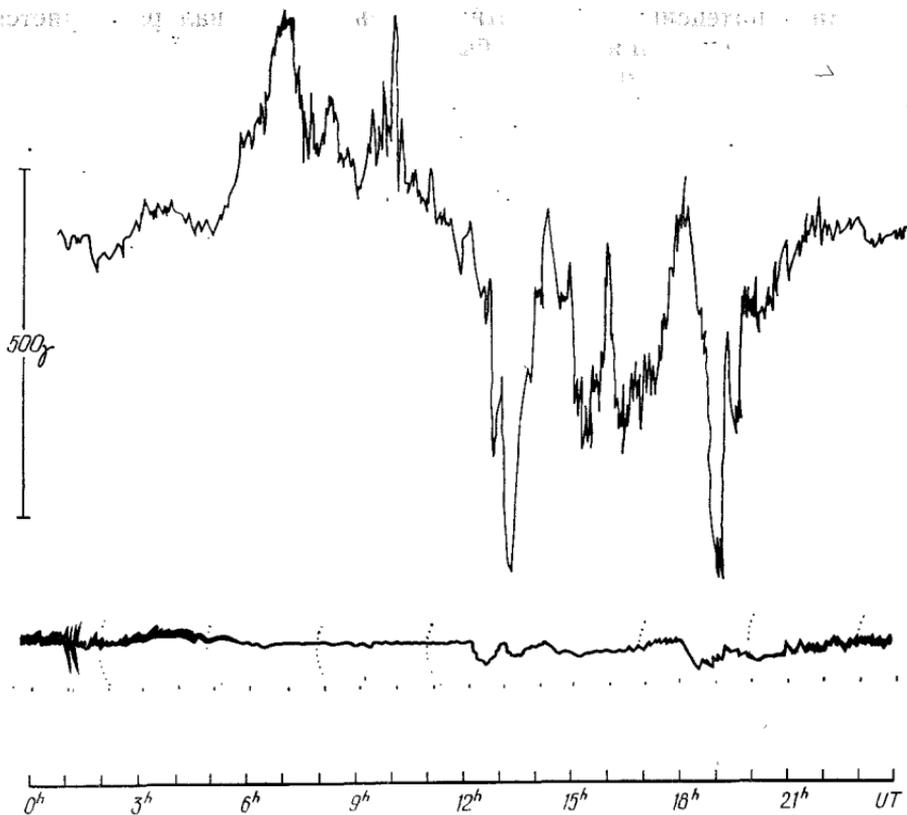


Р и с. 56. Пример движущегося к западу изгиба и связанного с ним поглощения космического радиоизлучения в Мусоие [22].



Р и с. 57. Запись поглощения космического радиоизлучения на меридиональной цепочке ридометрических станций на Аляске 21 января 1967 г. [18].

типа *E* и соответствующих фотографий, полученных камерами полного обзора неба, можно найти в работе [22]. На рис. 56 приведен пример из этого исследования.

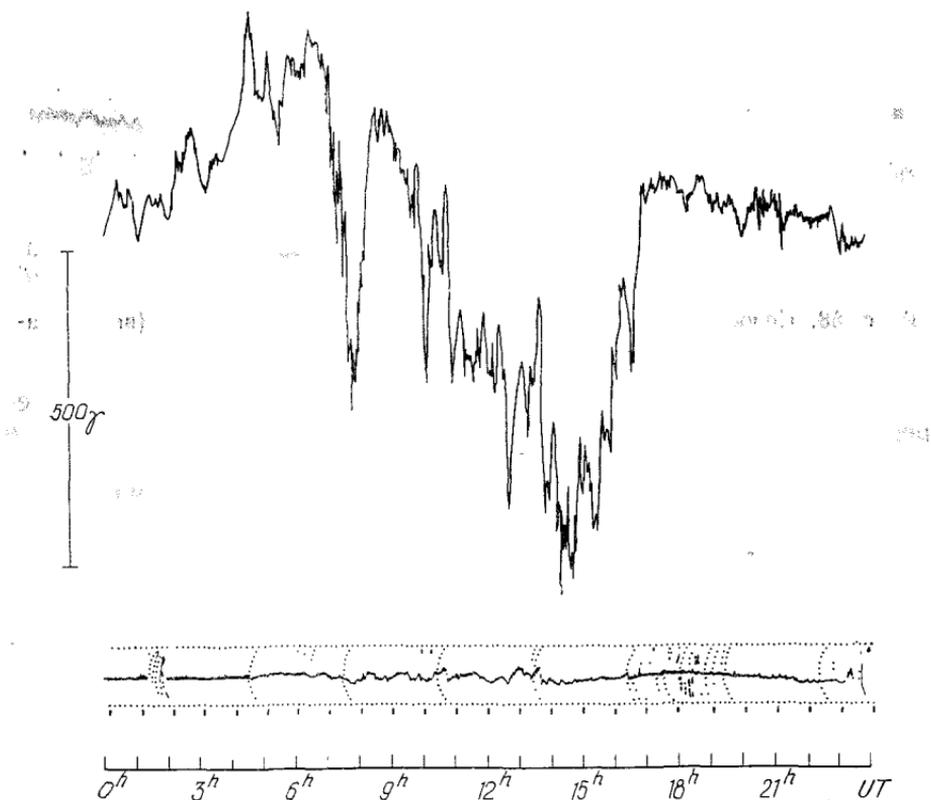


Р и с. 58. Сопоставление магнитных (вверху) и риометрических (внизу) записей в Колледже 23 января 1958 г.

Как указывалось в разд. 2.3, движущийся к западу изгиб перемещается вдоль существовавшей в вечернем секторе дуги, а именно вдоль овала полярных сияний. Поэтому следует ожидать, что поглощение типа *E* в ранние вечерние часы на геомагнитной широте  $70^\circ$  появляется чаще, чем на  $65^\circ$ . Кроме того, из геометрии изгиба можно заключить, что поглощение происходит в довольно узкой полосе вдоль овала и что поглощение, наблюдаемое на геомагнитной широте  $70^\circ$ , может не обнаруживаться на геомагнитной широте  $65^\circ$ . Это и происходит в действительности. На рис. 57 приведены записи, сделанные 21 января 1967 г. [18]. В этот день наблюдались два случая поглощения. Первый был зарегистрирован в  $5^{\text{h}}37^{\text{m}}\text{UT}$  ( $19^{\text{h}}37^{\text{m}}\text{LT}$ ) на о. Бартер (гм. широта  $70^\circ$ ) и в форте Юкон (гм. широта  $67^\circ$ ), но отсутствовал в Колледже (гм. широта  $64,7^\circ$ ) и в Анкоридже (гм. широта  $60^\circ$ ). Второй случай был зарегистрирован в  $9^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT}$  ( $23^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{LT}$ ) на трех высокоширотных станциях (о. Бартер, форт Юкон и Колледж), но отсутствовал в Анкоридже.

В период интенсивных магнитных бурь, когда овал расширяется к экватору, ситуация может быть существенно иной. Если овал спускается до геомагнитной широты  $65^\circ$  в ранние вечерние часы, то спокойное сияние и движущиеся к западу изгибы появляются необычно рано, что приводит к аномально раннему появлению поглощения типа *E*. В таких случаях поглощение типа *N* также имеет тенденцию появляться раньше, чем обычно; это соответствует возмущенным условиям на рис. 28.

Поскольку поглощение типа *E* появляется в вечерние часы, целесообразно проанализировать, связаны ли положительные магнитные бухты с этим типом поглощения, ибо положительные бухты наиболее часто появляются в вечерние часы. Связь между поглощением и положительными бухтами либо отсутствует, либо очень слаба. Это согласуется с результатами статистического исследования, приведенными на рис. 49а. Поглощение минимально в вечерние часы, когда положительные бухты появляются наиболее часто. Как отмечалось в разд. 2.3, положительные



Р и с. 59. Сопоставление магнитных и риометрических записей в Колледже 24 июня 1958 г.

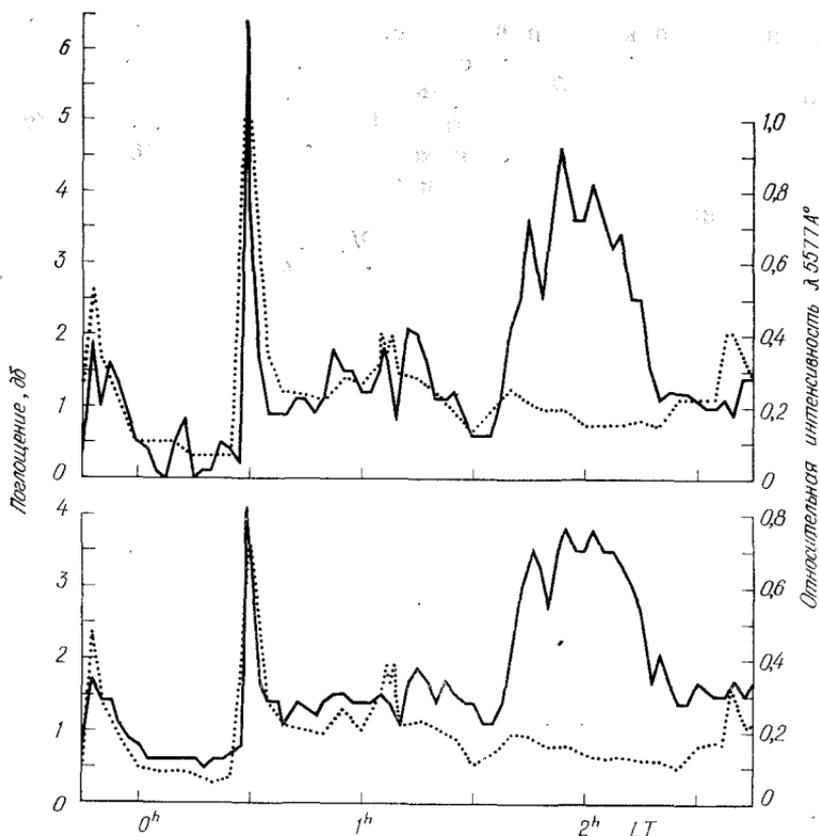
бухты регистрируются при прохождении движущихся к западу изгибов к полюсу от станции зоны полярных сияний, так что слабая корреляция неудивительна. На рис. 58 приведены записи магнитометра и риометра 23 января 1958 г. в Колледже. Зарегистрированы две интенсивные положительные бухты в 6 и 9<sup>h</sup>UT соответственно, но поглощение в это время было очень слабым. Интенсивность поглощения во время этих двух явлений можно сопоставить с поглощением типа *N*, которое началось около 12<sup>h</sup>10<sup>m</sup>UT, и двумя поглощениями типа *M* в 14<sup>h</sup>30<sup>m</sup> и 18<sup>h</sup>00<sup>m</sup>UT. Хотя величина отрицательных бухт, связанных с поглощениями типа *N* и *M*, всего в два раза больше, чем положительных, интенсивность поглощения типов *N* и *M*, связанного с отрицательной бухтой, была значительно больше. Это предполагает существенное различие в природе положительной и отрицательной бухт (разд. 3.1).

Однако если отрицательная магнитная бухта накладывается на положительную, то в этот период имеет место заметное поглощение (разд. 2.3, рис. 28). Отрицательная бухта наблюдается в тех случаях, когда движущийся к западу изгиб проходит немного севернее станции. На рис. 59 приведен такой случай 24 июня 1958 г., когда около 6<sup>h</sup>50<sup>m</sup>UT началось резкое наложение интенсивной отрицательной бухты. До этого события развивалась положительная бухта, но заметное поглощение началось только около 6<sup>h</sup>50<sup>m</sup>UT.

#### 4. 6. Поглощение типа *M*

Связь между поглощением типа *M* и дрейфующими к востоку полосами или пятнами уже отмечалась рядом исследователей [2, 9, 22, 31]. Поглощение типа *M* характеризуется не только довольно плавным началом, но также отсутствием одновременного взрывообразного усиления яркости полярного сияния. На рис. 60 приведен хороший пример различия поглощений типов *N* и *M* [2]. В верхней части рисунка изображены интенсивность поглощения космического радиоизлучения и интенсивность излучения в линии  $\lambda 5577\text{\AA}$  в направлении 12° к югу от зенита, а в нижней — в направлении 12° к северу от зенита. Приведены два случая поглощения, начинающиеся соответственно в 0<sup>h</sup>25<sup>m</sup> и 1<sup>h</sup>35<sup>m</sup>LT. Первый случай поглощения имеет резкое начало и, несомненно, относится к типу *N*; интенсивность излучения в  $\lambda 5577\text{\AA}$  также резко возрастает. Начало второго случая поглощения постепенное; усиление интенсивности излучения в  $\lambda 5577\text{\AA}$  очень невелико.

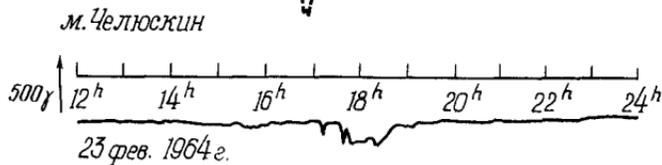
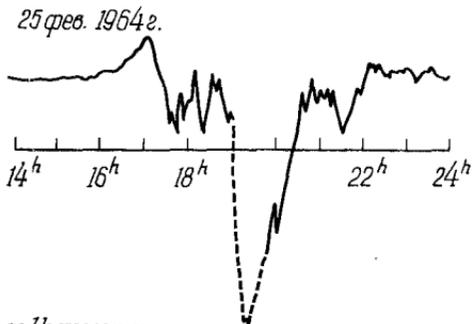
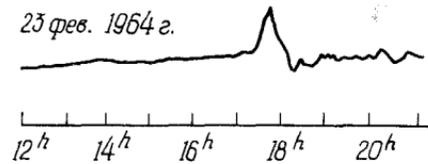
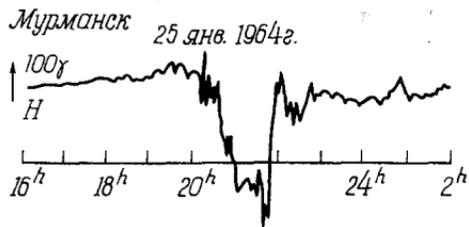
Одно из возможных объяснений различия между поглощениями типов *E* или *N* и типа *M* состоит в том, что поглощение типа *M* обусловлено вторжением более жестких электронов, чем поглощение типа *E* или *N* [2]. Поскольку жесткие электроны проникают глубже в атмосферу, поглощение будет больше для одинаковых значений  $J_0$ , а результирующее свечение будет меньше (вследствие более



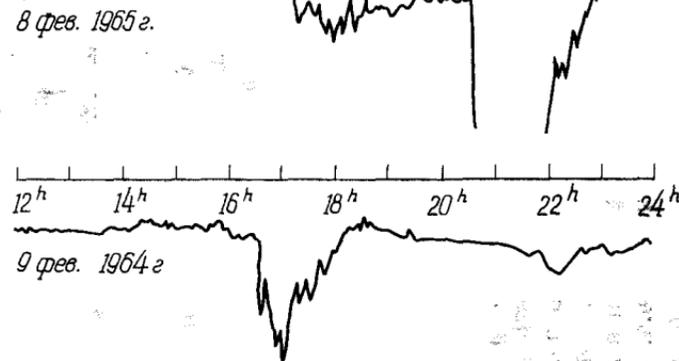
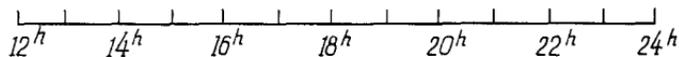
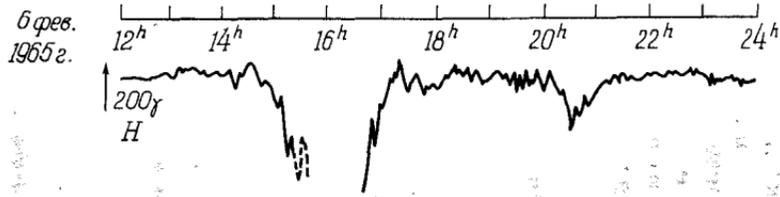
Р и с. 60. Сопоставление поглощения космического радиоизлучения (сплошная линия) и интенсивность эмиссии в  $\lambda 5577\text{\AA}$  (пунктирная линия) для поглощения типов  $N$  и  $M$  [2].

эффективной дезактивации возбужденных атомов кислорода). Например, согласно данным, приведенным на рис. 45, при  $J_0 = 10^5$  электрон/см<sup>2</sup>·сек·стер, поглощение составит 0,3 и 3 дБ для  $E_0 = 20$  кэВ и  $E_0 = 100$  кэВ соответственно. Существуют различные точки зрения на вариации энергетического спектра вторгающихся электронов. Иохансен [42] не наблюдал существенных изменений отношения интенсивностей свечения и поглощения и сделал вывод, что спектр электронов меняется незначительно от вечерних к утренним часам. Изер и Джака [22] вначале предполагали, что вклад в поглощение дают протоны, но впоследствии они стали поддерживать выводы Ансари. Эта проблема будет рассмотрена в следующей главе.

Как отмечалось в разд. 4.3 и 4.4, поглощение типа  $M$  появляется не только в ранние утренние часы, когда одновременно можно на-



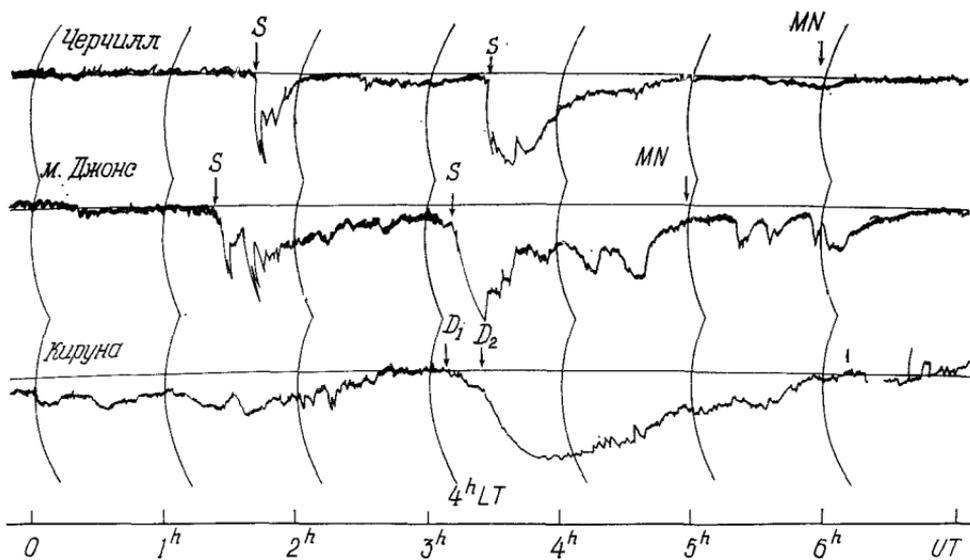
о. Диксон



Р и с. 61. Магнитограммы обсерваторий, расположенных в полуденном секторе, в периоды, которые соответствуют утренним поглощениям типа M на рис. 476.

блюдают активность полярных сияний, но также в поздние утренние, в полуденные или даже в ранние послеполуденные часы. Действительно, статистические исследования, результаты которых изложены в разд. 4.4, показали, что поглощение типа *M* наиболее интенсивно в поздние утренние часы и часто охватывает полуденный сектор. Поскольку такие случаи позднего появления поглощения типа *M* нельзя исследовать одновременно с активизацией полярных сияний и поскольку они не всегда коррелируют с магнитной активностью, их иногда рассматривают независимо от типа *M*, появляющегося в ранние утренние часы [3, 10, 13, 24].

Отсутствие хорошей корреляции на станциях зоны сияний между поглощением типа *M* в поздние утренние часы и магнитной активностью обусловлено частично тем, что электроструя течет вдоль овала полярных сияний (и, следовательно, в поздние утренние часы станция зоны сияний расположена к экватору от овала), а частично тем, что поглощение типа *M* наиболее интенсивно вдоль зоны полярных сияний (см. рис. 49а). Нетрудно показать, что поглощение типа *M* в поздние утренние часы связано с развитием



Р и с . 62. Сопоставление одновременного поглощения космического радиоизлучения в полуночном и утреннем секторах 3 апреля 1964 г. [41]

типичной полярной суббури в полуночном секторе (а именно взрывообразным движением сияний, резким началом отрицательных бухт и началом поглощения типа *M*). На рис. 61 приведены магнитограммы ряда обсерваторий в периоды, которые соответствуют появлению поглощений типа *M* в поздние утренние часы на рис. 47б.

Видно, что каждая суббуря связана с отрицательной бухтой в полуночном секторе.

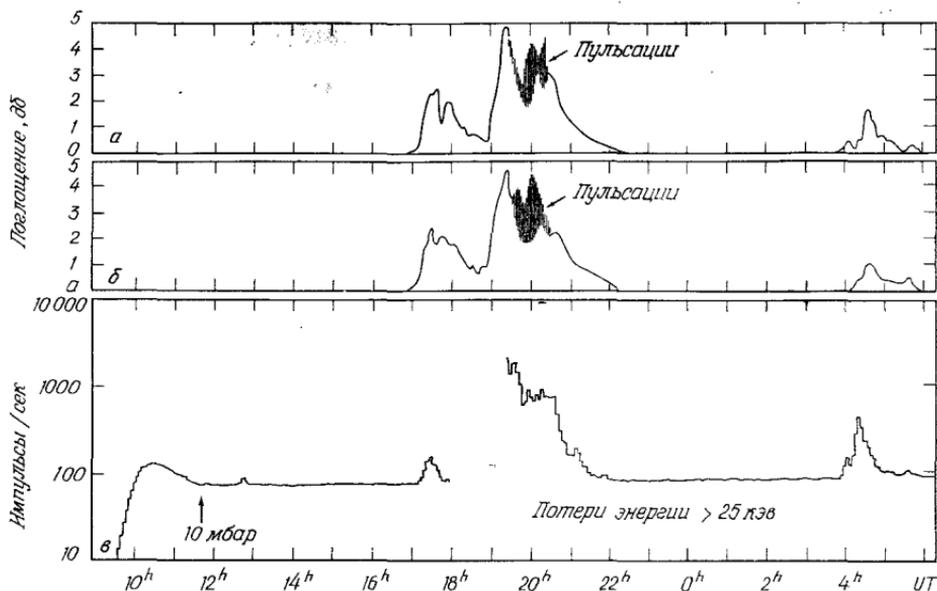
Анализом развития поглощений типа  $M$  в поздние утренние часы в зависимости от времени протекания суббури  $T$  занимался ряд исследователей [10, 24, 41].

Используя записи двух канадских риометров и риометра в Кируне, Джелли и Брайс [41] показали, что поглощение типа  $N$  в Канаде (полуночный сектор) связано с поглощением типа  $M$  в поздние утренние часы в Кируне. На рис. 62 приведены типичные записи риометров, заимствованные из их статьи. Первый случай поглощения, который начался около  $1^{\text{h}}30^{\text{m}}$  UT на двух канадских станциях, был определенно типа  $E$  и проявился только в виде слабого поглощения в Кируне. Второй случай, начавшийся несколько позже  $3^{\text{h}}$  UT в Канаде, был, несомненно, связан с поглощением типа  $M$  в Кируне. Существуют по крайней мере две проблемы при определении точной временной взаимосвязи между ними. Во-первых, поскольку расширение к полюсу поглощающей области происходит не мгновенно, существует ошибка в определении момента начала поглощения типа  $N$  в полуночном секторе. Например, если использовать для этой цели только записи обсерватории Черчилл, то, согласно данным, приведенным на рис. 62, возникает ошибка примерно в 10 мин. Во-вторых, вследствие природы поглощения типа  $M$  его начало не всегда хорошо выражено. Джелли и Брайс [41] показали, что во многих случаях существует двойное начало. На рис. 62 поглощение в Кируне начинается в момент времени, обозначенный  $D_1$ , а в момент  $D_2$  происходит внезапное усиление интенсивности. Было найдено, что в 14 из 22 случаев  $D_1$  в Кируне приходится на более поздний или на тот же момент, что и начало поглощения на двух канадских станциях. В шести случаях  $D_1$  опережает начало поглощения на канадских станциях, а в двух случаях как  $D_1$ , так и  $D_2$  опережают начало суббури на канадских станциях.

Бьюэрсдорф и др. [10] провели ценное исследование поглощений типа  $M$  в поздние утренние часы по магнитограммам нескольких станций зоны сияний и записям риометров. Они пришли к заключению, что поглощения типа  $M$  в поздние утренние часы связаны с отрицательной магнитной бухтой или поглощением типа  $N$  в околополуночном секторе. Недавно Бьюэрсдорф и др. [11] показали, что поглощение типа  $M$  начинается к северу от  $L=6,5$  и распространяется к югу по крайней мере до  $L \approx 4,5$  со скоростью около 500 м/сек.

#### 4. 7. Поглощение космического радиоизлучения в геомагнитносопряженных областях

Результаты исследований поглощения космического радиоизлучения в геомагнитносопряженных областях приведены в [14,



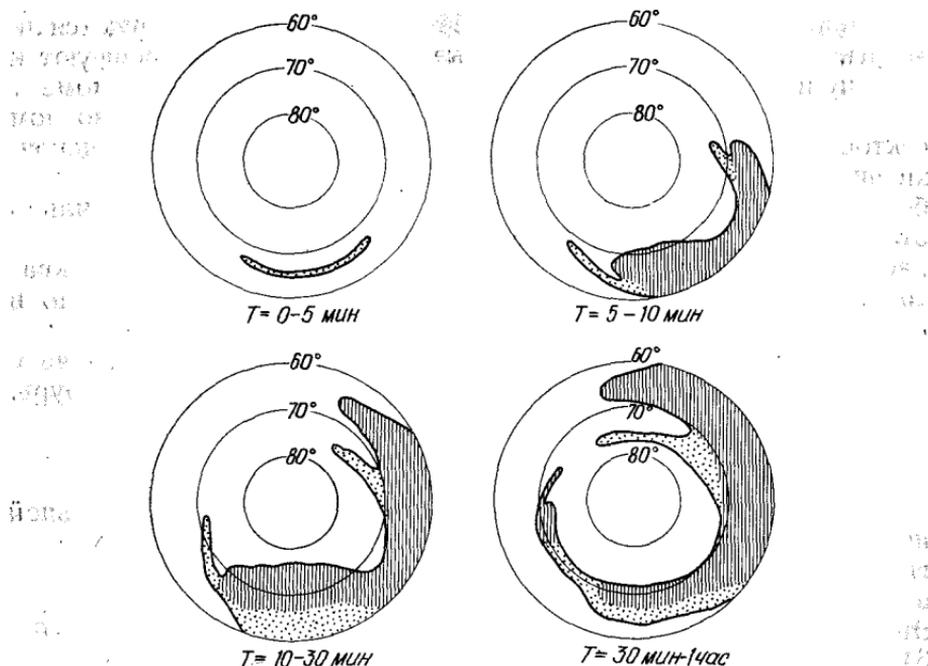
Р и с. 63. Одновременное поглощение космического радиоизлучения в геомагнитносопряженных областях Коцебу и о. Маккуори [14]. *а* — Коцебу; *б* — о. Маккуори; *в* — о. Маккуори; полет 17 с; 25—26 февраля 1964 г.

15, 28, 48]. На рис. 63 приведен пример одновременных ригметрических записей в Коцебу (Аляска) и на о. Маккуори [14], расположенных в зоне полярных сияний. Степень сопряженности уменьшается с увеличением широты на геомагнитных широтах более  $70^\circ$ . Причина этого уменьшения аналогична рассмотренной в разд. 3.5.

#### 4. 8. Развитие ионосферной суббури (поглощение)

В этом разделе предпринята попытка описать развитие и затухание ионосферной суббури (поглощение) на основе данных, приведенных в предыдущих разделах, и изучения развития суббури, изложенного в гл. 2.

На рис. 64 приведены изменения области поглощения в период отдельной суббури. Предполагается, что на ранней стадии развития суббури поглощение ограничено узкой областью, в которой наблюдается первое проявление суббури в полярных сияниях (внезапное увеличение яркости дуги). В фазе развития суббури область поглощения расширяется во всех направлениях. Расширение к полюсу обусловлено движением в этом направлении выпуклости в полярных сияниях. Расширение к западу связано с перемещающимся к западу изгибом. Поглощение интенсивно только



Р и с. 64. Развитие ионосферной суббури (поглощение).

при появлении сияний типа *B* (так называемое сияние с красным нижним краем). В утреннем секторе область поглощения охватывает как овал, так и зону полярных сияний. Расширение области поглощения вдоль овала следует из данных о полярных блэкаутах [59] (см. разд. 1.4). Полярные блэкауты указывают на полное поглощение радиоволн, излучаемых станцией вертикального зондирования. При блэкауте на ионограммах исчезают все следы радиоотражений. Однако поглощение вдоль овала не очень велико, так как ни одно статистическое исследование при помощи риометров не обнаружило такой области. Следует отметить, что данные вертикального зондирования более чувствительны к изменению поглощения, чем риометрические данные.

Другая область, простирающаяся вдоль зоны полярных сияний, проявляется поглощением типа *M*. Харгривс [27] нашел, что область с аномальным поглощением расширяется от полуночного меридиана: она движется к востоку между 0 и 14<sup>h</sup>LT и к западу между 0 и 14<sup>h</sup>LT; типичная скорость составляет 4° в 1 мин по долготе, или 3,7 км/сек.

Большая неопределенность содержится в определении скорости расширения поглощения типа *M* к утренним часам, хотя эти дан-

ные являются основными для ответа на вопрос, генерируются ли энергичные электроны (50—100 кэВ) локально или дрейфуют к востоку из полуночного сектора. Чтобы точно определить момент начала поглощения относительно начала суббури в полуночном секторе, необходимы по крайней мере две меридиональные цепочки риометрических станций, разделенные по долготе на  $90^\circ$  или более. Это обусловлено тем, что время начала поглощения сильно отличается в одном и том же секторе; в полуночном секторе область поглощения расширяется к полюсу, а в утреннем — к экватору. Происхождение этих электронов будет рассмотрено в разд. 9.1.

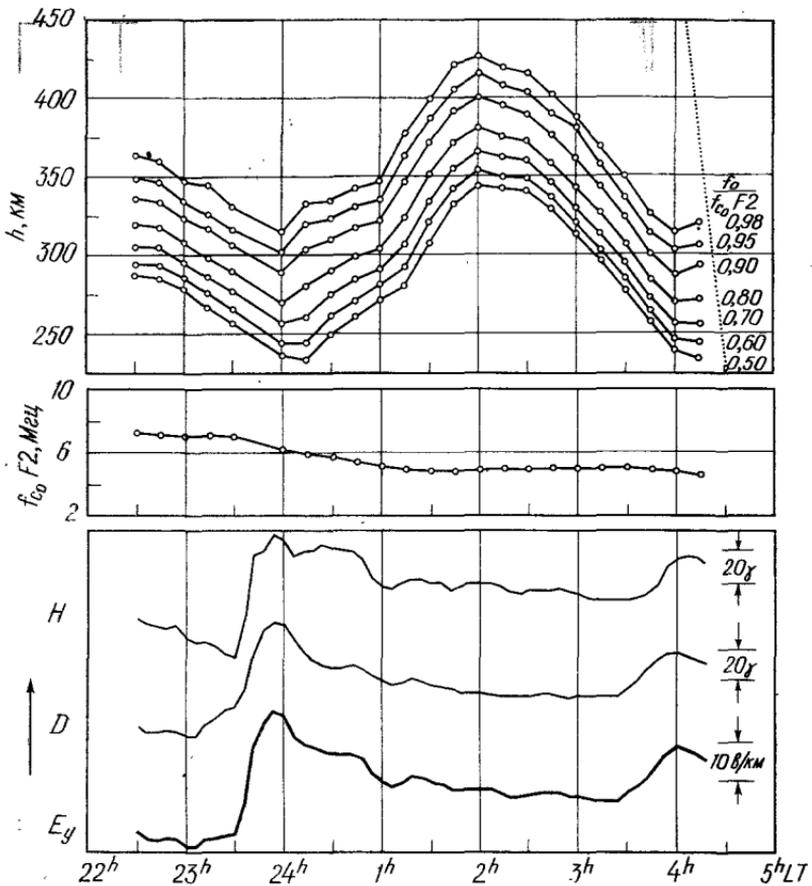
При дальнейших исследованиях очень существенно изучить синоптическое развитие поглощения в период отдельных суббурь.

#### 4.9. Деформация ионосферы

Нет сомнений, что, помимо рассмотренной выше аномальной ионизации, в нижней ионосфере в период суббурь происходят другие изменения. Хорошо известно, что распределение ионизации в ионосфере значительно искажается в период геомагнитных бурь. Это явление изучалось рядом исследователей [44, 53, 54, 56, 62, 64]. По крайней мере две трудности связаны с изучением ионосферных возмущений. Во-первых, прямое использование данных вертикального ионосферного зондирования затруднительно для сильно возмущенной ионосферы, так как весьма трудно получить истинные профили распределения концентрации электронов. Во-вторых, ионозонд на поверхности Земли не дает сведений о верхней части ионосферы. Кроме того, наиболее часто используемые параметры, такие, как  $f_oF_2$  (критическая частота области  $F_2$ ) или действующая высота, не обязательно являются наилучшими параметрами, характеризующими возмущенные условия в ионосфере. В последнее время проводилось зондирование сверху ионозондами, установленными на спутниках, для исследований изменений в ионосфере выше максимума области  $F_2$  [8, 32, 65].

В разд. 1.3. указывалось, что главная фаза геомагнитных бурь является периодом частого появления интенсивных полярных суббурь. Поэтому имеет смысл исследовать вначале поведение ионосферы в период полярной суббури.

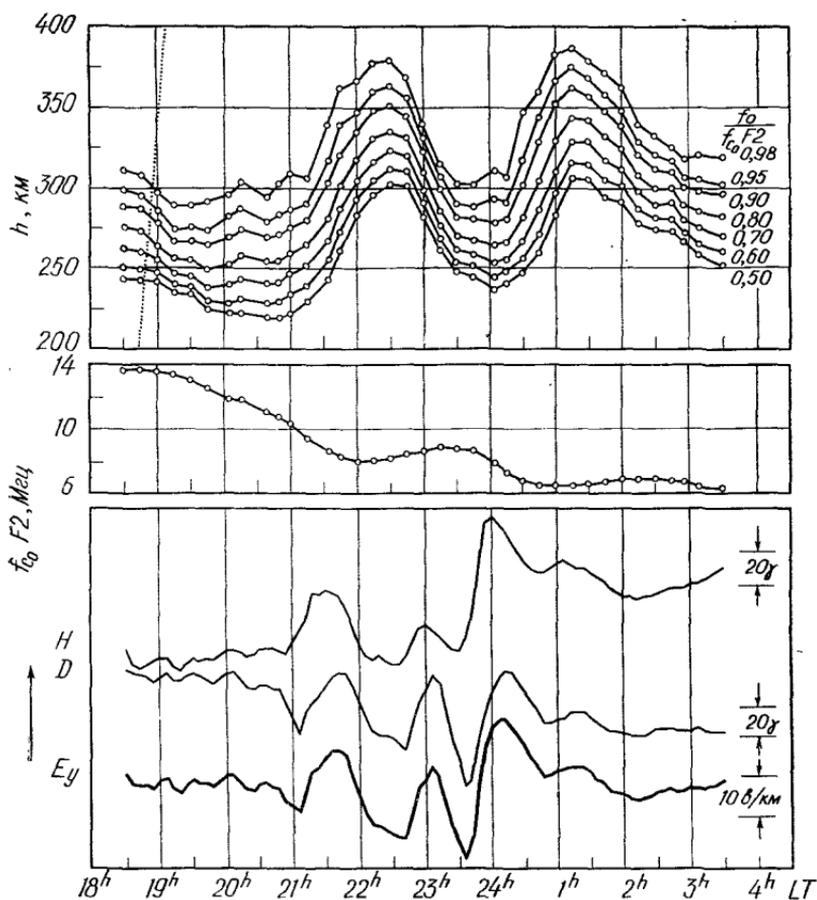
К сожалению, проводилось очень немного исследований вариаций ионосферы в период полярных суббурь [44—46, 52, 61]. В этом разделе будет кратко рассмотрено исследование Рестера [61]. На рис. 65 приведен пример ионосферных возмущений, связанных с полярной магнитной суббурей. В верхней части рисунка нанесены вычисленные истинные высоты как изолинии постоянного значения отношения  $f_o/f_{c_o} \cdot F_2$ ;  $f_{c_o} = F_2$  — обычная критическая частота. В центре приведены значения  $f_{c_o} F_2$ , а в нижней части — три компоненты вариации магнитного поля (детальное описание



Р и с. 65. Ионосферные возмущения в период полярной магнитной суббури [61]; Цумеб, 25—26 сентября 1958 г. Пунктирная линия — время восхода Солнца.

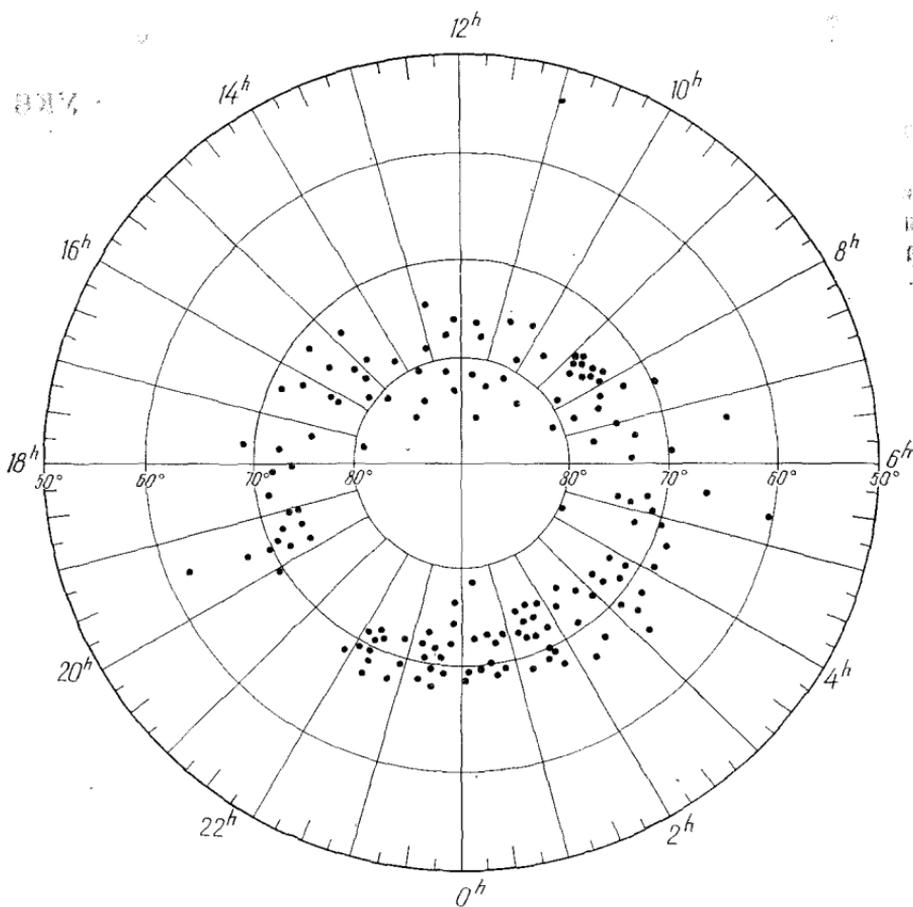
поля полярной суббури в средних и низких широтах см. в гл. 3). Интенсивная полярная суббури началась в  $22^{\text{h}}30^{\text{m}}$ LT, когда слой  $F2$  двигался вниз. Движение вверх началось через 10 мин после периода максимума развития суббури. Движение вверх продолжалось до конца полярной суббури. Затем слой  $F2$  начал двигаться вниз.

На рис. 66 приведен другой пример последовательного появления двух полярных суббурь. Первая суббури началась около  $20^{\text{h}}50^{\text{m}}$ LT; слой начал подниматься в  $21^{\text{h}}00^{\text{m}}$ LT и достиг максимальной высоты перед концом суббури. Вторая интенсивная суббури началась в  $23^{\text{h}}35^{\text{m}}$ LT и также сопровождалась движением ионизации вверх. Основываясь на исследовании Мартина [53], Рестер [61] предположил, что движение ионизации вверх обусловлено электри-



Р и с. 66. Ионосферные возмущения в период двух последовательных полярных магнитных суббурь [61]; Цумеб, 3—4 октября 1959 г. Пунктирная линия — время захода Солнца.

ческим полем (дрейфом в направлении  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ), которое генерирует одновременно ионосферный ток и наблюдаемое поле полярной суббури. Он показал, что вычисленные вариации высоты (основанные на электрическом поле, полученном из наблюдаемых на поверхности Земли магнитных вариаций) и наблюдаемые вариации высоты качественно согласуются. Как отмечалось в гл. 3, разделение полей, генерируемых ионосферными и внеионосферными токовыми системами, может быть первым шагом к пониманию процессов, связанных с магнитосферными суббуриями. В этой связи очень важно определить планетарное поведение ионосферы в период одиночных полярных суббурь. Тогда можно будет получить распределение электрического поля, связанного с магнитосферной суббурей.



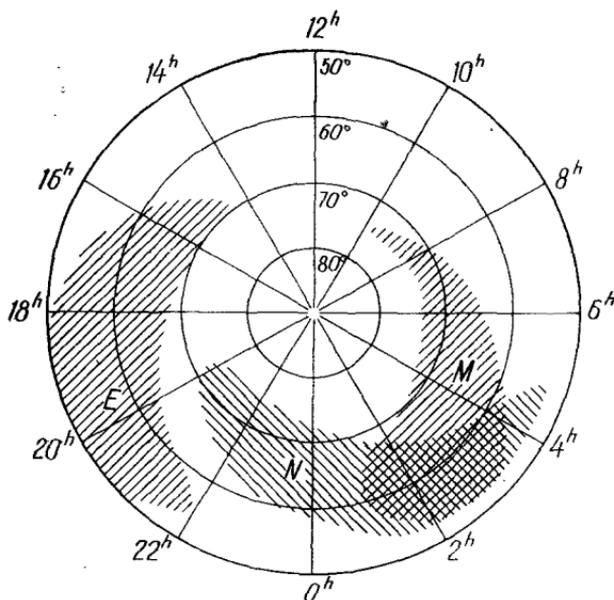
Р и с. 67. Распределение диффузных  $F$ -отражений, наблюдаемых спутником «Алуэтт-1», в координатах геомагнитная широта — местное время [58].

Другим проявлением деформации ионосферы является регистрация на ионограммах диффузных радиоотражений от области  $F$  — так называемый *диффузный слой  $F$* . Природа диффузного слоя  $F$  и его связь с полярными сияниями и магнитной активностью широко обсуждалась. Исключив эффект поглощения, обусловленный ионизацией нижней ионосферы, Шимазаки [63] установил, что диффузный слой  $F$  положительно коррелирует с полярными сияниями, хотя он, по-видимому, существует даже в периоды слабой активности полярных сияний. На рис. 67 приведено распределение диффузного слоя  $F$  в полярной проекции в спокойные периоды ( $K_p < 2$ ) [58]. Очевидно, диффузный слой  $F$  появляется вдоль овала полярных сияний в спокойный период.

## 4. 10. Радиосияния

Изучению полярных сияний радиометодами в диапазоне УКВ посвящена обширная литература (см. обзор [1]).

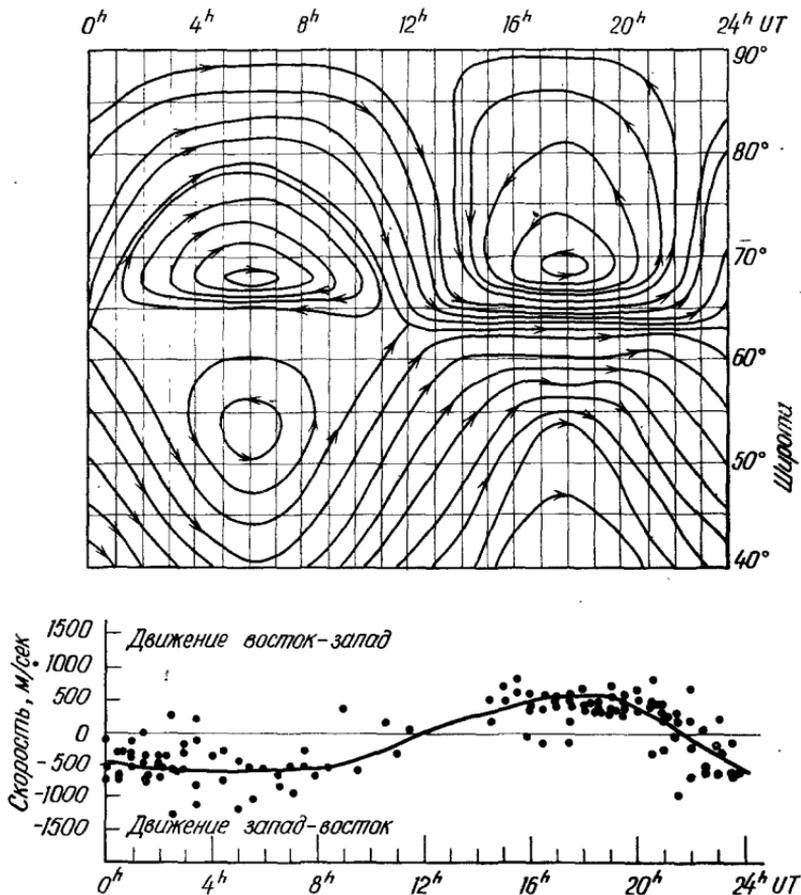
Багаряцкий и Фельдштейн первыми исследовали в деталях взаимосвязь между радиоотражениями от полярных сияний и полярными магнитными возмущениями. Они обнаружили, что области появления отражений совпадают с положением М-, N- и А-спиралей\*.



Р и с . 68. Распределение трех типов радиосияний в координатах геомагнитная широта — местное геомагнитное время [66].

На основе наблюдений радиоотражений на частоте 55 Мгц в Новой Зеландии Анвин [66] показал, что радиосияния можно связать с тремя отдельными спиральями: Е (вечерней), N (ночной) и М (утренней) (рис. 68). Оказалось, что диффузные отражения связаны преимущественно с Е-спиралью, а структурные диффузные

\* Этот абзац включен автором после ознакомления с работой Б. А. Багаряцкого и Я. И. Фельдштейна «Особенности авроральных отражений и связь их с постоянным магнитным полем и ионосферными токами», изд-во «Наука», 1965, стр. 1—60, фиг. 19. — Прим. ред.



Р и с. 69. Скорость дрейфа ионосферных электронов, июль 1960 г. Вверху—SD-токовая система по Чепмену и Бартельсу [47].

отражения и короткоживущие дискретные отражения с M-спиралью [66]. Отражения всех типов существуют от 1 до 3 час, что совпадает с временем жизни полярных суббурь, т. е. радиосияния должны быть одним из проявлений магнитосферной суббури. Радиосияния появляются вдоль овальной полосы, которая хорошо совпадает с овалом полярных сияний в отдельных случаях [6, 7].

Радиолокационные исследования сияний имеют по крайней мере два весьма существенных приложения, важных для понимания распределения электрического поля в период полярных суббурь.

Надежно установлено, что доплеровское смещение радиоотражений можно использовать для определения скорости дрейфа ионо-

сферных электронов в полярном сиянии. На рис. 69 приведена скорость дрейфа ионосферных электронов, определенная на основании доплеровского спектра на частоте 401 МГц в Фрейзерберге (Шотландия), и  $SD$ -токовая система [47]. Обоснованность  $SD$ -токовой системы уже рассматривалась в гл. 2 и 3. Из этого рассмотрения следует, что средняя кривая на рис. 69 получена на основе наблюдений вдоль зоны полярных сияний, а не вдоль овала.

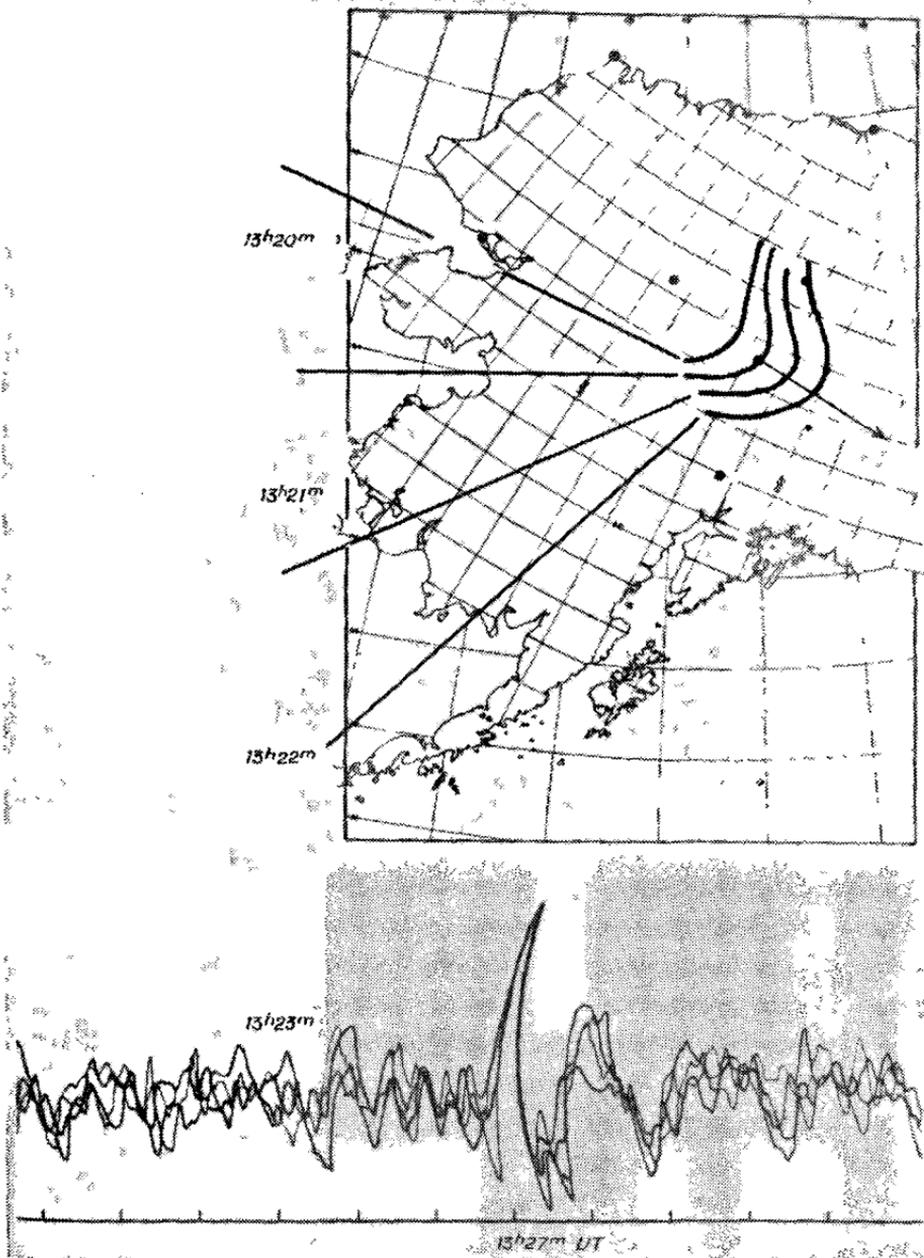
Поскольку радиолокационный метод полезен для определения скорости дрейфа ионосферных электронов, он может стать мощным инструментом для получения распределения движений ионосферных электронов во всей полярной шапке. Полученные таким образом данные позволят определить распределение электрического поля, так как дрейфовое движение является движением в скрещенных электрическом и магнитном полях  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ .

Фарли [23] предположил, что если скорость дрейфа электронов превосходит некоторую критическую величину, то в ионосфере развивается неустойчивость, которая имеет форму плоских волн, перемещающихся перпендикулярно направлению локального магнитного поля со скоростью, близкой к тепловой скорости ионов. Его теория была с успехом применена к экваториальной ионосфере, где радиолокатор обнаружил неустойчивости. Анвин и Кнокс [67] исследовали возможность образования радиосияний вследствие аналогичной неустойчивости, генерируемой дрейфовым движением электронов, которые связаны с полярной электроструей. Они пришли к выводу, что диффузные отражения в вечернем секторе (в районе восточного тока) формируются в области, в которой имеет место описанная Фарли неустойчивость, но дискретные типы радиотражений обусловлены вторжением энергичных частиц. В разд. 4.5 отмечалось, что положительные бухты не связаны с заметным поглощением, так что описанную Фарли неустойчивость легко наблюдать. Однако радиотражения могут вызываться различными процессами, происходящими при вторжениях электронов, и неустойчивость Фарли может быть замаскирована этими процессами. Это согласуется с выводом гл. 2 и разд. 4.5, что восточный ток, который вызывает положительные бухты, существенно отличен по природе от полярной электроструи, которая течет к западу вдоль овала полярных сияний.

## 4. 11. Суббурия в атмосферной волне

### 4. 11. 1. Перемещающиеся возмущения

Горизонтальные перемещающиеся возмущения в ионосфере (разд. 1.2) обнаружил Мунро [55], а их возможную причину рассмотрел Мартин [53]. Это явление исследовалось неоднократно



Р и с. 70. Инфразвуковые волны и соответствующие движения сияний 7 января 1967 г. [69].



Р и с. 71. То же, что на рис. 70, 23 февраля 1966 г

с использованием различной радиоаппаратуры. Чен и Виллард [17] проанализировали предыдущие исследования и сопоставили их со своими. Они отметили, что четыре случая из девяти произошли несколько часов спустя после внезапного начала бури. Если эти два явления взаимосвязаны, то возникает вопрос, как именно они связаны и почему некоторым из них не предшествует внезапное начало бури. Согласно [12], после внезапного начала бури горизонтальные перемещающиеся возмущения генерировались в двух изолированных областях в высокоширотных районах, которые геомагнитно сопряжены; скорость перемещения составляла 361 м/сек.

Дальнейший анализ результатов Чена и Вилларда показал, что их можно объяснить в терминах акустикогравитационных волн [68]. Из ряда наблюдений [21, 37, 50] следует, что перемещающиеся волновые возмущения генерируются в зоне полярных сияний и распространяются к экватору. В 22 из 37 случаев (60%) в пределах  $\pm 15$  мин от предсказанного времени началась полярная суббура [37]. Согласно [37], скорости горизонтального перемещения и периоды таких возмущений согласуются с теоретическими результатами распространения внутренних атмосферных гравитационных волн [25, 33].

#### 4. 11. 2. Инфразвуковые волны давления от активных сияний

Инфразвуковые волны с амплитудой в несколько дин на  $1 \text{ см}^2$  и с периодом от 40 до 80 сек изучались в [16, 69, 70]. Вильсон [69] предположил, что наблюдаемая ударная волна образуется при расширении волны сжатия. Расширение обусловлено наложением волновых фронтов в направлении, параллельном движению полярного сияния, если форма сияния движется со сверхзвуковой скоростью. На рис. 70 и 71 приведены примеры инфразвуковых волн, связанных с быстрыми движениями сияния к востоку. Однако причина генерации волн в активном сиянии не совсем понятна.

#### 4. 12. Разогрев атмосферы в зоне полярных сияний

Вариации плотности верхней атмосферы над зоной полярных сияний в период геомагнитных возмущений исследованы в [38, 39]. Эти исследования базировались на анализе торможения спутников; для измерения уровня геомагнитной активности использовались планетарные геомагнитные индексы  $K_p$  и  $a_p$ . Одновременно определялись соответствующие изменения температуры ( $\Delta T$ ) по данным об увеличении плотности атмосферы. Было показано, что для средней широты  $65^\circ$  среднее время задержки между мак-

**Увеличение температуры в функции геомагнитных индексов**

$K_p$	$a_p$	$\Delta T$	$K_p$	$a_p$	$\Delta T$
0 <sub>0</sub>	0	0°	5 <sub>-</sub>	39	134°
0 <sub>+</sub>	2	9	5 <sub>0</sub>	48	145
1 <sub>-</sub>	3	19	5 <sub>+</sub>	56	156
1 <sub>0</sub>	4	28	6 <sub>-</sub>	67	167
1 <sub>+</sub>	5	37	6 <sub>0</sub>	80	180
2 <sub>-</sub>	6	47	6 <sub>+</sub>	94	194
2 <sub>0</sub>	7	56	7 <sub>-</sub>	111	210
2 <sub>+</sub>	9	66	7 <sub>0</sub>	132	229
3 <sub>-</sub>	12	75	7 <sub>+</sub>	154	251
3 <sub>0</sub>	15	85	8 <sub>-</sub>	179	279
3 <sub>+</sub>	18	94	8 <sub>0</sub>	207	313
4 <sub>-</sub>	22	104	8 <sub>+</sub>	236	358
4 <sub>0</sub>	27	114	9 <sub>-</sub>	300	417
4 <sub>+</sub>	32	124	9 <sub>0</sub>	400	495

симумами геомагнитной возмущенности и атмосферного явления около 5 час. В таблице приведены значения  $\Delta T$  в функции  $K_p$  и  $a_p$  [39].

**ЛИТЕРАТУРА**

*Общая*

Hultqvist B., Ionospheric absorption of cosmic radio noise, Space Sci. Rev., 5, 771—817 (1966).

*Цитированная в тексте*

1. Akasofu S.-I., Chapman S., Meinel A. B., The aurora, Handbuch der Physik, Bd. XLIX-1, ed. S. Flügge, Springer-Verlag, Berlin, 1966, S. 1—158.
2. Ansari Z. A., The aurorally associated absorption of cosmic noise at College, Alaska, J. Geophys. Res., 69, 4493—4513 (1964).
3. Ansari Z. A., A peculiar type of daytime absorption in the auroral zone, J. Geophys. Res., 70, 3117—3122 (1965).
4. Bailey D. K., Some quantitative aspects of electron precipitation in and near the auroral zone, Rev. Geophys., 6, 289—346 (1968).
5. Basler R. P., Radio wave absorption in the auroral ionosphere, J. Geophys. Res., 68, 4665—4681 (1963).
6. Bates H. F., Latitude of the dayside aurora, J. Geophys. Res., 71, 3629—3633 (1966).
7. Bates H. F., Belon A. E., Romick G. J., Stringer W. J., On the correlation of optical and radio auroras, J. Atmos. Terr. Phys., 28, 439—446 (1966).

8. Bauer S. J., Krishnamurthy B. V., Behavior of the top-side ionosphere during a great magnetic storm, *Planet. Space Sci.*, **16**, 653—663 (1968).
9. Berkeley F. T., Coordinated measurements of auroral absorption and luminosity using the narrow beam technique, *J. Geophys. Res.*, **73**, 319—337 (1968).
10. Bewersdorff A., Kremser G., Riedler W., Legrand J. P., Some properties of the slowly varying ionospheric absorption events in the auroral zone, *Arkiv Geofysik*, **5**, 115—127 (1967).
11. Bewersdorff A., Kremser G., Stadsnes J., Trefall H., Ullaland S., Simultaneous balloon measurements of auroral X-rays during slowly varying ionospheric absorption events, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 591—607 (1968).
12. Bowman G. G., Traveling disturbances associated with ionospheric storms, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **27**, 1247—1261 (1965).
13. Brown R. R., A study of slowly varying and pulsating ionospheric absorption events in the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **69**, 2315—2321 (1964).
14. Brown R. R., Barcus J. R., Parsons N. R., Balloon observations of auroral zone X-rays in conjugate regions, 1. Slow time variations, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2579—2598 (1965).
15. Brown R. R., Barcus J. R., Parsons N. R., Balloon observations of auroral zone X-rays in conjugate regions, 2. Microbursts and pulsations, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2599—2612 (1965).
16. Campbell W. H., Young J. M., Auroral-zone observations of infrasonic pressure waves related to ionospheric disturbances and geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, **68**, 5909—5916 (1963).
17. Chan K. L., Villard Jr., O. G., Observation of large-scale traveling ionospheric disturbances by spaced-path high-frequency instantaneous-frequency measurements, *J. Geophys. Res.*, **67**, 973—988 (1962).
18. Chivers H. J. A., частное сообщение, 1967.
19. Дрицкий В. М., Авроральное поглощение радиоволн в окрестности северного географического полюса, *Геомагнетизм и аэрномия*, **6**, 361—364 (1966).
20. Дрицкий В. М., Исследование пространственного и временного распределения аврорального поглощения по данным наблюдений сети риометров в Арктике, *Геомагнетизм и аэрномия*, **6**, 1061—1070 (1966).
21. Du Castel F., Faynot J. M., Some irregularities observed simultaneously in the upper and lower ionosphere at middle latitudes, *Nature*, **204**, 984—985 (1964).
22. Eather R. H., Jacka F., Auroral absorption of cosmic radio noise, *Austral. J. Phys.*, **19**, 215—239 (1966).
23. Farley Jr., D. T., A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **68**, 6083—6097 (1963).
24. Федякина Н. И., Аномальное поглощение II типа и его связь с возмущенностью магнитного поля, *Геомагнетизм и аэрномия*, **3**, 479—483 (1963).
25. Friedman J. P., Propagation of internal gravity waves in a thermally stratified atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1033—1054 (1966).
26. Gustafsson G., Ionization in the D-region during auroral break-up events, *Planet. Space Sci.*, **12**, 195—208 (1964).
27. Hargreaves J. K., Auroral motions observed with riometers: movements between stations widely separated in longitude, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 1159—1164 (1967).
28. Hargreaves J. K., Chivers H. J. A., A study of auroral absorption events at the south pole, 2. Conjugate properties, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1093—1102 (1965).

29. Hargreaves J. K., Cowley F. C., Studies of auroral radio absorption events at three magnetic latitudes. I. Occurrence and Statistical Properties of the Events, *Planet. Space Sci.*, **15**, 1571—1583 (1967).
30. Hartz T. R., Montbriand L. E., Vogan E. L., A study of auroral absorption at 30 Mc/s, *Canadian J. Phys.*, **41**, 581—595 (1963).
31. Heppner J. P., Byrne E. C., Belon A. E., The association of absorption and Es ionization with aurora at high latitudes, *J. Geophys. Res.*, **57**, 121—134 (1952).
32. Hibberd F. H., Ross W. J., Variations in total electron content and other ionospheric parameters associated with magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5331—5337 (1967).
33. Hines C. O., Comments on paper by A. F. Wickersham Jr.: Identification of ionospheric motions detected by the high-frequency backscattering technique, *J. Geophys. Res.*, **69**, 2395—2396 (1964).
34. Holt O., Omholt A., Auroral luminosity and absorption of cosmic radio noise, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **24**, 467—474 (1962).
35. Holt O., Landmark B., Lied F., Analysis of riometer observations obtained during polar radio blackouts, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **23**, 229—243 (1962).
36. Hook J. L., Morphology of auroral zone radiowave absorption, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1341—1351 (1968).
37. Hunsucker R. D., Tveten L. H., Large traveling-ionospheric-disturbances observed at midlatitudes utilizing the high resolution h.f. backscatter technique, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 909—916 (1967).
38. Jacchia L. G., Slowey J., Atmospheric heating in the auroral zones: A preliminary analysis of the atmospheric drag of the Injun 3 satellite, *J. Geophys. Res.*, **69**, 905—910 (1964).
39. Jacchia L. G., Slowey J., Verniani F., Geomagnetic perturbations and upper-atmosphere heating, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1423—1434 (1967).
40. Jelly D. H., Apparent poleward motion of onsets of auroral absorption events, *Canadian J. Phys.*, **46**, 33—37 (1968).
41. Jelly D., Brice N., Changes in Van Allen radiation associated with polar substorms, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5919—5931 (1967).
42. Johansen O. E., Variations in energy spectrum of auroral electrons detected by simultaneous observation with photometer and riometer, *Planet. Space Sci.*, **13**, 225—235 (1965).
43. Kamiyama H., The disturbance in the ionosphere accompanying the geomagnetic storm on April 18, 1951, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, 5th Ser. Geophysics, **5**, 1—9 (1953).
44. Kamiyama H., Disturbances in the ionosphere during the geomagnetic bay, *Sci. Rep. Tohoku Univ.* 5th Ser. Geophysics, **5**, 101—107 (1953).
45. Kamiyama H., Disturbances in the ionosphere during the geomagnetic bay, *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, **7**, 125—135 (1956).
46. Kohl H., Movement of the F-layer of the ionosphere during bay disturbances of the earth, *Arch. Elekt. Ubertr.*, **14**, 169—176 (1960).
47. Leadabrand R. L., Schlobohm J. C., Baron M. J., Simultaneous very high frequency and ultra high frequency observations of the aurora at Fraserburgh, Scotland, *J. Geophys. Res.*, **70**, 4235—4284 (1965).
48. Leinbach H., Basler R. P., Ionospheric absorption of cosmic radio noise at magnetically conjugate auroral zone stations, *J. Geophys. Res.*, **68**, 3375—3382 (1963).
49. Lin W. C., McDiarmid I. B., Burrows J. R., Electron fluxes at 1000 km altitude associated with auroral substorms, *Canadian J. Phys.*, **46**, 80—83 (1968).
50. Liszka L., Taylor G. N., A synoptic study of large scale ionospheric irregularities using observations of the Faraday rotation of satellite signals, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **27**, 843—854 (1965).

51. Little C. G., Leinbach H., Some measurements of high-latitude ionospheric absorption using extraterrestrial radio waves, Proc. Inst. Radio Engrs., **46**, 334—348 (1958).
52. Maeda K. I., Sato T., The F region during magnetic storms Proc. Inst. Radio Engrs., **47**, 232—239 (1959).
53. Martyn D. F., The morphology of the ionospheric variations associated with magnetic disturbance, I. Variations at moderately low latitudes, Proc. Roy. Soc. London, **A218**, 1—18 (1953).
54. Matsushita S., A study of the morphology of ionospheric storms, J. Geophys. Res., **64**, 305—321 (1959).
55. Munro G. H., Traveling disturbances in the ionosphere, Proc. Roy. Soc. London, **A202**, 208—223 (1950).
56. Obayashi T., On the world-wide disturbance of the ionosphere, Rep. Ionosph. Space Res. Japan, **8**, 135—142 (1954).
57. Parthasarathy R., Berkeley F. T., Auroral zone studies of sudden-onset radiowave absorption events using multiple-station and multiple-frequency data, J. Geophys. Res., **70**, 89—98 (1965).
58. Petrie L. E., Preliminary results on mid and high latitude topside spread F, and its effects upon radiowave propagation and communication, ed. P. Newman, W. and J. Mackay and Co. Ltd., London, 1966.
59. Piggott W. R., Studies of ionospheric absorption, Res. Geophysics, Vol. I, ed. H. Odishaw, the MIT Press, 1964, p. 277—297.
60. Ratcliffe J. A., The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere, Cambridge Univ. Press, England, 1959.
61. Rüster R., Height variations of the F2-layer above Tsumeb during geomagnetic bay-disturbances, J. Atmos. Terr. Phys., **27**, 1229—1245 (1965).
62. Sato T., Disturbances in the ionospheric F2 region associated with geomagnetic storms, I. Equatorial zone. J. Geomagn. Geoelectr., **8**, 129—135 (1957); II. Middle Latitudes, **9**, 1—22 (1957).
63. Shimazaki T., A statistical study of occurrence probability of spread F at high latitudes, J. Geophys. Res., **67**, 4617—4634 (1962).
64. Somaya julu Y. V., Changes in the F region during magnetic storms, J. Geophys. Res., **68**, 1899—1922 (1963).
65. Titheridge J. E., Andrews M. K., Changes in the topside ionosphere during a large magnetic storm, Planet. Space Sci., **15**, 1157—1167 (1967).
66. Unwin R. S., The morphology of the VHF radio aurora at sunspot maximum, I. Diurnal and seasonal variations, J. Atmos. Terr. Phys., **28**, 1167—1181 (1966); II. The behaviour of different echo types, там же, **28**, 1183—1194 (1966).
67. Unwin R. S., Knox F. B., The morphology of the VHF radio aurora at sunspot maximum, IV. Theory, J. Atmos. Terr. Phys., **30**, 25—46 (1968).
68. Wickersham Jr., A. F., Analysis of large-scale traveling ionospheric disturbances, J. Geophys. Res., **69**, 3235—3243 (1964).
69. Wilson C. R., Infrasonic pressure waves from the aurora: A shock wave model, Nature, **216**, 131—133 (1967).
70. Wilson C. R., Nichparenko S., Infrasonic waves and auroral activity, Nature, **214**, 1299—1302 (1967).

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

## Поглощение

- Belrose J. S., Thomas L., Ionization changes in the middle latitude D-region associated with geomagnetic storms, J. Atmos. Terr. Phys., **30**, 1397—1413 (1968).
- Дубатовко О. Е., Пудовкин М. И., Шумилов О. И., Некоторые вопросы аврорального поглощения, Геомагнетизм и аэрономия, **8**, № 2, 303—308 (1968).

- Har greaves J. K., Auroral motions observed with riometers: latitudinal movements and a median global pattern, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1461—1470 (1968).
- Har greaves J. K., Auroral absorption of HF radio waves in the ionosphere: A review of results from the first decade of riometry, *Proc. IEEE*, **57**, 1348—1373 (1969). (Русский перевод: Харгривс Дж. К., Авроральное ВЧ-поглощение в ионосфере. Обзор результатов риометрических исследований за первое десятилетие, Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, **57**, № 8, стр. 5—31 (август 1969).)
- Hultqvist B., Auroral and polar cap absorption, *Atmospheric Emissions*, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 73—90.
- Reddy C. A., Rao M., Matsushita S., Rocket observations of electron densities in the nighttime auroral E-region at Fort Churchill, Canada, *Planet. Space Sci.*, **17**, 617—628 (1969).
- Shepherd D. C., Esklund W. L., Auroral absorption occurrence patterns as a function of magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2891—2898 (1969).
- Вернов С. Н., Дриацкий В. М., Кузнецов С. Н., Логачев Ю. И., Сосновец Э. Н., Столповский В. Г., Поведение радиационных поясов и аномальное поглощение космического радиопотока в зоне полярных сияний во время магнитных бурь 12—14 февраля и 20—21 февраля 1964 г., *Геомагнетизм и аэронавтика*, **6**, № 1, 3—10 (1966).
- Вернов С. Н., Вакулов П. В., Кузнецов С. Н., Логачев Ю. И., Сосновец Э. Н., Столповский В. Г., Граница внешнего радиационного пояса и зона неустойчивой радиации, *Геомагнетизм и аэронавтика*, **7**, № 3, 417—422 (1967).

### Деформация

- Bauer S. J., Krishnamurthy B. V., Behavior of the topside ionosphere during a great magnetic storm, *Planet. Space Sci.*, **16**, 653—663 (1968).
- Findlay J. A., Dyson P. L., Brace L. H., Zmuda A. J., Radford W. E., Ionospheric and magnetic observations at 1000 kilometers during the geomagnetic storm and aurora of May 25—26, 1967, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3705—3712 (1969).
- Goodwin G. L., Some horizontally-moving ionospheric irregularities at high latitudes, *Planet. Space Sci.*, **16**, 273—283 (1968).
- Крутикова Т. И., Фаткуллин М. Н., Об эффектах в слое F2 ионосферы, наблюдающихся вслед за SSC магнитной бури, *Геомагнетизм и аэронавтика*, **8**, № 2, 345—347 (1968).
- Large-Hesse G., Radio observations of the aurora by continuous wave transmissions, *Atmospheric emissions*, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 201—212.
- Nishida A., Average structure and storm-time change of the polar topside ionosphere at sunspot minimum, *J. Geophys. Res.*, **72**, 6051 (1967).
- Rüster R., Theoretical treatment of the dynamical behaviour of the F-region during geomagnetic bay disturbances, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **31**, 765—780 (1969).
- Sato T., Chan K. L., Storm-time variations of the electron concentration in the polar topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2208—2216 (1969).
- Sato T., Chan K. L., Storm-time variations of the electron concentration in the polar topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2208—2216 (1969).
- Sato T., Collin L., Morphology of electron concentration enhancement at a height of 1000 kilometers at polar latitudes, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2193—2207 (1969).
- Titheridge J. E., A regular disturbance in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **74**, 1195—1204 (1969).

- Thomas L., Worldwide disturbances in the F-region accompanying the onset of the main phase of severe magnetic storms, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1623—1630 (1968).
- Thomas G., Long-period waves generated in the polar ionosphere during the onset magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6319—6336 (1968).

#### *Разогрев*

- Blum P. W., The delay between solar activity and density changes in the upper atmosphere, *Planet. Space Sci.*, **16**, 1427—1440 (1968).
- Шеф ов Н. Н., Twilight helium emission during low and high geomagnetic activity, *Planet. Space Sci.*, **16**, 1103—1107 (1968).
- Smith L. B., An observation of strong thermospheric winds during a geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4959—4963 (1968).
- Stolarski R. S., Calculation of auroral emission rates and heating effects, *Planet. Space Sci.*, **16**, 1265—1276 (1968).
- Тру тце Ю. Л., Oxygen emission at 6300 Å and geomagnetic activity — I: Some regular features of low-latitude emissions, *Planet. Space Sci.*, **16**, 981—992 (1968).

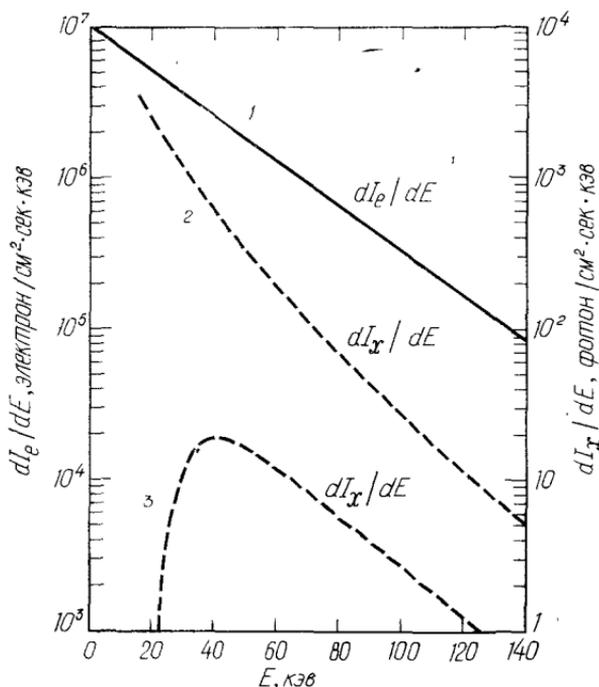
#### *Инфразвуковые волны*

- Wilson C. R., The auroral infrasonic wave and ionospheric absorption substorms, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **32**, 293—301 (1970).
- Wilson C. R., Infrasonic waves from moving auroral electrojets, *Planet. Space Sci.*, **17**, 1107—1120 (1969).
- Wilson C. R., Auroral infrasonic waves, *J. Geophys. Res.*, **74**, 1812—1836 (1969).

# Суббура в рентгеновском излучении

## 5. 1. Введение

: Энергичные электроны, вторгающиеся в верхнюю атмосферу в полярных областях, при столкновении с частицами верхней атмосферы порождают фотоны тормозного рентгеновского излучения. Для регистрации этого излучения применяются приборы, поднимаемые на высотных аэростатах на высоту около 30 км. Однако в остаточном слое воздуха между уровнем генерации рентгеновских



Р и с. 72. Модельные расчеты энергетического спектра тормозного рентгеновского излучения в верхней атмосфере, производимого электронами с энергией 30 кэВ [6]. 1 — энергетический спектр вторгающихся электронов; 2, 3 — спектр фотонов на уровне генерации и на глубине атмосферы 10 г/см<sup>2</sup> соответственно.

лучей и аэростатом фотоны рентгеновского излучения испытывают фотоэлектрическое поглощение и комптоновское рассеяние; оба эти эффекта определяются энергией фотонов. Поэтому нельзя непосредственно получить первичный энергетический спектр вторгающихся электронов по наблюдаемому спектру рентгеновского излучения. Поскольку для вопросов, поставленных в монографии, важен геофизический аспект исследования всплесков рентгеновского излучения, мы не будем останавливаться на деталях процессов восстановления спектра электронов (см. [6, 10]); тем не менее некоторые особенности влияния атмосферы следует указать. На рис. 72 приведены результаты модельных расчетов Баркуса и Розенберга [6]. Они предположили, что вторгается поток электронов, имеющий экспоненциальный спектр вида

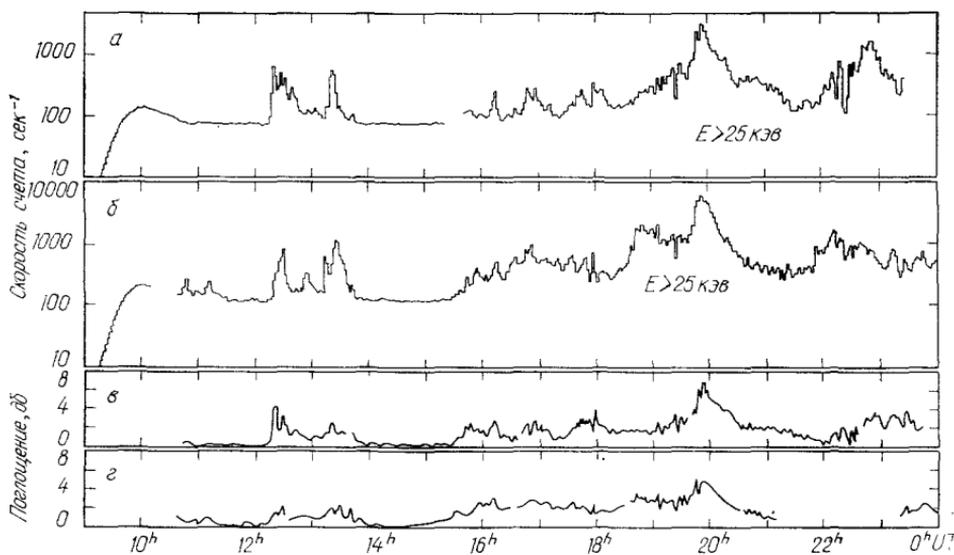
$$\frac{dI_e}{dE} = \frac{\kappa}{E_0} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right),$$

где  $E_0 = 30$  кэв, и рассчитали спектр рентгеновского излучения  $dI_x/dE$ , возникающего при торможении электронов в слое воздуха на границе атмосферы. Затем был вычислен спектр рентгеновского излучения  $dI_x/dE$  на типичной для полетов глубине атмосферы  $10$  г/см<sup>2</sup> с учетом фотоэлектрического поглощения и комптоновского рассеяния; высыпание предполагалось изотропным и однородным на площади более  $10^4$  км<sup>2</sup> над аэростатом. Результаты расчетов показали, что в диапазоне энергий меньше  $40$  кэв имеет место резкое обрезание потока рентгеновского излучения. Поэтому к данным стратосферных измерений потока частиц с энергиями меньше  $50$  кэв надо относиться очень осторожно.

Несмотря на это ограничение, наблюдения на высотных аэростатах обеспечивают более прямую информацию о потоках энергичных электронов, чем риометры. Они позволили собрать ряд важных сведений о потоках вторгающихся в атмосферу энергичных электронов, которые нельзя получить при помощи спутников, ракет или наземных наблюдений (в частности, сведения о различного рода временных флуктуациях потока электронов).

## 5. 2. Типичные суточные вариации

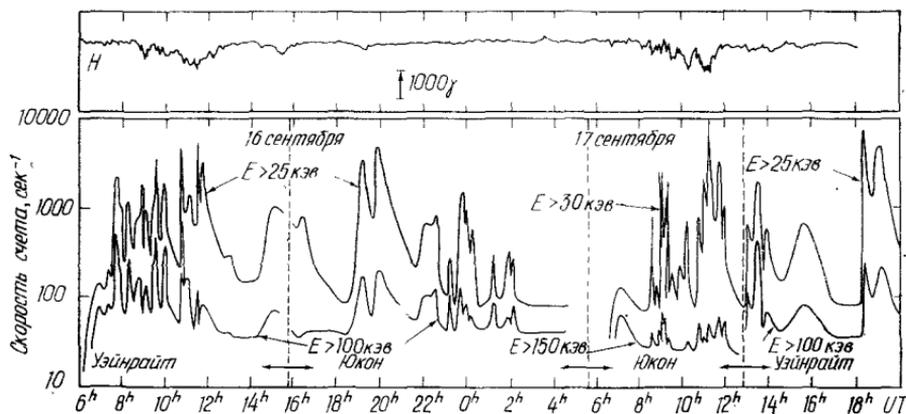
На рис. 73 приведен пример одновременных измерений на аэростатах, запущенных в форте Юкон и форте Уэйнрайт (около Фэрбенкса), и соответствующие риометрические данные, полученные в форте Юкон и Колледже [5]. Для этих записей характерно появление рентгеновского излучения в виде всплесков. Существует большое сходство во временных вариациях рентгеновского излучения и поглощения космического радиоизлучения. Если учесть изложенное в предыдущей главе, то становится ясно, что всплески



Р и с . 73. Типичный пример регистрации рентгеновского излучения 14 сентября 1963 г. во время одновременных полетов аэростатов в форте Юкон (а) и форте Уэйрайт (б), в, г — поглощение космического радиоизлучения, зарегистрированное риометрами в форте Юкон и Колледже соответственно [5].

рентгеновского излучения несомненно связаны с магнитосферными суббурами.

Первый большой всплеск, который начался в  $12^{\text{h}}10^{\text{m}}\text{UT}$ , совпадает с поглощением типа  $N$  в форте Юкон. После этого наступил спокойный период с  $14^{\text{h}}$  до  $15^{\text{h}}\text{UT}$ , во время которого не было за-



Р и с . 74. Типичные записи всплесков рентгеновского излучения (четыре последовательных полета 16 и 17 сентября 1963 г. в форте Юкон и форте Уэйрайт) и запись  $H$ -составляющей магнитного поля в Колледже [6].

регистрировано значительных всплесков рентгеновского излучения и поглощения. Новый активный период начался около 15<sup>h</sup>UT. Из соответствующих записей риометров нетрудно установить, что наблюдавшиеся в это время сильные всплески рентгеновского излучения ассоциируются с поглощением типа *M*.

На рис. 74 показаны еще один случай регистрации рентгеновского излучения и соответствующие магнитные записи в Колледже; период наблюдений длился около 36 час. В полуночные часы существует четкая корреляция между магнитными возмущениями в Колледже и всплесками рентгеновского излучения. Например, всплески рентгеновского излучения, начинавшиеся в 10<sup>h</sup>30<sup>m</sup>UT как 16, так и 17 сентября, совпадают с интенсивными отрицательными бухтами. Однако в утренние часы корреляция между всплесками и отрицательными бухтами становится гораздо менее отчетливой по той же самой причине, по которой почти отсутствует корреляция между поглощениями типа *M* и отрицательными бухтами. Полярная электроструя течет вдоль овала полярных сияний, который в утреннем секторе проходит ближе к полюсу, тогда как энергичные электроны вторгаются вдоль зоны полярных сияний. В послеполуденные и ранние вечерние часы корреляция между всплесками рентгеновского излучения и вариациями магнитного поля также очень слаба.

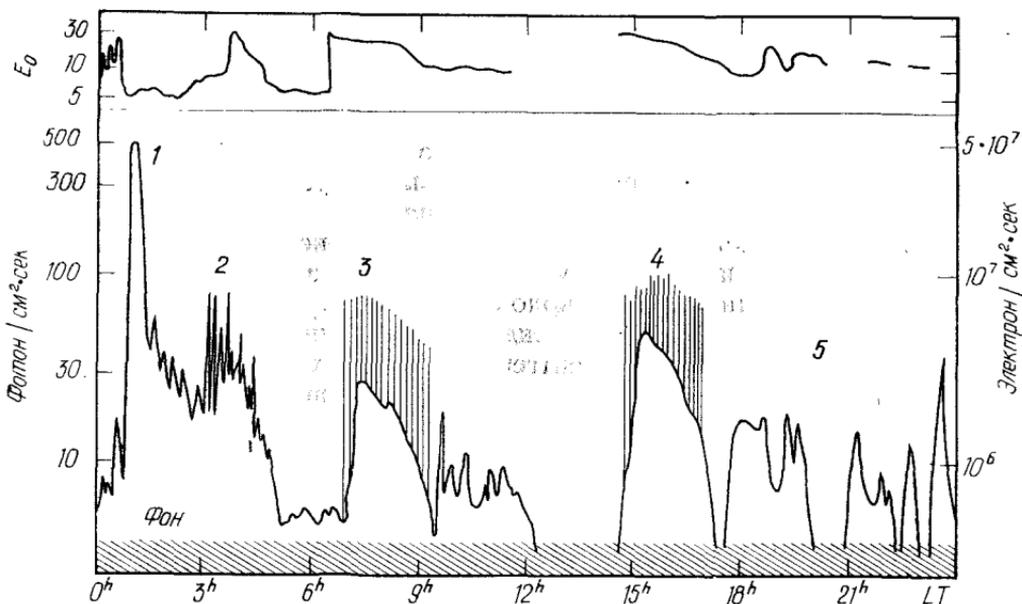
Для всплесков рентгеновского излучения типичны короткопериодные флуктуации, которые не видны при временной шкале, использованной на рис. 73 и 74.

### 5. 3. Статистическая картина суточных вариаций

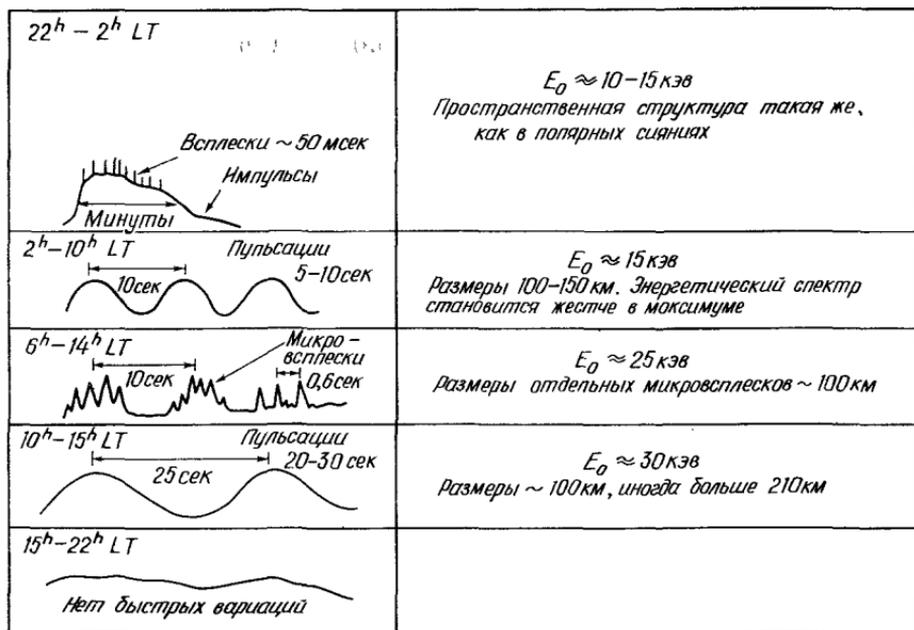
Схематическая картина изменения характеристик всплесков рентгеновского излучения в течение суток приводится на рис. 75 [1]. На рис. 76 детализируется тонкая структура высыпаний электронов, ответственных за всплески [23]. Основываясь на последней работе, дадим сводку основных характеристик всплесков в разное время суток.

22<sup>h</sup>00<sup>m</sup>—2<sup>h</sup>00<sup>m</sup>LT. Вторжение энергичных электронов в этот период, как правило, связано с суббурами в полярных сияниях в полуночном секторе и с отрицательными геомагнитными бухтами. Считалось, что характерное время изменений потока электронов при таких вторжениях не меньше нескольких минут, однако недавние аэростатные измерения на высотах, соответствующих давлению 2 г/см<sup>2</sup>, выявили всплески электронов длительностью 5—50 мсек во время распада полярных сияний [22]. Вторжение энергичных электронов в виде очень коротких всплесков может оказаться весьма характерным для этого времени суток.

2<sup>h</sup>00<sup>m</sup>—10<sup>h</sup>00<sup>m</sup>LT. Сообщалось о неоднократных наблюдениях в это время суток пульсаций рентгеновского излучения с перио-



Р и с. 75. Схема суточного хода всплесков рентгеновского излучения: 1 — по луночная бухта; 2 — пульсации с периодом  $\sim 10$  сек; 3 — микровсплески и пульсации с периодом  $\sim 10$  сек; 4 — микровсплески; 5 — спорадические всплески [1].



Р и с. 76. Характеристики всплесков рентгеновского излучения в различное местное время [23].

дом 5—10 сек [7,13]. Эти пульсации, возможно, тесно связаны с пульсирующими полярными сияниями [24].

$6^h00^m$ — $14^h00^m$  LT. Доминирующим типом вторжения энергичных электронов являются микровсплески [3]. Характерная длительность микровсплесков составляет 0,1—0,5 сек. Интервал времени между соседними всплесками в группе составляет в среднем 0,5 сек [2, 20]. Группы микровсплесков отстоят одна от другой примерно на 10 сек.

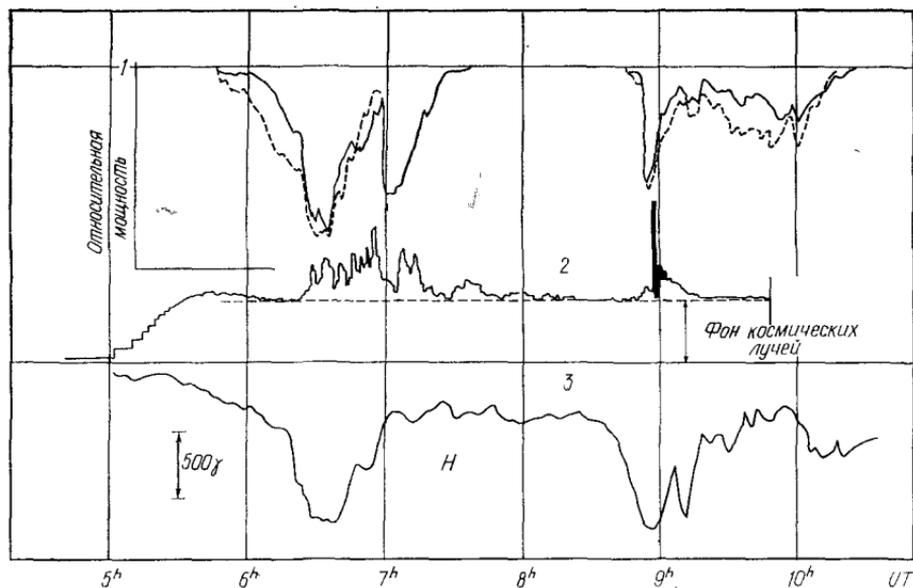
$10^h00^m$ — $15^h00^m$  LT. В это время суток наблюдаются пульсации потока вторгающихся электронов с периодом 20—30 сек.

$16^h00^m$ — $22^h00^m$  LT. Вторжения электронов не имеют, как правило, тонкой структуры (характерное время изменения потока не меньше нескольких минут). Для лучшего понимания характеристик вторжений этого типа необходимы дополнительные измерения.

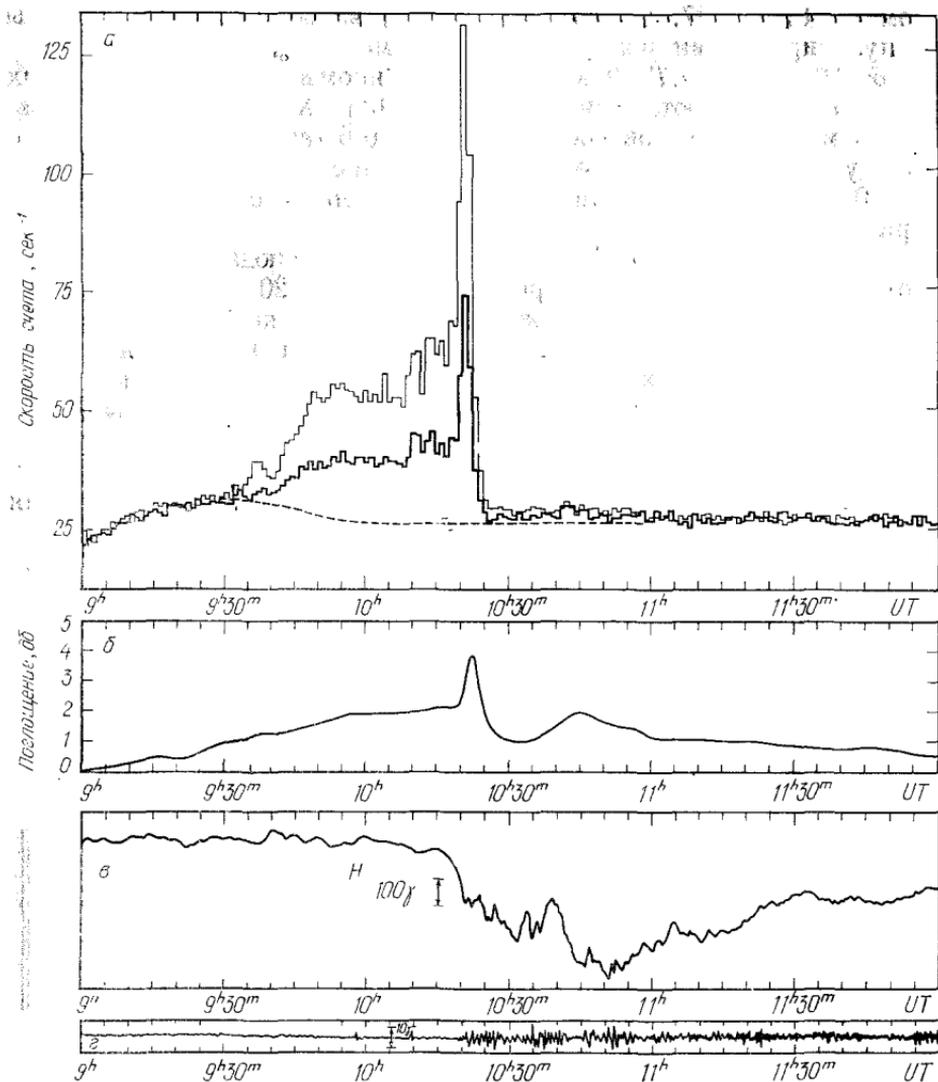
В последующих двух разделах мы исследуем взаимосвязь между полярными сияниями, поглощением космического радиоизлучения и рентгеновским излучением.

#### 5. 4. Полуночные всплески

Поскольку взрывная фаза в развитии полярного сияния является важнейшей особенностью суббури, появления интенсивных потоков электронов наиболее естественно ожидать одновременно со

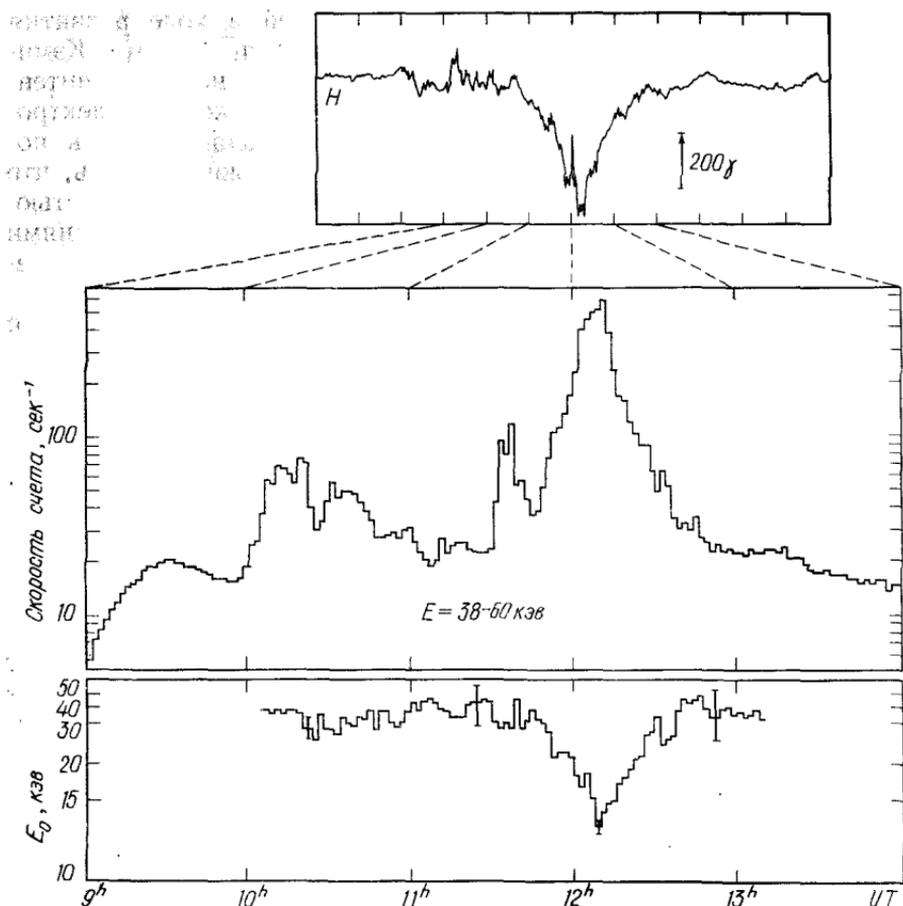


Р и с. 77. Одновременные записи поглощения космического радиоизлучения в Боулдере (1), всплесков рентгеновского излучения в Миннеаполисе (2) и  $H$ -составляющей магнитного поля во Фредериксбурге (3) во время фазы нарастания большой магнитной бури 11 февраля 1958 г. [27].



Р и с. 78. Одновременные записи: *а* — всплески рентгеновского излучения, зарегистрированные в стратосфере при помощи двух счетчиков Гейгера (пунктирная кривая — фон космических лучей); *б* — поглощение космического радиоизлучения, зарегистрированное риометром; *в* — *N*-составляющая магнитного поля; *г* — микропульсации геомагнитного поля [11].

взрывным движением сияний [на] север, резким началом отрицательных бухт, развитием поглощения типа *N* и другими явлениями в верхней атмосфере высоких широт. На рис. 77 приведен классический пример одновременного резкого увеличения поглощения космического радиоизлучения, всплеска рентгеновского излучения



Р и с. 79. Пример, иллюстрирующий связь полуденных всплесков рентгеновского излучения со смягчением энергетического спектра ( $H$ -составляющая магнитного поля в Колледже и рентгеновское излучение по данным полета аэростата в Фэрбенксе, 21 февраля 1964 г.) [6].

и отрицательной геомагнитной бухты [27]. Следует отметить важную деталь: во время развития такой большой магнитной бури может наблюдаться удивительно спокойный период; в нашем частном случае это период между двумя суббурями ( $7^{\text{h}}30^{\text{m}}-8^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT}$ ).

На рис. 78 приведен еще один пример одновременного развития этих трех явлений: всплеска рентгеновского излучения, поглощения космического радионизлучения и отрицательной геомагнитной бухты [11].

Одну из наиболее интересных проблем в изучении явлений, наблюдавшихся в полуденном секторе, представляет анализ пространственного распределения рентгеновского излучения внутри

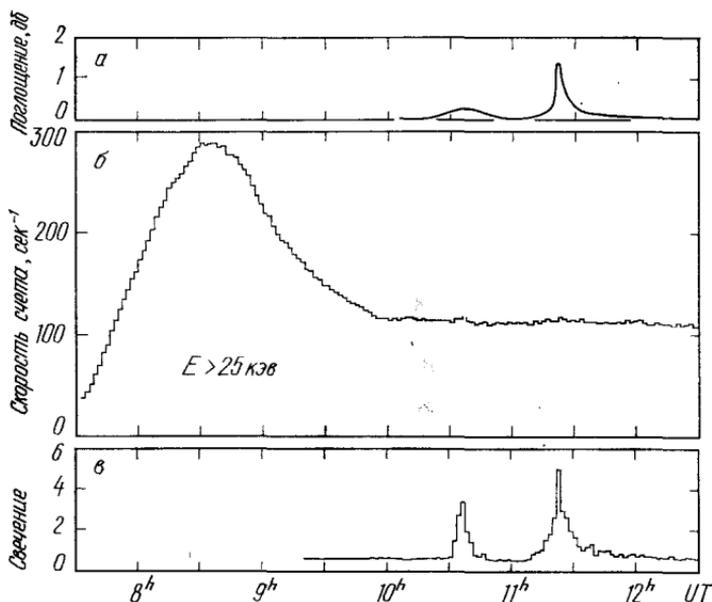
выпуклости в полярном сиянии, возникающей в ходе развития суббури, или относительно полярной электроструи. Браун и Кэмпбелл [11] показали, что рентгеновское излучение наиболее интенсивно в окрестностях полярной электроструи. Поскольку электроструя, по-видимому, концентрируется вблизи обращенного к полюсу фронта расширяющейся выпуклости, то можно считать, что максимум рентгеновского излучения совпадает с этой областью. Этот вывод согласуется и с риометрическими наблюдениями (разд. 4.4.). Гослинг [17] провел детальное исследование положения области прихода рентгеновского излучения при помощи двух направленных детекторов (вертикального и горизонтального) и подтвердил, что движение этой области подобно движению направленной на запад полярной электроструи. Кларк и Энджер [16] показали, что рентгеновское излучение наблюдается непосредственно под полосой активного сияния типа *B* (так называемого сияния с нижним красным краем). Эта работа будет детально рассмотрена в следующем разделе.

Еще одной важной особенностью полуночных всплесков является смягчение энергетического спектра (уменьшение характерной энергии  $E_0$ ) во время суббури. Пример такого изменения спектра приведен на рис. 79. Перед внезапным усилением отрицательной бухты (и, следовательно, авроральной электроструи)  $E_0$  составляло около 40 кэв. Однако с ростом тока  $E_0$  уменьшилось и достигло минимальной величины ( $E_0 \approx 14$  кэв) в тот момент (12<sup>h</sup>10<sup>m</sup>UT), когда магнитометр зарегистрировал максимальное отклонение. Во время фазы восстановления  $E_0$  постепенно возрастало и возвратилось к начальному уровню приблизительно к концу суббури.

рис. 79

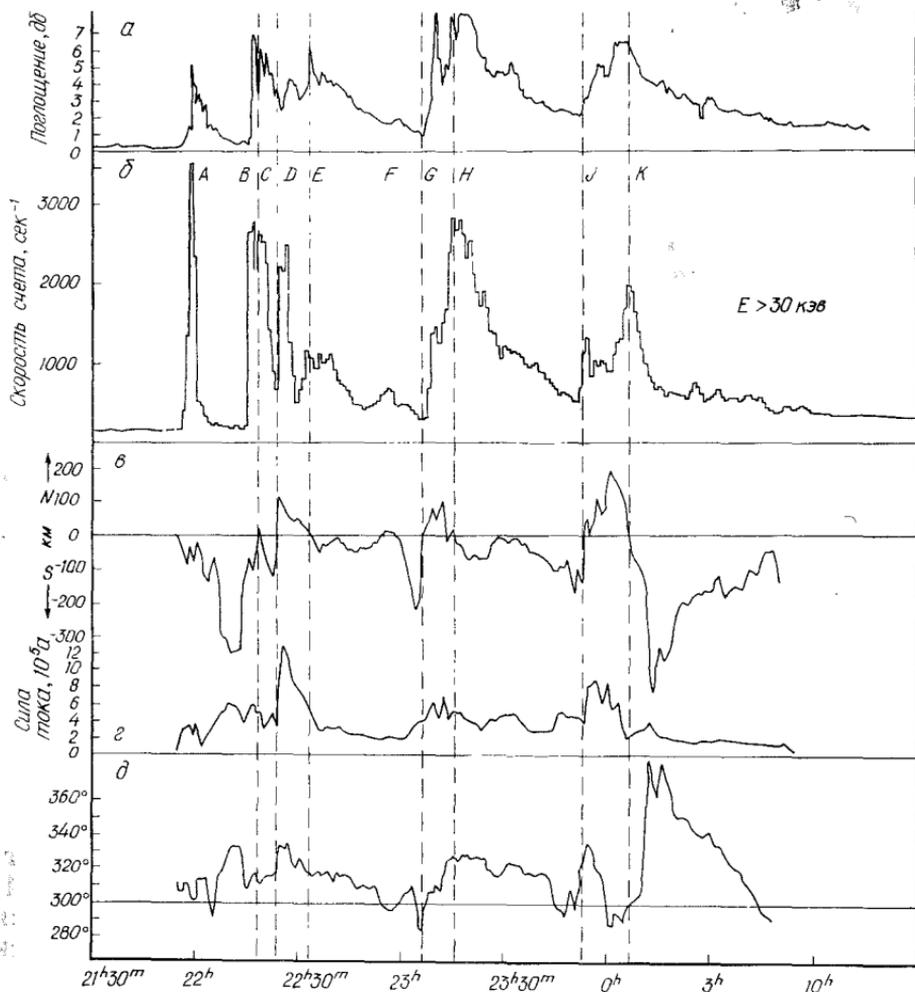
## 5. 5. Всплески рентгеновского излучения, связанные с движущимися к западу изгибами полярных сияний

К сожалению, число измерений всплесков рентгеновского излучения, связанных с движущимися к западу изгибами полярных сияний, очень мало. На рис. 80 приведен пример, когда поток рентгеновского излучения, связанного с таким изгибом, был очень мал [4]. Изгиб проходил над аэростатом между 11<sup>h</sup>15<sup>m</sup> и 11<sup>h</sup>25<sup>m</sup>UT, вызвав увеличение поглощения по данным наземного риометра и увеличение интенсивности свечения по данным фотометра на борту аэростата. Однако Баркус [4] отметил, что появление едва заметного потока рентгеновского излучения на высоте аэростата может соответствовать довольно сильному потоку первичных электронов, которые не регистрируются на этой высоте из-за малой эффективности процесса тормозного излучения и поглощения в атмосфере (см. рис. 72).



Р и с. 80. Пример движущегося к западу изгиба полярных сияний, не связанного с интенсивными всплесками рентгеновского излучения: *a* — поглощение по данным наземного риометра; *b* — рентгеновское излучение по данным полета аэростата в Барроу; *c* — интенсивность свечения по данным фотометра на борту аэростата (произвольные единицы) 24 марта 1963 г. [4].

Хорошая корреляция между всплеском рентгеновского излучения и прохождением изгиба полярного сияния была установлена Кларком и Энджером [16]. На рис. 81 приведены данные о довольно интенсивной суббуре, которая наблюдалась 12—13 октября 1963 г. над Черчиллем. Первое событие, обозначенное на графике буквой *A*, ассоциируется с движущимся на запад изгибом полярного сияния типа *B*. Риометр в этот момент зарегистрировал резкий всплеск поглощения типа *E* (см. разд. 4.2 и 4.5). Анализ всплеска рентгеновского излучения с большим разрешением по времени показал, что он состоял из трех очень интенсивных всплесков, каждый из которых длился менее 1 мин. Во время этого события аэростат находился около электроструи. После этого был небольшой спокойный период, во время которого электроструя сместилась к экватору. Электроструя и активные полярные сияния с нижним красным краем начали вновь двигаться к полюсу в 22<sup>h</sup>12<sup>m</sup>LT. Когда электроструя находилась на расстоянии около 100 км от аэростата, вновь были зарегистрированы всплески рентгеновского излучения (событие *B*). Электроструя перемещалась к полюсу до 22<sup>h</sup>18<sup>m</sup>LT, после чего сразу же началось движение к экватору. Когда она проходила над аэростатом, вновь наблюдался всплеск рентгеновского излучения (событие *C*).



Р и с. 81. Пример движущегося к западу изгиба полярных сияний типа *B*, связанного с интенсивными всплесками рентгеновского излучения: *a* — поглощение на частоте 30 Мгц по данным риометра, антенна которого направлена в сторону аэростата; *б* — интенсивность рентгеновского излучения в стратосфере (Черчилл); *в* — положение эквивалентной токовой струи по отношению к аэростату; *г* — сила тока в электроструе; *д* — направление тока по отношению к направлению на север 12—13 октября 1963 г. [16]. Время местное.

В 22<sup>h</sup>23<sup>m</sup>LT наблюдалось внезапное усиление электроструи и ее движение к полюсу. Интенсивный всплеск рентгеновского излучения наблюдался точно в тот момент, когда электроструя проходила над аэростатом (событие *D*). Следующий период высокой активности начался в 23<sup>h</sup>04<sup>m</sup>LT, когда ток еще раз возрос и начал смещаться к полюсу. В момент прохождения активной полосы

над аэростатом снова наблюдались всплески рентгеновского излучения (событие *G*). Поток рентгеновского излучения продолжал расти, и когда он достиг максимума (событие *H*), яркое диффузное свечение покрыло все небо. По характеру записи риометра изменение поглощения в этот период можно отнести к типу *N*. Последние два события (*J* и *K*) были связаны с еще одной суббурей; оба максимума интенсивности рентгеновского излучения регистрировались при прохождении электроструи через зенит.

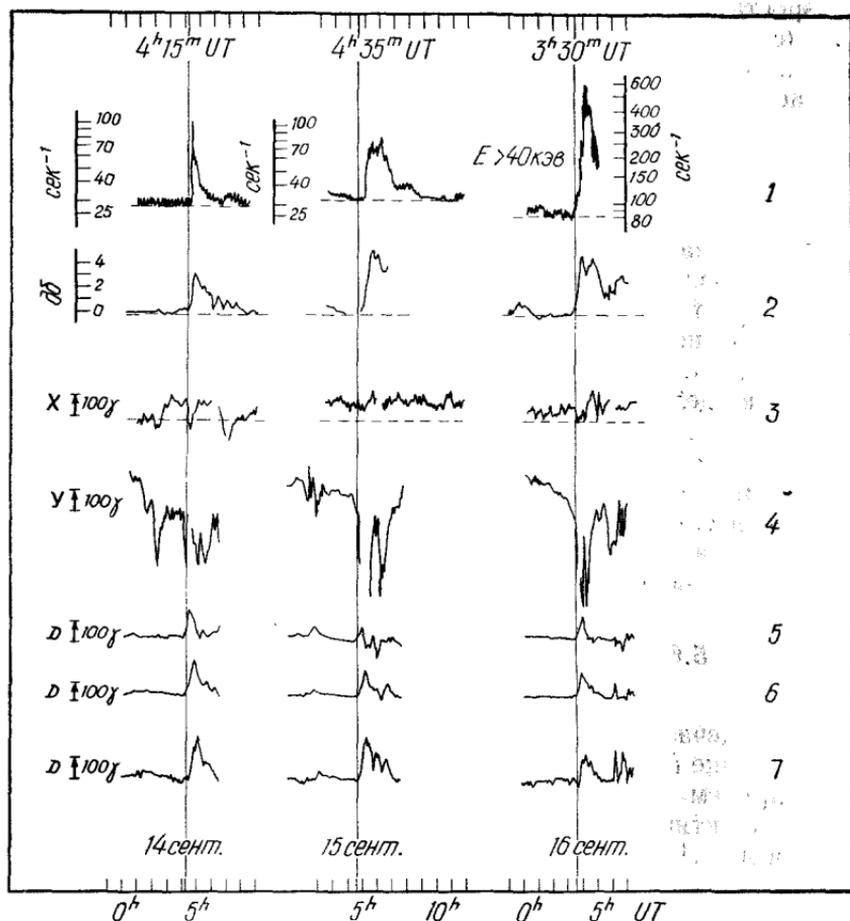
В исследовании, посвященном изменению характеристик рентгеновского излучения в течение суток, Баркус и Розенберг [6] отметили, что всплески в вечернем секторе не сопровождаются смягчением энергетического спектра фотонов. Попыток связать эти всплески с полярными сияниями или магнитными явлениями пока еще не делалось, но маловероятно, что они связаны с движущимися на запад изгибами полярных сияний. Поскольку имеются серьезные указания на то, что энергичные электроны дрейфуют вокруг Земли (разд. 9.2.3), вполне можно предположить, что вечерние всплески энергичных электронов связаны с потоками, вторгающимися также в полуночный сектор, но испытывшими дрейф вокруг Земли через полуденный меридиан.

### 5.6. Рентгеновское излучение в утренние и полуденные часы

Как отмечал ряд исследователей, всплески рентгеновского излучения в зоне полярных сияний регулярно наблюдаются в дневное время, причем они совсем не обязательно связаны с локальной магнитной активностью.

В разд. 3.1 мы выяснили, что авроральная электроструя располагается не вдоль зоны, а вдоль овала полярных сияний. Поэтому станции зоны полярных сияний в утренние часы расположены довольно далеко от электроструи. Вместе с тем в утреннем секторе энергичные электроны высыпаются вдоль зоны сияний. Поэтому плохая корреляция между всплесками рентгеновского излучения и магнитной активностью в утренние часы не удивительна.

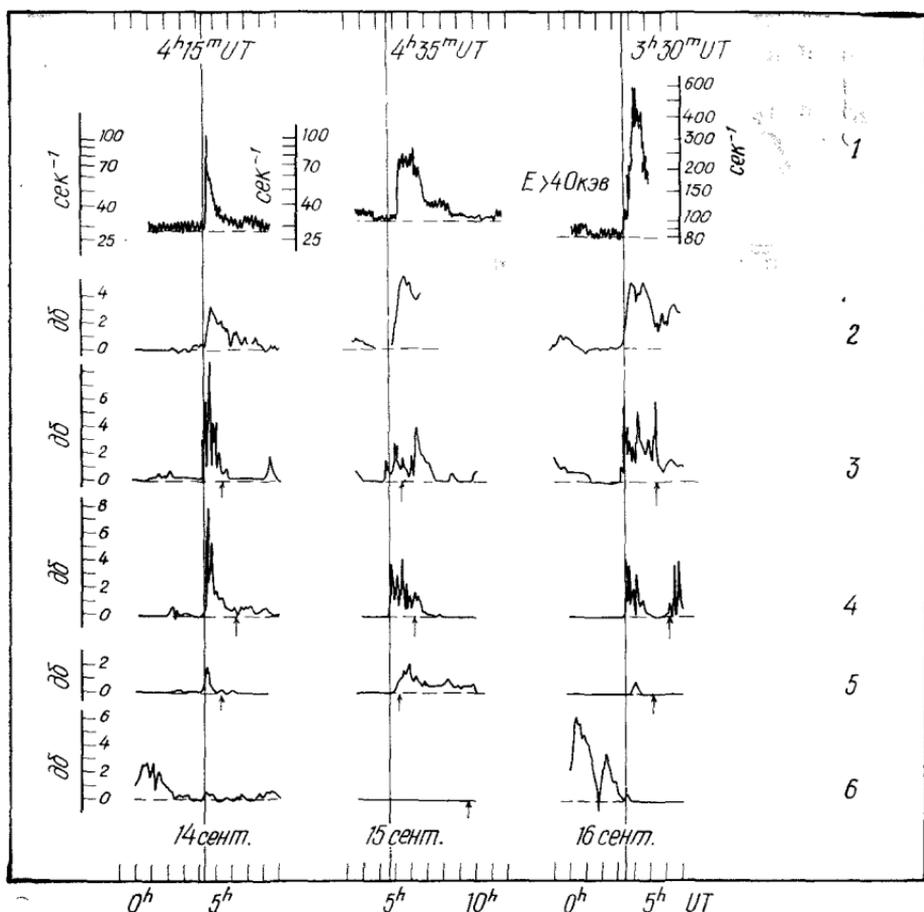
Тем не менее поздние утренние всплески рентгеновского излучения связаны с полярными суббурами, так как всплески в позднем утреннем секторе происходят одновременно с резкими отрицательными геомагнитными бухтами в полуночном секторе [8]. На рис. 82 приведены три примера утренних всплесков, соответствующих им бухт поглощения типа *M* и магнитной активности в Кируне (гм. широта  $65,3^\circ$ ) и одновременные магнитные записи в Черчилле ( $68,7^\circ$ ), Минуке ( $61,8^\circ$ ), Ситке ( $60^\circ$ ) и Колледже ( $64,7^\circ$ ). На рис. 83 записи этих всплесков рентгеновского излучения и бухт поглощения типа *M* в Кируне сопоставлены с данными риометрических измерений на м. Джонс, в Черчилле, Валь-д'Оре и Кол-



Р и с. 82. Три примера (14—16 сентября 1963 г.), показывающие связь утренних всплесков рентгеновского излучения с полярными суббуриями: 1 — всплески рентгеновского излучения по данным полетов аэростатов в Кируне; 2 — поглощение по данным риометра (27,6 Мгц) в Кируне; записи различных составляющих магнитного поля в Кируне (3), Черчилле (4), Минуке (5), Ситке (6) и Колледже (7) [8].

ледже. Отсутствие поглощения в Колледже не удивительно, так как эта станция в вечернем секторе располагается вне овала (в Колледже  $5^{\text{h}}\text{UT} = 19^{\text{h}}\text{LT}$ ).

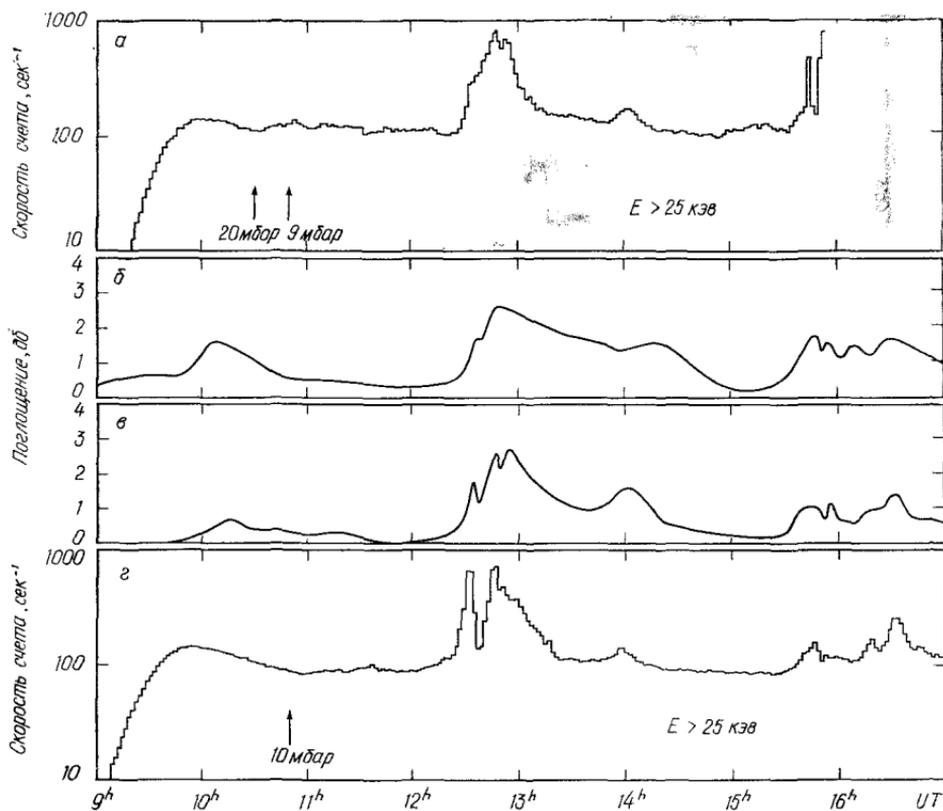
Было показано [9], что утренние всплески начинаются севернее  $L=6,5$  и затем движутся к экватору по крайней мере до  $L=4,5$  со скоростью около 500 м/сек. После максимального расширения к экватору поток электронов спадает, по-видимому, равномерно по всей площади, которая была охвачена во время фазы развития.



Р и с. 83. Три примера (14—16 сентября 1963 г.), показывающие связь утренних всплесков рентгеновского излучения с поглощением типа  $N$  в полуденном секторе. 1 — всплески рентгеновского излучения по данным полетов аэростатов в Кируне; 2—6 — поглощение космического радиоизлучения по данным риометров: 2 — Кируна (27,6 Мгц), 3 — м. Джонс (30 Мгц), 4 — Черчилл (30 Мгц), 5 — Вальд-Ор (30 Мгц), 6 — Колледж (30 Мгц). Стрелками обозначены моменты местной полночи [8].

### 5.7. Тонкая структура всплесков рентгеновского излучения

Как видно из рис. 75, для утренних всплесков рентгеновского излучения часто характерны квазирегулярные пульсации [7]. В некоторых случаях медленные пульсирующие всплески связаны с подобными пульсациями на риометрических и магнитных записях [6, 25].



Р и с. 84. Одновременные наблюдения всплесков рентгеновского излучения в геомагнитносопряженных областях (28 февраля 1964 г.)  
*а* — рентгеновское излучение по измерениям на аэростате, в Фэрбенкс (Колледж);  
*б* — поглощение по данным риометра в Колледже; *в* — поглощение по данным риометра в Коцебу; *г* — рентгеновское излучение (по измерениям на аэростате), о. Маккуори [12].

Сообщалось о наблюдениях единичных, двойных и групповых всплесков рентгеновского излучения длительностью меньше 1 сек [2, 26], которые Андерсон и Мильтон [2] назвали микровсплесками. Во многих случаях микровсплески характеризуются очень коротким временем роста (порядка 30 мсек) и медленным спадом (около 0,5 сек).

Паркс [20], используя установку с четырьмя узконаправленными детекторами, показал, что отдельному микровсплеску соответствует область вторжения радиусом  $\sim 40$  км на уровне генерации рентгеновского излучения. Он также отметил, что источники микровсплесков, по-видимому, иногда движутся со скоростью 10—100 км/сек; в одном случае микровсплески наблюдались при

прохождении через зенит дрейфующей к востоку полосы полярного сияния.

Паркс и др. [21] исследовали случаи появления микровсплесков при полетах аэростатов над Флин-Флоном (Манитоба, Канада), сопоставив их с изменением поглощения космического радионизлучения в Колледже. Оказалось, что с началом увеличения поглощения в Колледже наблюдается медленный рост рентгеновского излучения и что микровсплески появляются примерно на полчаса позже.

### 5.8. Рентгеновское излучение в геомагнитносопряженных областях

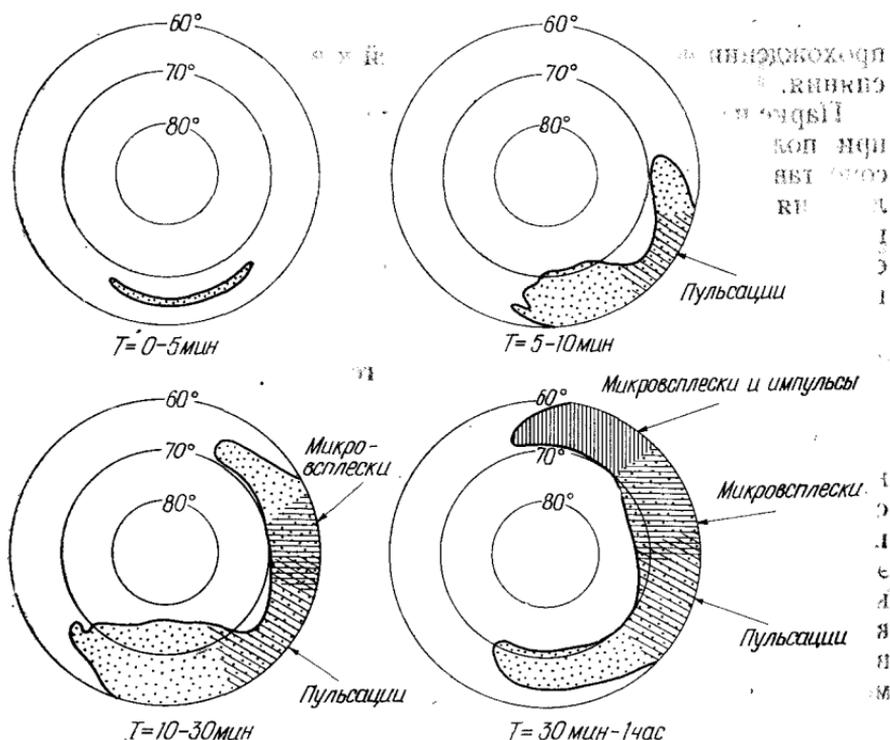
Всплески рентгеновского излучения в геомагнитносопряженных областях исследовались в работах [12—15]. Аэростаты запускались одновременно на о. Маккуори и в Колледже\*. На рис. 84 показан пример наблюдений всплесков рентгеновского излучения в этих областях. Общее сходство всплесков в Колледже и на о. Маккуори очевидно. Риометрическая запись в Коцебу, который ближе к точке сопряжения с о. Маккуори, дает хорошее совпадение даже в тонкой структуре. Однако было показано [15], что корреляции между микровсплесками в этих двух областях нет.

### 5.9. Развитие суббури в рентгеновском излучении

На рис. 85 приводится схематическая картина развития суббури по аэростатным наблюдениям рентгеновского излучения на высотах около 30 км. Во время самой ранней фазы суббури рентгеновское излучение может регистрироваться вдоль узкой полосы, где наблюдается первое проявление суббури в полярных сияниях. Затем область вторжения энергичных электронов расширяется по всем направлениям. В частности, расширение вдоль зоны сияний в утреннюю сторону продолжается до самого конца суббури. Как уже говорилось в разд. 4.8, очень важно установить точно скорость этого расширения. В работе [9] сообщалось, что высыпание начинается севернее  $L=6,5$  и затем движется к экватору.

---

\* Следует отметить, что геомагнитные долготы о. Маккуори и Колледжа различаются примерно на  $7^\circ$ , в связи с чем запуски аэростатов из этих районов нельзя, строго говоря, считать геомагнитносопряженными. В ходе советско-французских экспериментов в геомагнитносопряженных районах о. Кергелен — Архангельская область сопряженность положения аэростатов в северном и южном полушариях в период отдельных всплесков рентгеновского излучения была лучше 50 км (см. Ф. Камбу, Ж. Марал, И. А. Жулин, Ю. М. Копылов, Космические исследования, 8, № 4, 595 (1970). — Прим. ред.



Р и с. 85. Схематическая картина развития суббури в рентгеновском излучении.

По-видимому, существует одно важное различие между рис. 64 (ионосферная суббурия) и рис. 85 — отсутствие рентгеновского излучения вдоль овала полярных сияний. Рентгеновское излучение наблюдается вдоль вечерней части овала только вместе с движущимися к западу изгибами интенсивных полярных сияний, относящихся к типу *B*. В разд. 4.8 мы отмечали, что есть причины считать поглощение вдоль утренней части овала не очень интенсивным. Не ясно пока, объясняется ли это отсутствием жестких электронов или общим уменьшением потока электронов. В этой области не проводилось измерений рентгеновского излучения, которые могли бы прояснить этот вопрос. При построении рис. 85 мы предполагали, что в утренней части овала вторгаются электроны с мягким спектром (разд. 9.6).

Стратосферные измерения авроральных электронов имеют большие преимущества для исследований тонкой временной структуры вторжений, которую нельзя изучить каким-либо другим способом. В утренние часы поток вторгающихся электронов модулирован очень сложным образом. В ранние утренние часы на основное возрастание накладываются пульсации с периодом  $\sim 10 \text{ сек}$ ; такие

пульсации потока электронов наблюдаются и в утреннем секторе хвоста магнитосферы ([18]; разд. 9.4). В утренние часы очень часто наблюдаются микровсплески, появляющиеся примерно через полчаса после начала суббури [21]. Однако их протяженность по широте и вариации неизвестны; при построении рис. 85 предполагалось, что они появляются на всем сечении утренней полосы вторжения. Оливен и Гарнетт [19] показали, что микровсплески электронов с энергией 40 кэв всегда сопровождаются группами хоров ОНЧ-излучения (разд. 7.6). В полуденном секторе на микровсплески накладываются еще и резкие импульсные всплески.

#### ЛИТЕРАТУРА

##### Общая

Brown R. R., Electron precipitation in the auroral zone, *Space Sci. Rev.*, **5**, 311—387 (1966).

##### Цитированная в тексте

1. Anderson K. A., Energetic particles in the earth's magnetic field, Publ. Cosmic Ray Group, Dept. of Physics, Univ. of California, Berkeley, March 1966.
2. Anderson K. A., Milton D. W., Balloon observations of X-rays in the auroral zone. 3. High time resolution studies, *J. Geophys. Res.*, **69**, 4457—4479 (1964).
3. Anderson K. A., Chase L. M., Hudson H. S., Lampton M., Milton D. W., Parks G. K., Balloon and rocket observations of auroral-zone microbursts, *J. Geophys. Res.*, **71**, 4617—4629 (1966).
4. Barcus J. R., Observations of the relationship of energetic particle precipitation to auroral zone phenomena, Publ. Cosmic ray Group. Dept. of Physics, Univ. of California, Berkeley, June 1964.
5. Barcus J. R., Brown R. R., Energy spectrum for auroral-zone X-rays. 2. Spectral variability and auroral absorption, *J. Geophys. Res.*, **71**, 825—834 (1966).
6. Barcus J. R., Rosenberg T. J., Energy spectrum for auroral-zone X-rays. 1. Diurnal and type effects, *J. Geophys. Res.*, **71**, 803—823 (1966).
7. Barcus J. R., Brown R. R., Rosenberg T. J., Spatial and temporal character of fast variations in auroral-zone X-rays, *J. Geophys. Res.*, **71**, 125—141 (1966).
8. Bewersdorff A., Kremser G., Riedler W., Legrand J. P., Some properties of the slowly varying ionospheric absorption events in auroral zone, *Arkiv Geofysik*, **5**, 115—127 (1967).
9. Bewersdorff A., Kremser G., Stadsnes J., Trefall H., Ullaland S., Simultaneous balloon measurements of auroral X-rays during slowly varying ionospheric absorption events, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 591—607 (1968).
10. Brown R. R., Electron precipitation in the auroral zone, *Space Sci. Rev.*, **5**, 311—387 (1966).
11. Brown R. R., Campbell W. H., An auroral-zone electron precipitation event and its relationship to a magnetic bay, *J. Geophys. Res.*, **67**, 1357—1366 (1962).
12. Brown R. R., Barcus J. R., Parsons N. R., Balloon observations of auroral zone X-rays in conjugate regions. 1. Slow time variations, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2579—2598 (1965).

13. Brown R. R., Barcus J. R., Parsons N. R., Balloon observations of auroral zone X-rays in conjugate regions. 2. Microbursts and pulsations, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2599—2612 (1965).
14. Brown R. R., Anderson K. A., Anger C. D., Evans D. S., Simultaneous electron precipitation in the northern and southern auroral zones, *J. Geophys. Res.*, **68**, 2677—2684 (1963).
15. Brown R. R., Barcus J. R., Reid J., Parsons N. R., Observations of long-period pulsations of electron precipitation in conjugate regions of the auroral zones, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1246—1249 (1965).
16. Clark T. A., Anger C. D., Morphology of electron precipitation during auroral substorms, *Planet. Space Sci.*, **15**, 1287—1301 (1967).
17. Gosling J. T., Localization and motion of energetic electron precipitation during magnetic bays, *J. Geophys. Res.*, **71**, 835—848 (1966).
18. Lin R. P., Anderson K. A., Periodic modulations of the energetic electron fluxes in the distant radiation zone, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1827—1835 (1966).
19. Oliven M. N., Gurnett D. A., Microbursts Phenomena. 3. An association between microbursts and VLF chorus, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2355—2362 (1968).
20. Parks G. K., Spatial characteristics of auroral-zone X-ray microbursts, *J. Geophys. Res.*, **72**, 215—226 (1967).
21. Parks G. K., McPherron R. L., Anderson K. A., Relation of 5- to 40-second-period geomagnetic micropulsations and electron precipitation to the auroral substorm, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5743—5745 (1966).
22. Parks G. K., Milton D. W., Anderson K. A., Auroral-zone X-ray bursts of 5- to 25-millisecond duration, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4587 — 4589 (1967).
23. Parks G. K., Coroniti F. V., McPherron R. L., Anderson K. A., Studies of magnetospheric substorm. I. Characteristics of modulated energetic electron precipitation occurring during auroral substorms, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1685—1696 (1968).
24. Rosenberg T. J., Bjordal J., Kvifte G. J., On the coherency of X-ray and optical pulsations in auroras, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3504—3506 (1967).
25. Ullaland S. L., Trefall H., Kremser G., Bewersdorff A., Observations of large-scale coherent pulsating electron precipitation events in the auroral zone, accompanied by geomagnetic continuous pulsations, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 395—410 (1967).
26. Venkatesan D., Oliven M. N., Edwards P. J., McCracken K. G., Steinbock M., Microburst phenomena. 1. Auroral-zone X-rays, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2333—2343 (1968).
27. Winckler J. R., Peterson L., Hoffman R., Arnoldy R. L., Auroral X-rays, cosmic rays, and related phenomena during the storm of February 10—11, 1958 *J. Geophys. Res.*, **64**, 597—610 (1959).

# Суббуря в протонном полярном сиянии

## 6. 1. Введение

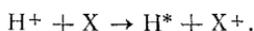
Бегард [31] и Гартлейн [11] одними из первых отождествили линии Бальмера  $H\alpha$ ,  $H\beta$  и  $H\gamma$  в спектре полярного сияния. Открытия доплеровского расширения [11] и доплеровского смещения линии  $H\alpha$  [13] были эпохальными событиями в физике полярных сияний. Эти результаты были приняты в качестве непосредственного доказательства, что появление полярных сияний обусловлено солнечными корпускулами, проникающими в геомагнитное поле. Это открытие привело к усиленному изучению возбуждения свечения полярных сияний приходящими протонами. Однако ученые пришли к выводу, что протоны не могут вызывать образование дуг полярных сияний [1, гл. 7; 20]. Действительно, ракетные наблюдения показали, что полярные сияния в виде дуг или полос обусловлены не протонами, а электронами [7, 12, 22]. Лишь сравнительно недавно были приведены доказательства, согласно которым эмиссия  $\lambda 5577\text{\AA}$  может быть обусловлена процессами, отличными от простого возбуждения атомов кислорода вторичными электронами [18, 19, 25, 26].

Линии водорода усилены в период первой фазы развития полярных сияний [11]. Интенсивные линии водорода наблюдаются в период спокойной однородной дуги, но обычно отсутствуют, когда дуга развивается в лучистую структуру [2, 13]. Позднее эти результаты подтвердились другими исследованиями, и было установлено, что протоны ответственны за образование спокойных дуг, а не активных форм сияний [9, 27, 32, 33].

Более детальные наблюдения с хорошими пространственным и временным разрешениями показали, что в ранние вечерние часы диффузная полоса, содержащая водородную эмиссию, появляется ближе к экватору, чем спокойные дуги [10, 17, 21, 23, 30]. Эта диффузная светящаяся полоса получила название *протонного*, или *водородного*, полярного сияния.

Если приходящие протоны имеют энергию больше 200 кэВ, то они ионизируют атмосферные частицы. Но при энергии ниже 200 кэВ или уменьшении ее вследствие потерь на ионизацию при

соударениях до менее 200 кэв становится существенным процесс перезарядки:

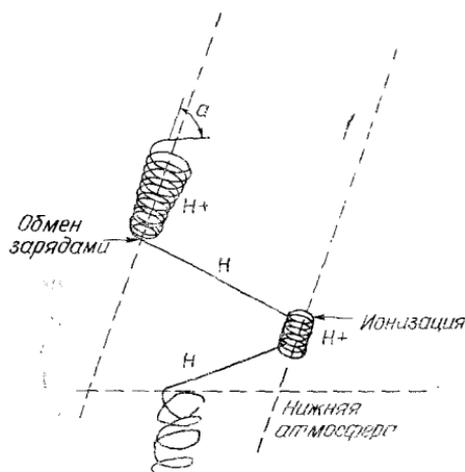


В результате протоны превращаются в энергичные нейтральные атомы водорода. Таким образом, протоны движутся по винтовой линии вниз вдоль геомагнитной силовой линии до тех пор, пока не произойдет перезарядка, а затем движутся по прямой линии в атмосфере до следующего столкновения. При этом атомы водорода могут излучать в серии Лаймана или Бальмера. Эмиссию Лаймана можно обнаруживать только аппаратурой с борта ракет или спутников. Если при следующем столкновении происходит обмен зарядов, нейтральные атомы водорода становятся опять протонами, и их движение управляется геомагнитными силовыми линиями до следующего столкновения, происходящего с обменом заряда:



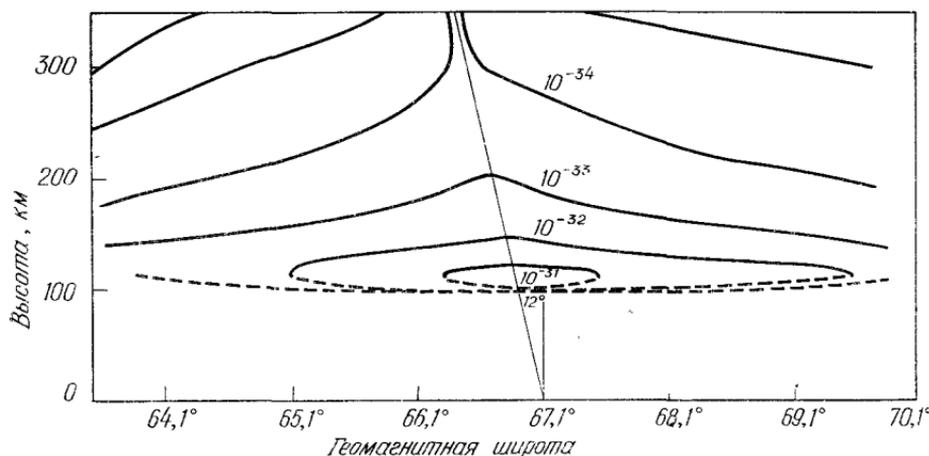
Кроме того, атомы водорода переходят в возбужденное состояние при столкновениях с частицами атмосферы. Переход в основное состояние происходит в результате излучения на определенной длине волны. Возбуждение при столкновениях с частицами атмосферы вносит существенный вклад в интенсивность линий водорода, наблюдаемых с поверхности Земли [28].

Описанная выше последовательность процессов может повторяться сотни раз, прежде чем атом водорода станет тепловой частицей. На рис. 86 схематически изображена часть траектории протона, инжектированного извне в полярную верхнюю атмосферу.



Р и с . 86. Схема, иллюстрирующая движение инжектированного протона от экваториальной плоскости в полярную верхнюю атмосферу [3].

Поскольку движение энергичных нейтральных атомов водорода не управляется геомагнитным полем, поток протонов, инжектированных в полярную атмосферу даже в виде очень тонкого слоя, стремится расширяться. Это приводит к появлению водородных эмиссий в очень широкой полосе. В этой полосе появляются также другие спектральные линии, обусловленные ионизацией или возбуждением атмосферных частиц протонами или энергичными нейтральными атомами водорода. На рис. 87 приведены результаты



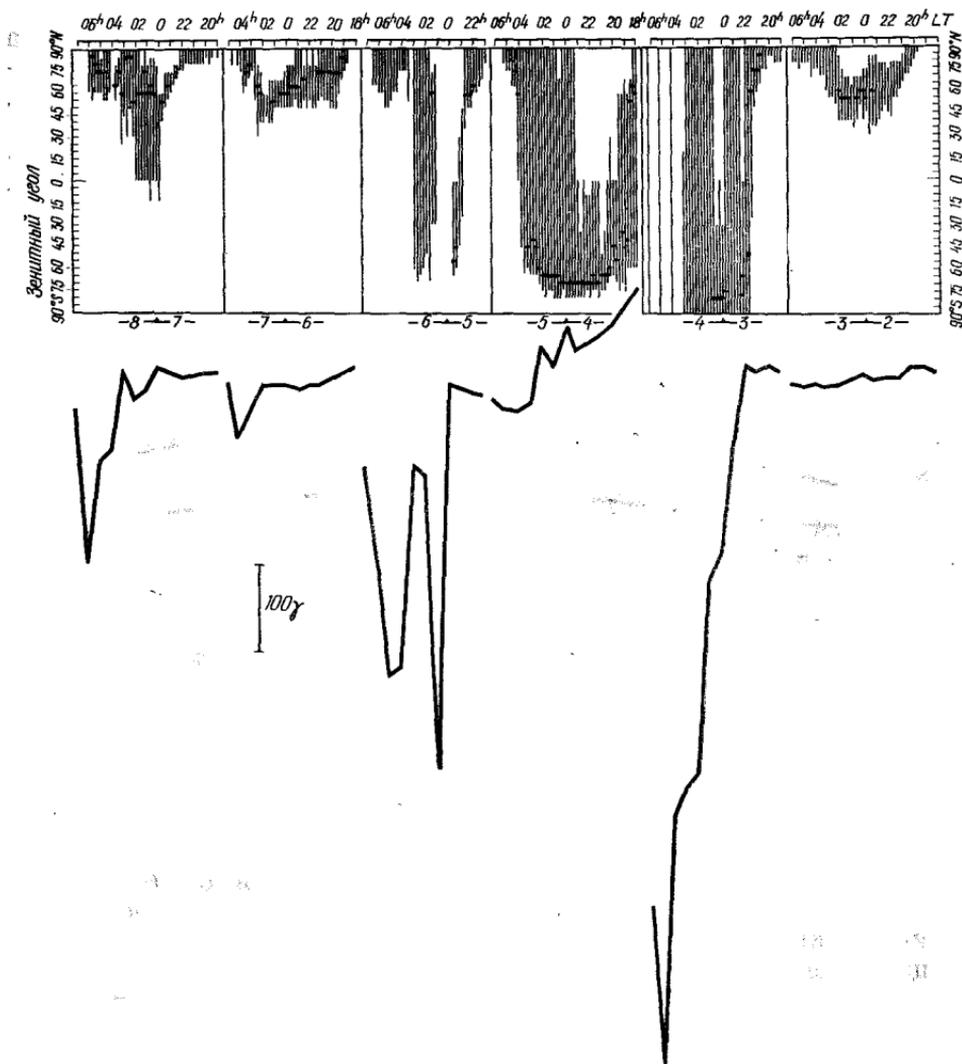
Р и с. 87. Распределение интенсивности ( $\text{эрг/протон} \cdot \text{см}^3$ )  $H\alpha$ , производимой протонами с энергией 10 кэв, инжектированными вдоль силовой линии, проецирующейся на геомагнитную широту  $67^\circ$  [3].

модельных вычислений Дэвидсона [3], показывающие меридиональное распределение интенсивности эмиссии  $H\alpha$  в результате инжекции протонов с энергией 10 кэв вдоль силовой линии, проецирующейся на геомагнитную широту  $67^\circ$ .

Протонное сияние обнаруживает заметные изменения в период суббури в полярных сияниях. Это явление — суббурия в протонном полярном сиянии — рассматривается в настоящей главе. Как отмечалось в разд. 1.3, протоны с энергиями порядка 1—50 кэв, по-видимому, играют ведущую роль в основных процессах, связанных с магнитосферной суббурей. Изучение суббури в протонном сиянии представляет интерес для определения поведения этих протонов.

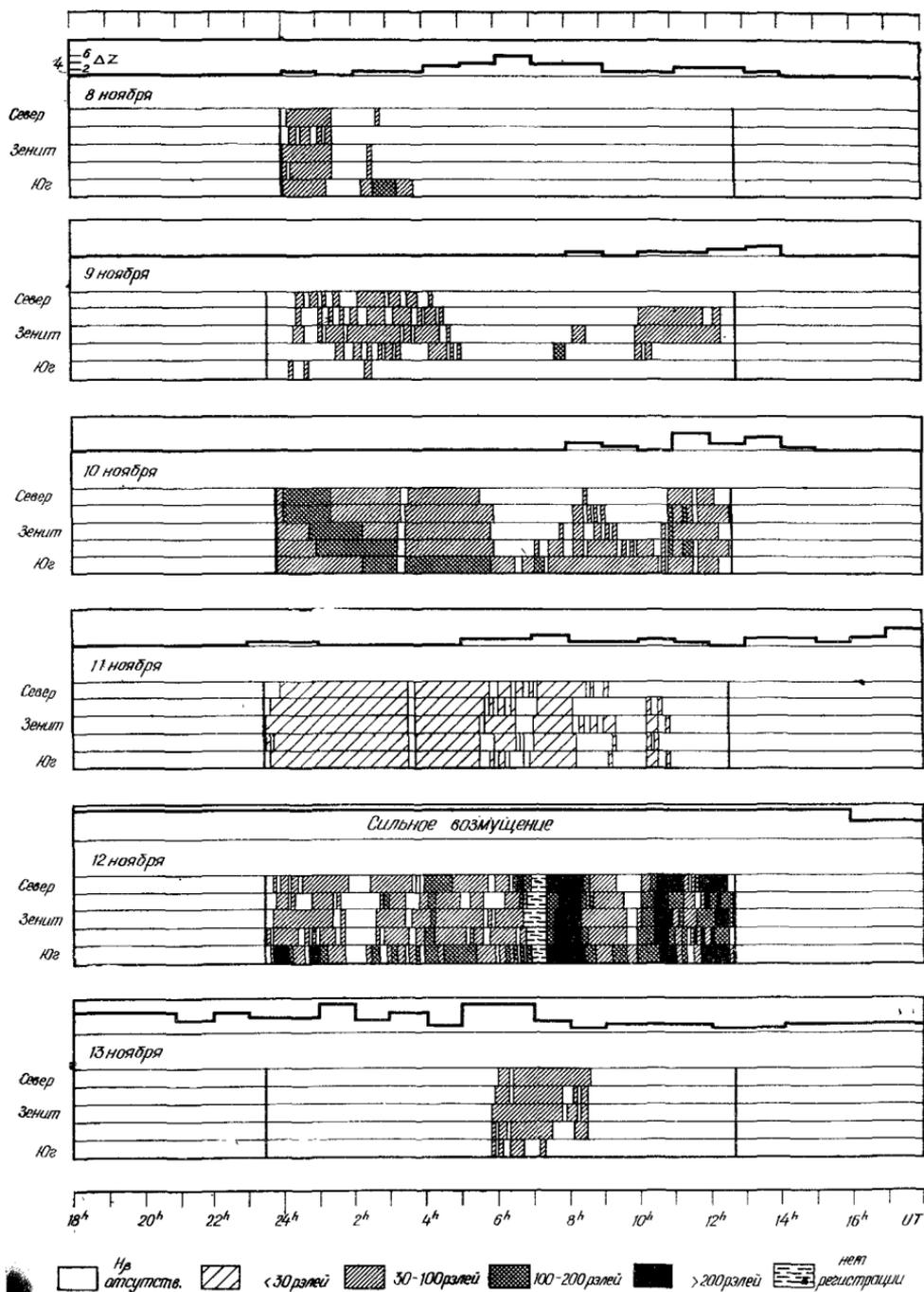
## 6.2. Типичная суточная вариация

На рис. 88 приведена суточная вариация эмиссии  $H\alpha$  вдоль меридиана в течение шести последовательных ночей (с ночи 2—3 декабря по 7—8 декабря 1958 г.) по наблюдениям в Колледже [23].



Р и с. 88. Суточная вариация меридиональной протяженности эмиссии  $H\alpha$  в течение шести последовательных ночей со 2 по 8 декабря 1958 г. в Колледже (вверху) и среднечасовые значения  $H$ -составляющей поля магнитной вариации (внизу) [23].

Имеет место отчетливо выраженное смещение области излучения к экватору в вечерние часы и к полюсу в утренние. Поскольку это явление подобно наблюдаемому в электронных сияниях, которые располагаются в овале полярных сияний, вполне возможно, что протонное сияние имеет эксцентричную овальную структуру относительно полюса [24]. Граница этой систематической суточной вариации меняется ото дня ко дню. Например, в ночи с 3 на 4,



Р и с. 89. Суточная вариация меридиональной протяженности эмиссии H $\beta$  для шести последовательных ночей в Черчилле [14].

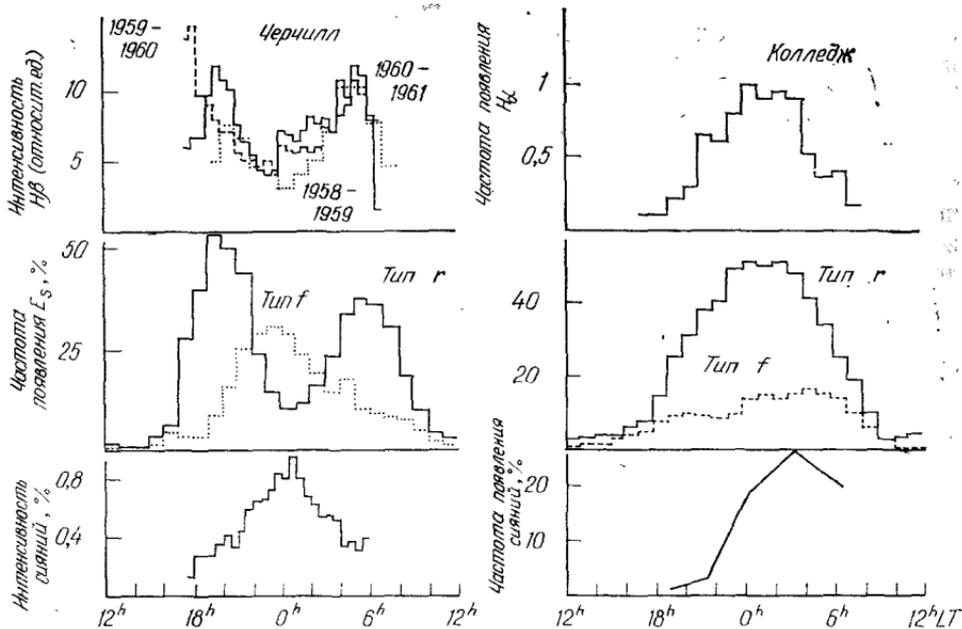
с 4 на 5, с 5 на 6 декабря экваториальная граница протонного сияния располагалась к югу от Колледжа, а в ночи с 2 на 3, с 6 на 7 и с 7 на 8 декабря она проходила в северной части небосвода. Кроме того, в определенные периоды в ночи с 3 на 4 и с 4 на 5 декабря протонная эмиссия наблюдалась в Колледже на значительной части небосвода. На рис. 89 приведен другой пример суточной вариации протонного полярного сияния в течение шести последовательных ночей по наблюдениям в Черчилле (гм. широта  $68,7^\circ$ ) [14]. Изменение положения протонного сияния в ночи с 9 на 10 и с 10 на 11 ноября аналогично изображенному на рис. 88. Однако в ночь с 12 на 13 ноября водородная эмиссия покрывала в Черчилле весь небосвод. Следует отметить, что интенсивность водородной эмиссии заметно меняется в течение ночи; в частности, в четыре момента времени около 4, 8, 11 и  $12^h$ UT интенсивность  $H\beta$  превосходила 100 *рэлей*.

### 6.3. Статистическая картина суточной вариации

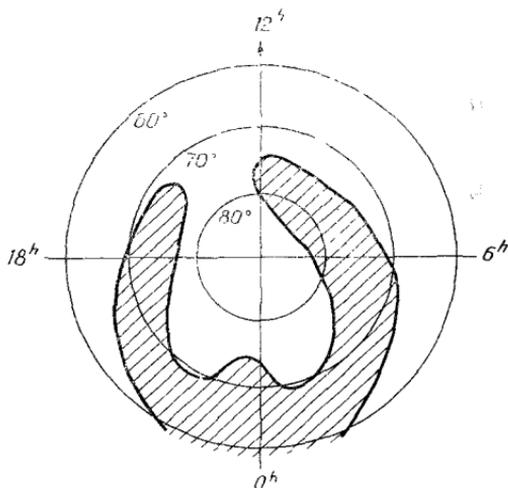
В разд. 6.2 отмечалось, что протонное полярное сияние характеризуется эксцентричной овальной структурой относительно полюса [24]. Если это соответствует действительности, то станция, расположенная на геомагнитной широте  $70^\circ$ , «пересекает» протонное сияние дважды в сутки. Было показано статистически [15], что в Черчилле интенсивность  $H\beta$  характеризуется двумя максимумами в течение суток: в 20 и  $4^h$ LT (рис. 90). Однако в Колледже наблюдается только один максимум интенсивности  $H\beta$  — около полуночи (рис. 90; см. также разд. 1.4 и рис. 7). Кроме того, появление спорадического слоя *E* с запаздыванием на высокочастотном краю имеет аналогичную суточную вариацию в частоте появления [15], так что, по-видимому, этот слой образуется при протонной бомбардировке верхней атмосферы. Овальная структура протонного свечения отмечалась также Евлашиным [34].

На рис. 91 нанесена область появления водородной эмиссии на полярную проекцию в координатах геомагнитная широта — время [6]. Нет сомнения, что спутниковые наблюдения протонов или водородных эмиссий уточнят в будущем это распределение. Шарп и др. [29] наблюдали узкую полосу вторжения протонов, которая в полуденном секторе располагалась на геомагнитной широте  $70^\circ$ , а также в виде узкой полосы на геомагнитной широте  $77^\circ$ , что соответствует положению овала полярных сияний (разд. 9.6). Вполне вероятно, что протоны, вторгающиеся в полосу на геомагнитной широте  $70^\circ$ , просачиваются из кольцевого тока. К сожалению, геометрическая взаимосвязь между этой полосой и овальным поясом не известна.

Широко обсуждался вопрос о том, пересекаются ли овал полярных сияний и протонное сияние в полуночном секторе [16, 30].



Р и с. 90. Вверху — суточные вариации водородной эмиссии. В центре — частота появления спорадического слоя *E* типов *r* и *f* (%). Внизу — суточные вариации интенсивности и частоты появления сияний (относительные единицы) [15].



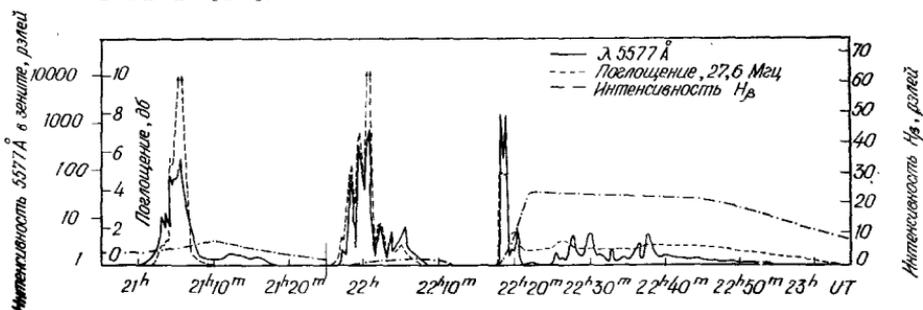
Р и с. 91. Распределение прогонного полярного сияния в координатах широта — время экваториального диполя [6].

Среди исследователей нет разногласий в том, что протонное сияние появляется к экватору от овала полярных сияний в вечерние часы. Однако положение протонного сияния относительно овала весьма неопределенно в утреннем секторе. Поскольку поведение как визуальных сияний в овале, так и протонных сияний в течение суббури очень сложно, трудно точно определить положение протонного сияния относительно электронного. Изучение распределения интенсивности водородных эмиссий в спокойный период между двумя суббурами необходимо для решения этой важной проблемы. Следует иметь в виду, что существуют два пояса вторжения протонов [29] (см. также разд. 9.6) и что поведение этих поясов в период суббурь может быть существенно различным.

#### 6. 4. Протоны в выпуклости полярных сияний и в пятнах

Как отмечалось в разд. 6.2, протонные сияния с уверенностью отождествляются в вечернем секторе. Однако существуют некоторые расхождения относительно поведения протонного свечения в период суббури в полуночном секторе.

На основании данных меридионального спектрографа, работавшего в Саскатуне (гм. широта  $60^\circ$ ), показано, что водородные эмиссии медленно ослабевали в период, когда над станцией располагалась выпуклость полярных сияний [17]. В работе [17] детально рассмотрены результаты регистрации свечения в Саскатуне в ночь с 28 на 29 апреля 1960 г. В ранние вечерние часы зона водородных эмиссий располагалась значительно южнее яркого свечения полярных сияний и была связана визуально с более слабой однородной дугой, совпадающей с максимумом водородной эмиссии. Суббурия в полярных сияниях началась около  $23^h35^m$  LT, и активные сияния покрывали все небо. Полученные в этот период спектры указывают на существование очень яркого сияния, охватившего в течение 20 мин весь небосвод, в то время как водородная эмиссия медленно ослабевала [17].



Р и с. 92. Пример суточной вариации в зените интенсивности эмиссий  $\lambda 5577\text{Å}$ ,  $^{\circ}\text{H}\beta$  и поглощения космического радиоизлучения на частоте 27,6 МГц [15].

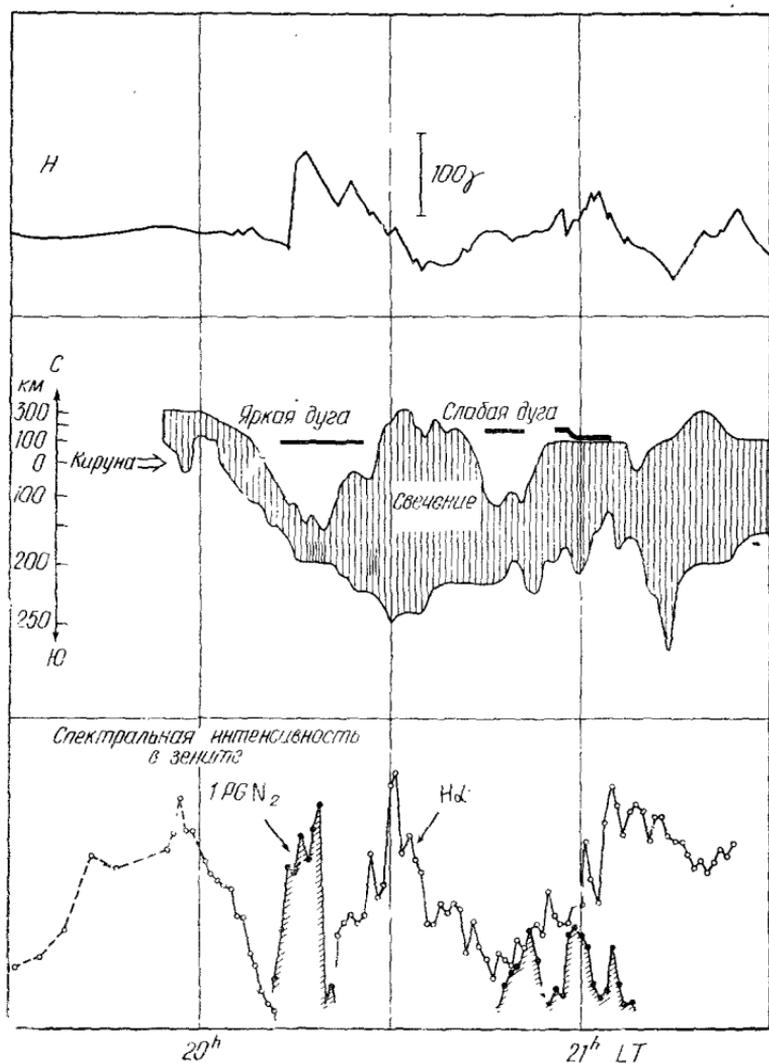
На основании фотометрических наблюдений в Моусоне (гм. широта  $73, 1^\circ$ ) было найдено, что интенсивность  $H\beta$  увеличивается по всему небосводу в течение полярных сияний и после их распада [5]. На рис. 92 приведен пример суточной вариации (27 июля 1963 г.) интенсивности в зените эмиссии  $\lambda 5577\text{\AA}$ , линии  $H\beta$  и поглощения космического радиоизлучения на частоте  $27,6 \text{ Мгц}$ . Все три величины возрастают около  $22^{\text{h}}18^{\text{m}}\text{UT}$ . В дальнейшем интенсивность  $H\beta$  оставалась на высоком уровне даже после того, как интенсивность  $\lambda 5577\text{\AA}$  заметно уменьшилась. Как отмечалось [4], интенсивность  $H\beta$  остается довольно постоянной в области, в которой существуют пульсирующие пятна сияний.

### 6. 5. Протоны и перемещающиеся к западу изгибы

Существует «поздний распад сияния» в течение ночи, который связан с водородной эмиссией [5]. На рис. 92 вариация интенсивности  $H\beta$  плохо соответствует изменению поглощения в течение двух первых суббурь. Можно заключить, что «распад» этих сияний, не связанный с увеличением интенсивности  $H\beta$ , есть проявление активности полярных сияний, сопровождающееся движущимся к западу изгибом или вторичной активностью в вечерние часы, которая обусловлена расширяющейся выпуклостью полярных сияний. Когда овал полярных сияний в вечерние часы располагается около Моусона (гм. широта  $73,1^\circ$ ), центральная линия протонного свечения проходит к экватору от станции. Изгибы сияний перемещаются над Моусоном вдоль овала, так что фотометр или риометр в состоянии их обнаружить в вечерние часы. Поэтому, за исключением случаев, когда протонное сияние охватывает большой интервал широт или изгибы содержат водородную эмиссию, зенитный фотометр в Моусоне не был в состоянии обнаружить эмиссию  $H\beta$ .

Усиление интенсивности  $H\beta$  в период «позднего распада» в Моусоне объясняется тем, что выпуклость в полярном сиянии движется к полюсу, проходя над Моусоном, и при этом имеет место заметное вторжение протонов в выпуклость. Полуночная выпуклость на рис. 91 показывает расширение к полюсу области вторжения протонов.

На рис. 93 приведены наблюдения протонного сияния в вечерние часы в Кируне (гм. широта  $65,3^\circ$ ) [21]. Наблюдалось быстрое движение протонного сияния к экватору через зенит обсерватории Кируна, которое началось около  $20^{\text{h}}05^{\text{m}}\text{LT}$ . В  $20^{\text{h}}14^{\text{m}}\text{LT}$  произошло внезапное возрастание  $H$ -составляющей магнитного поля, а яркая дуга появилась к северу от Кируны. Из сопоставления с данными, приведенными в разд. 2.3 (см. рис. 28), следует, что в данном случае движущийся к западу изгиб перемещался к северу от Кируны. Несколько минут спустя после максимума в вариации  $H$ -компоненты



Р и с. 93. Протонное сияние, наблюдавшееся в вечерние часы в Кируне 11 марта 1961 г., в предположении, что высота сияния 100 км [21].

протонное сияние распространилось как к северу, так и к югу. Такое движение сияний было обнаружено спектральными наблюдениями в Кируне.

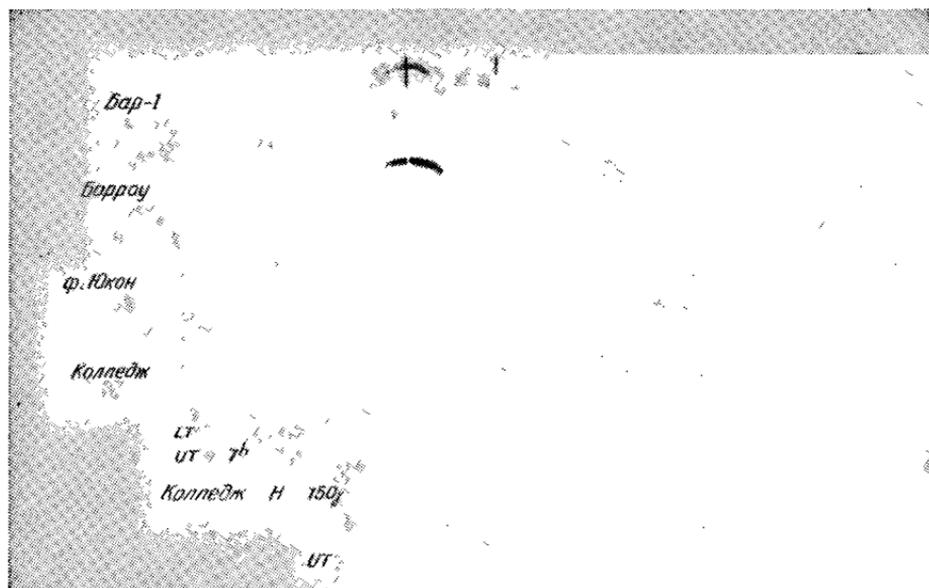
На рис. 94 приведены фотографии, сделанные камерами полного обзора неба на станциях Бар-1 и Колледж в вечерние часы в ночь с 21 на 22 октября 1965 г. Станция Бар-1 располагается на 600 км севернее Колледжа. В 8<sup>h</sup>00<sup>m</sup>UT одна и та же дуга видна к югу от



Р и с. 94. Взаимосвязь между протонным полярным сиянием и движущимся к западу изгибом 22 октября 1965 г.

Бар-1 и к северу от Колледжа. Фотографии с 8<sup>h</sup>30<sup>m</sup> до 9<sup>h</sup>30<sup>m</sup> UT указывают на появление движущегося к западу изгиба, который быстро перемещался вдоль дуги и охватил весь небосвод над стан-

цией Бар-1. В Колледже только южная часть изгиба была видна у северного горизонта. Однако в  $8^{\text{h}}15^{\text{m}}\text{UT}$  слабое свечение появилось к югу от Колледжа и стало очень интенсивным в  $8^{\text{h}}45^{\text{m}}\text{UT}$ . Одновременно фотометр  $\text{H}\beta$  показал, что это свечение содержит водородную эмиссию, тогда как в изгибе она отсутствует. Магнитометр в Колледже зарегистрировал постепенное возрастание  $H$ -компоненты, которое началось в  $7^{\text{h}}55^{\text{m}}\text{UT}$ . Возрастание внезапно



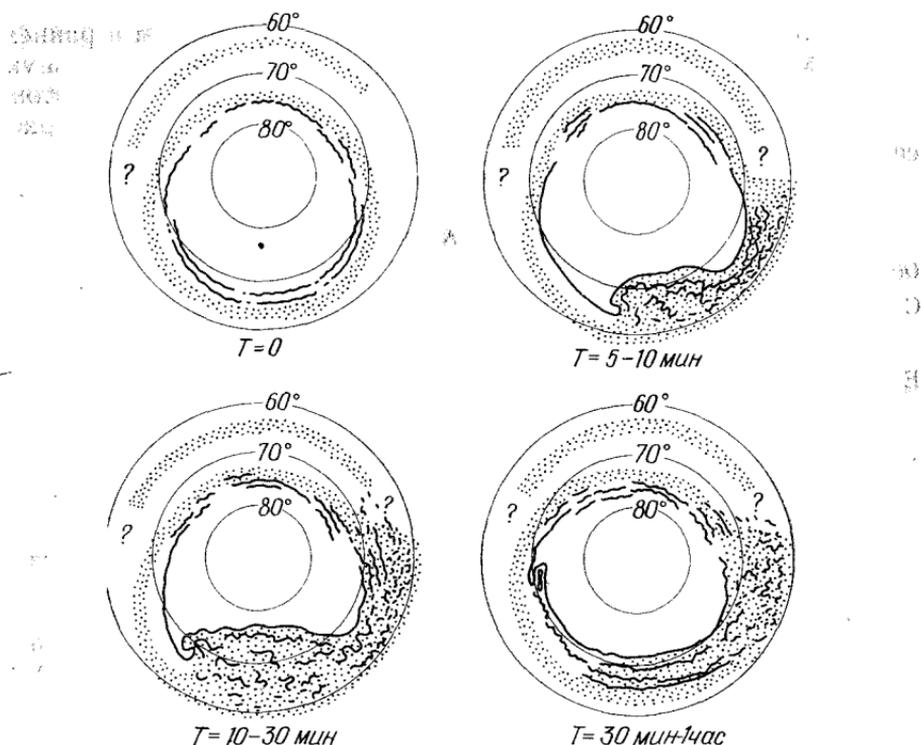
Р и с. 95. Взаимосвязь между протонным полярным сиянием и движущимся к западу изгибом 4 февраля 1965 г.

усилилось около  $8^{\text{h}}25^{\text{m}}\text{UT}$ . Это согласуется с данными, приведенными на рис. 93.

На рис. 95 приведен другой пример протонной суббури, зарегистрированной на четырех аляскинских станциях. Интенсивный изгиб наблюдался около зенита станции Бар-1 в  $7^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT}$  ( $21^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{LT}$ ) и в  $10^{\text{h}}01^{\text{m}}\text{UT}$  ( $0^{\text{h}}01^{\text{m}}\text{LT}$ ). Диффузное свечение отчетливо видно несколько к югу от Колледжа в  $7^{\text{h}}30^{\text{m}}$  и  $9^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT}$ . Соответствующая запись  $H$ -компоненты в Колледже указывает на положительную вариацию в обоих случаях.

## 6. 6. Развитие суббури в протонном полярном сиянии

Удобно рассмотреть развитие суббури в протонном сиянии в зависимости от времени протекания суббури. На рис. 96 область



Р и с. 96. Развитие суббури в протонном полярном сиянии.

вторжения протонов показана для четырех стадий развития суббури.

В период между двумя суббурями вторжение протонов происходит вдоль овальной полосы, которая располагается несколько экваториальнее овала полярных сияний. Нанесена также полоса вторжения протонов, найденная Шарпом и др. [29], хотя связь между протонным сиянием и этой зоной вторжения неясна. На полуночном меридиане вторжение происходит во всей области выпуклости полярного сияния, так что район вторжения быстро расширяется к полюсу. В вечернем секторе протонное сияние быстро смещается к экватору в начальной фазе суббури. Однако движущийся к западу изгиб, который проникает далеко в вечерний сектор, вероятно, не содержит водородных эмиссий. В утреннем секторе водородные эмиссии появляются, по-видимому, на значительной площади. Интенсивность водородной эмиссии остается почти постоянной, хотя интенсивность свечения окружающих пятен может пульсировать [4]. Однако величина площади, на которую происходит вторжение в утренние часы, не известна.

Как будет показано в разд. 9.2, протоны в полуночном и раннем утреннем секторах кольцевого тока внезапно исчезают в начальную фазу развития полярной суббури. Возможно, что суббуря в протонных сияниях обусловлена частично этими протонами, которые распадаются из кольцевого тока по направлению к Земле.

#### ЛИТЕРАТУРА

##### Общая

- Chamberlain J. W., *Physics of the aurora and airglow*, Academic Press, New York, 1961. (Русский перевод: Дж. Чемберлен, Физика полярных сияний и излучения атмосферы, ИЛ, М., 1963.)  
 Eather R. H., Auroral proton precipitation and hydrogen emissions, *Rev. Geophys.*, **5**, 207—285 (1967).

##### Цитированная литература

1. Chamberlain J. W., *Physics of the aurora and airglow*, Academic Press, New York, 1961. (Русский перевод см. выше)
2. Dahlstrom C. E., Hunten D. M.,  $O_2^+$  and H in the auroral spectrum, *Phys. Rev.*, **84**, 378—879 (1951).
3. Davidson G. T., Expected spatial distribution of low-energy protons precipitated in the auroral zones, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1061—1068 (1965).
4. Eather R. H., Auroral proton precipitation and hydrogen emissions, *Rev. Geophys.*, **5**, 207—285 (1967).
5. Eather R. H., Jacka F., Auroral absorption of cosmic radio noise, *Austral. J. Phys.*, **19**, 215—239 (1966).
6. Eather R. H., Sandford B. R., The zone of hydrogen emission in the night sky, *Austral. J. Phys.*, **19**, 25—33 (1966).
7. Evans D. S., The observations of a near monoenergetic flux of auroral electrons, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2315—2323 (1968).
8. Fan C. Y., Schulte D. H., Variations in the auroral spectrum, *Astrophys. J.*, **120**, 563—565 (1954).
9. Гальперин Ю. И., Hydrogen emission and two types of auroral spectra, *Planet. Space Sci.*, **1**, 57—62 (1959).
10. Гальперин Ю. И., Proton bombardment in aurora, *Planet. Space Sci.*, **10**, 187—193 (1963).
11. Gartlein C. W., Auroral spectra showing broad hydrogen lines, *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **31**, 18—20 (1950).
12. McIlwain C. E., Direct measurement of particles producing visible auroras, *J. Geophys. Res.*, **65**, 2727—2747 (1960).
13. Meinel A. B., Doppler-shifted auroral hydrogen emission, *Astrophys. J.*, **113**, 50—54 (1951).
14. Montalbetti R., McEwen D. J., Hydrogen emission during the period November 9—16, 1960, *Canadian J. Phys.*, **39**, 617—619 (1961).
15. Montalbetti R., McEwen D. J., Hydrogen emissions and sporadic E layer behaviour, *J. Phys. Soc. Japan*, **17**, Suppl. A-1, 212—215 (1962).
16. Montalbetti R., Vallance Jones A., H $\alpha$  emissions during aurorae over west-central Canada, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **11**, 43—50 (1957).
17. Montbriand L. E., Vallance Jones A., Studies of auroral hydrogen emissions in west-central Canada, 1. Time and geographical variations, *Canadian J. Phys.*, **40**, 1401—1410 (1962).
18. Mozer F. S., Bruston P., Electric field measurements in the auroral ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1109—1114 (1967).

19. Murraya W. B., Spatial relationship of auroral OI and  $N_2^+$  emissions, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1047—1051 (1967).
20. Omholt A., Studies on the excitation of aurora borealis, 1. The hydrogen lines, *Geofys. Publikasjoner*, **20**, 1—40 (1959).
21. Omholt A., Stoffregen W., Derblom H., Hydrogen lines in auroral glow, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **24**, 203—209 (1962).
22. Pfister W., Auroral investigations by means of rockets, *Space Sci. Rev.*, **7**, 642—688 (1967).
23. Rees M. H., Belon A. E., Romick G. J., The systematic behaviour of hydrogen emission in the aurora. I, *Planet. Space Sci.*, **5**, 87—91 (1961).
24. Reid G. C., Rees M. H., The systematic behaviour of hydrogen emission in the aurora. II, *Planet. Space Sci.*, **5**, 99—104 (1961).
25. Romick G. J., Belon A. E., The spatial variation of auroral luminosity, I. The behavior of synthetic model auroras, *Planet. Space Sci.*, **15**, 475—493 (1967).
26. Romick G. J., Belon A. E., The spatial variations of auroral luminosity, II. Determination of volume emission rate profiles, *Planet. Space Sci.*, **15**, 1695—1710 (1967).
27. Romick G. J., Elvey C. T., Variations in the intensity of the hydrogen emission line H $\beta$  during auroral activity, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **12**, 283—287 (1958).
28. Romick G. J., Sharp R. D., Simultaneous measurements of an incident hydrogen flux and the resulting hydrogen Balmer alpha emission in an auroral hydrogen arc, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4791—4801 (1967).
29. Sharp R. D., Johnson R. G., Shea M. F., Shook G. B., Satellite measurements of precipitating protons in the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **72**, 227—237 (1967).
30. Stoffregen W., Derblom H., Auroral hydrogen emission related to charge separation in the magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, **9**, 711—716 (1962).
31. Vegard L., Hydrogen showers in the auroral region, *Nature*, **144**, 1089—1090 (1939).
32. Вайсберг О. Л., Спектро-электрофотометрические исследования водородной эмиссии в полярных сияниях, сб. «Полярные сияния и свечение всего неба», Изд-во АН СССР, **8**, 36—42 (1962).
33. Евлашин Л. С., Пространственно-временные вариации водорода в полярных сияниях и их связь с магнитными возмущениями, *Геомagnetизм и аэрoномия*, **1**, 54—58 (1961).
34. Евлашин Л. С., Некоторые закономерности поведения водородной эмиссии в полярных сияниях, *Геомagnetизм и аэрoномия*, **3**, 405—408 (1963).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Badhwar G. D., Denev C. L., Kaplan M. F., Flux hydrogen, helium, and electrons at Fort Churchill in 1967, *J. Geophys. Res.*, **74**, 369—371 (1969).
- Bernstein W., Inouye G. T., Sanders N. L., Wax R. L., Measurements of precipitated 1—20 keV protons and electrons during a breakup aurora, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3601—3608 (1969).
- Chubb T. A., Hicks G. T., Observations of the aurora in the far ultraviolet from OGO4, *J. Geophys. Res.* **75**, 1290—1311 (1970).
- Derblom H., On the location of hydrogen emission with respect to auroral forms, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, Sandefjord, Norway, eds. A. Egeland, J. Holtet, Sept. 1967, 63—66.
- Eather R. H., Hydrogen emission in pulsating auroras, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 67—74.

- Meyerott R. E., Evans J. E., Coordinated measurements of particles, luminosity, and electron concentrations, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 119—130.
- Riedler W., Hultqvist B., First results of 1 and 6 kev proton measurements from the ESRO 1 (aurorae) satellite, KGO Rep. № 696, June 1969.
- Sharp R. D., Carr D. L., Johnson R. G., Satellite observations of the average properties of auroral particle precipitations: latitudinal variations, J. Geophys. Res., **74**, 4618—4630 (1969).
- Tsuruda M., Kaneda E., Hydrogen emission preceding auroral break-up, Rep. Ionosph. Space Res. Japan, **22**, 289—294 (1968).
- Jones Vallance A., Auroral spectroscopy, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 47—62.
- Wiens R. H., Jones Vallance A., Studies of auroral hydrogen emissions in west-central Canada, III. Proton and electron auroral ovals, Rep. Dept. Phys. Univ. Saskatchewan, 1969.
- Евлашин Л. С., On the character of auroral glow within the auroral region at periods of solar activity maximum and minimum, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 47—50.

# Суббурия

## в ОНЧ-излучении

### 7. 1. Введение

Радиоизлучение атмосферы на частотах в несколько килогерц, тесно связанное с усилением авроральной и магнитной активности, одними из первых обнаружили Уатс [19] и Эллис [1, 2]. Эллис показал [2], что это излучение появляется в виде всплесков и что некоторые всплески хорошо коррелируют с усилением свечения атмосферы в красной линии кислорода ( $\lambda 6300\text{Å}$ ). Длительность большинства всплесков составляет около 3 час, хотя некоторые из них продолжались до 15 час. Эти особенности дают серьезные основания полагать, что очень низкочастотные ОНЧ-излучения (или VLF — very low frequency) связаны с полярными суббуриями.

Излучение в области очень низких частот широко изучалось рядом исследователей. Следуя Гарнету [4], будем называть излучение на частотах ниже 2 кГц КНЧ-излучением (ELF extremely low frequency — крайне низкочастотное), а на частотах выше 2 кГц — ОНЧ-излучением. Многие работы, выполненные до 1965 г., рассмотрены в монографии [7], где в табл. 7.1 приведены примеры ОНЧ- и КНЧ-излучений различных типов и дана их классификация.

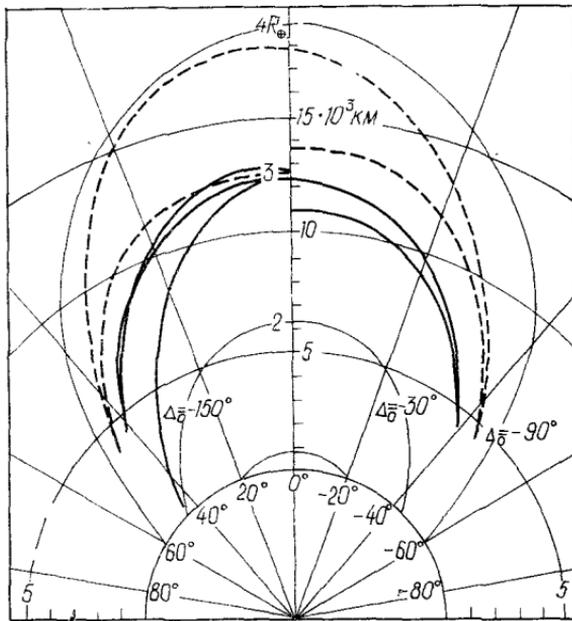
В этой главе мы будем рассматривать в основном два типа ОНЧ- и КНЧ-излучений: *шипения*, или хиссы (hiss), и *хоры* (chorus)\*. Хелливэл [7] дал следующие определения этим излучениям.

Шипение — это излучение, частотный спектр которого напоминает спектр теплового шума в ограниченной полосе частот. На слух это излучение воспринимается как шипение.

---

\* Следует заметить, что классификация ОНЧ- и КНЧ-излучений, так же как и названия отдельных видов излучений, еще не установились. Аппаратура, используемая отдельными исследователями, не унифицирована, в связи с чем результаты, получаемые разными авторами, не всегда сопоставимы. Не всегда удается выявить разные по своей природе излучения, относящиеся к одному и тому же диапазону частот. Так, очень низкочастотные шипения, связанные с полярными сияниями, обычно занимают диапазон 1,5—2 кГц, а шипения, связанные с циклотронной неустойчивостью в радиационных поясах, 1—6 кГц. В этом отношении очень полезен анализ сонограмм — динамических частотных спектров излучений. К сожалению соответствующие данные пока очень немногочисленны. — Прим. ред.



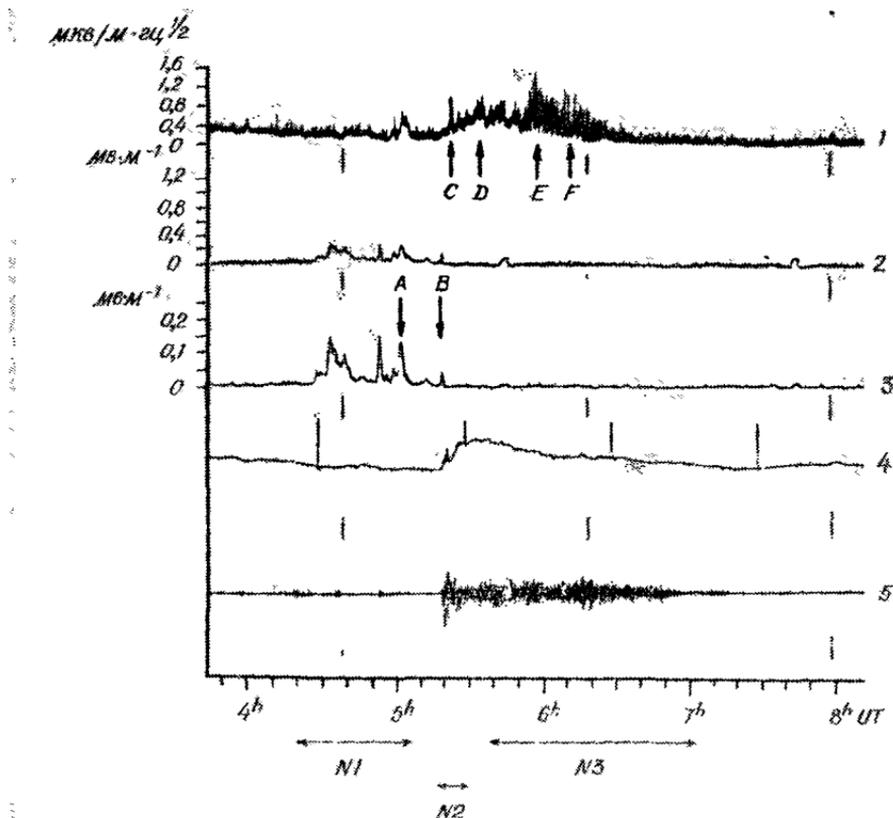


Р и с . 98. Расчетные пути распространения волны с частотой 5 кГц, возбужденной в экваториальной плоскости ( $\theta_0=0$ ) на геоцентрическом расстоянии  $3R_{\oplus}$  для трех начальных значений угла  $\Delta_0$  между волновой нормалью и радиусом-вектором [16, модель 1].

Если распределение электронов и ионов не столь близко к однородному, как предполагалось в этих расчетах, то пути распространения волн могут быть совершенно иными, чем показано на рис. 98. Волны могут, например, захватываться уплотнениями ионизации вдоль силовых линий геомагнитного поля [17]. К тому же вдоль пути распространения волн могут возникать различные физические процессы. Так, нетепловые частицы, встречающиеся на пути распространения некоторых очень низкочастотных волн, могут вступать с последними во взаимодействие вследствие циклотронно-резонансного механизма [10]. К сожалению, механизмы, ответственные за такие ОНЧ-излучения, изучены недостаточно.

## 7. 2. Типичная суточная вариация

Морозуми [12] разделил ОНЧ-излучения на ночной  $N$  и дневной  $D$  типы. Излучения типа  $N$  в свою очередь были подразделены на  $N1$ ,  $N2$  и  $N3$ . Типичный пример явления типа  $N$  и других одновременно наблюдавшихся явлений представлен на рис. 99. ОНЧ-излучение на частоте 1 кГц с шириной полосы около 100 кГц (кривая 1) было определено Морозуми как хор [12]. ОНЧ-излучение в широ-



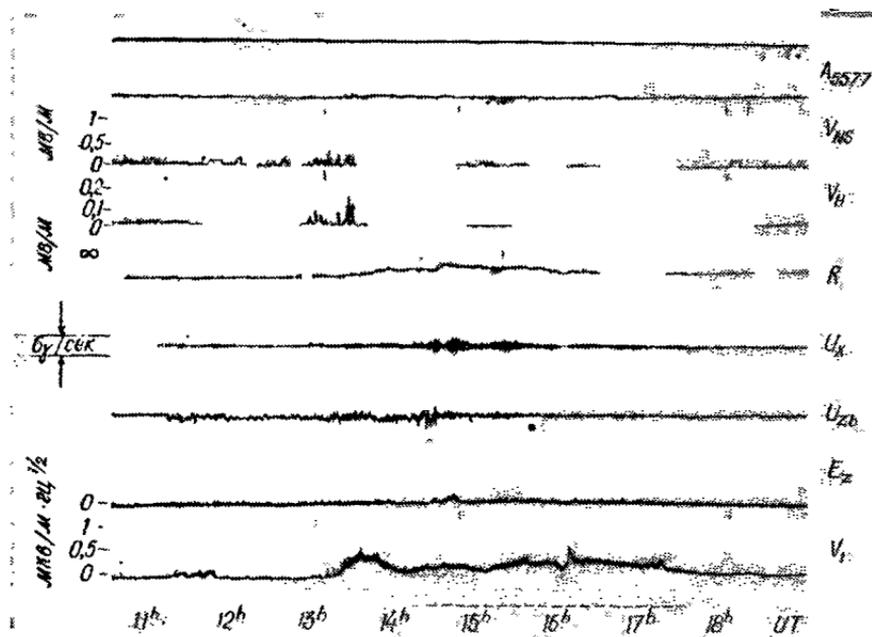
Р и с . 99. Типичный пример ОНЧ-излучения типа *N* (2 июня 1963 г.) [12].

1 — ОНЧ-излучение на частоте 1 *кГц* с шириной полосы  $\sim 100$  *Гц*; 2 — очень низкочастотное излучение в широкой полосе частот (от 1 до 25 *кГц*), зарегистрированное при помощи рамочной антенны, ориентированной в направлении север — юг; 3 — то же излучение, зарегистрированное антенной, ориентированной вдоль *H*-составляющей магнитного поля; 4 — поглощение по риометру; 5 — микропульсации в *X*-составляющей геомагнитного поля (0,02—5 *Гц*)

кой полосе частот от 1 до 25 *кГц* (кривые 2 и 3) было определено как шипение\*.

Явление типа *N1* характеризуется появлением шипения без значительных хоров, увеличения поглощения космического радиополосы и микропульсаций геомагнитного поля. Наиболее часто явления этого типа наблюдаются в вечерние часы. Явление типа *N2* связано с распадом полярного сияния (взрывное движение

\* При обобщении выводов Морозуми следует иметь в виду примечание редактора на стр. 179. В диапазоне частот менее 1 *кГц* могут наблюдаться как хоры, так и шипения. — Прим. ред.



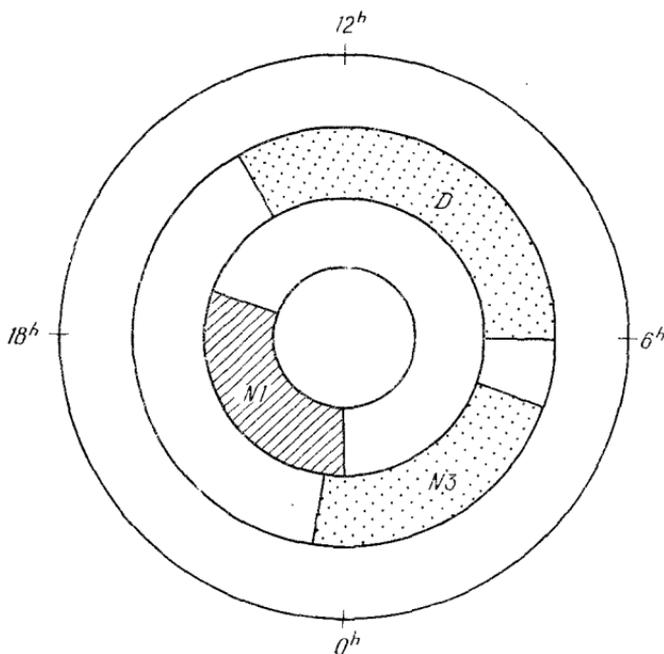
Р и с. 100. Пример явления типа *D* (18 июня 1963 г.). Кривая *R* — поглощение космического радиоизлучения; кривая  $V_1$  — хор; кривая  $A_{5577}$  — интенсивность свечения в зеленой линии.

к полюсу), отрицательной магнитной бухтой и увеличением поглощения космического радиоизлучения типа *N*. В общем для явлений этого типа характерно появление очень короткого всплеска шипения, кратковременность которого, вероятно, обусловлена поглощением очень низкочастотных излучений за счет возрастания ионизации в нижней ионосфере. Это ясно видно из риометрической записи (кривая 4) на рис. 99. Шипение в области ОНЧ началось в  $5^{\text{h}}19^{\text{m}}\text{UT}$  и продолжалось всего около 1 мин. Явление типа *N3* характеризуется появлением хора и наблюдается после распада полярного сияния. Отмечалось [14], что явление типа *N3* связано с интенсивным поглощением космического радиоизлучения без усиления свечения полярного сияния. Такое развитие соответствует, очевидно, ионосферной суббуре типа *M* (разд. 4.6). На рис. 99 явление *N3* началось в  $5^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT}$  и продолжалось до  $7^{\text{h}}\text{UT}$ .

Явление типа *D* характеризуется хором в диапазоне ОНЧ и увеличением поглощения космического радиоизлучения. Пример такого явления представлен на рис. 100. Весьма вероятно, что явление типа *D* связано с поглощением типа *M*, наблюдающимся в поздние утренние часы. Действительно, явления типов *N3* и *D* имеют много общего [12].

### 7. 3. Статистическая картина суточной вариации

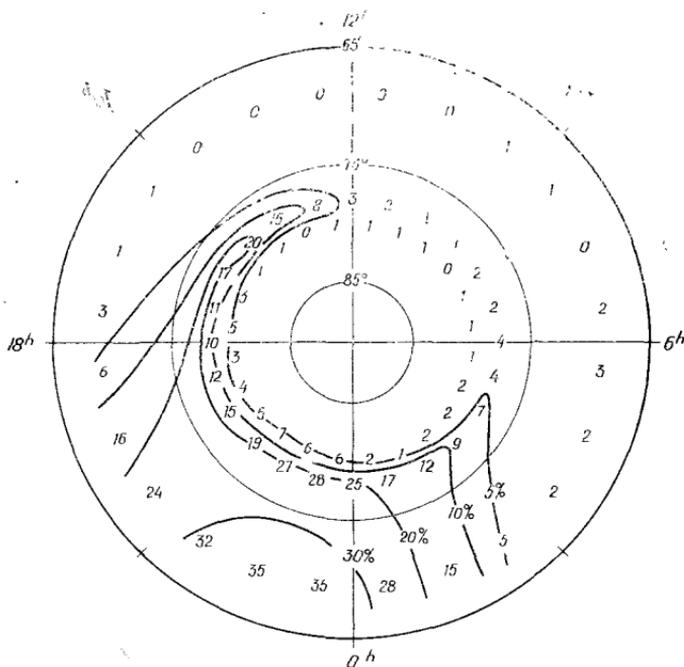
На основе данных, полученных на станциях Южный полюс, Берд и Эйтс в Антарктиде, Морозуми [13] построил общую картину суточной вариации характеристик очень низкочастотного излучения (рис. 101а). Явления типа *N1* наблюдаются в основном в вечерние часы и на значительно более высоких геомагнитных широтах, чем явления типа *N3* или *D*. Явления типа *N2* наблюдаются



Р и с. 101а. Средняя суточная вариация характеристик ОНЧ-излучений [13].

в течение коротких интервалов наложения явлений *N1* и *N3*. Явления типа *N3* наблюдаются в зоне полярных сияний в ранние утренние часы, а явления типа *D* — в поздние утренние и полуденные часы. Обширный анализ данных о широкополосных шипениях в диапазоне частот 4—9 кГц, полученных на 13 станциях, показал [8], что шипения наиболее часто наблюдаются на гм. широте  $\sim 70^\circ$  незадолго до полуночи (геомагнитное время) (рис. 101б). В той же работе было показано, что на очень высоких широтах шипения, по-видимому, весьма редки.

Как упоминалось в разд. 7.2, электромагнитные волны очень низких частот (например, шипения) сильно поглощаются в ионосфере. Поэтому интересно сопоставить картину суточной вариации

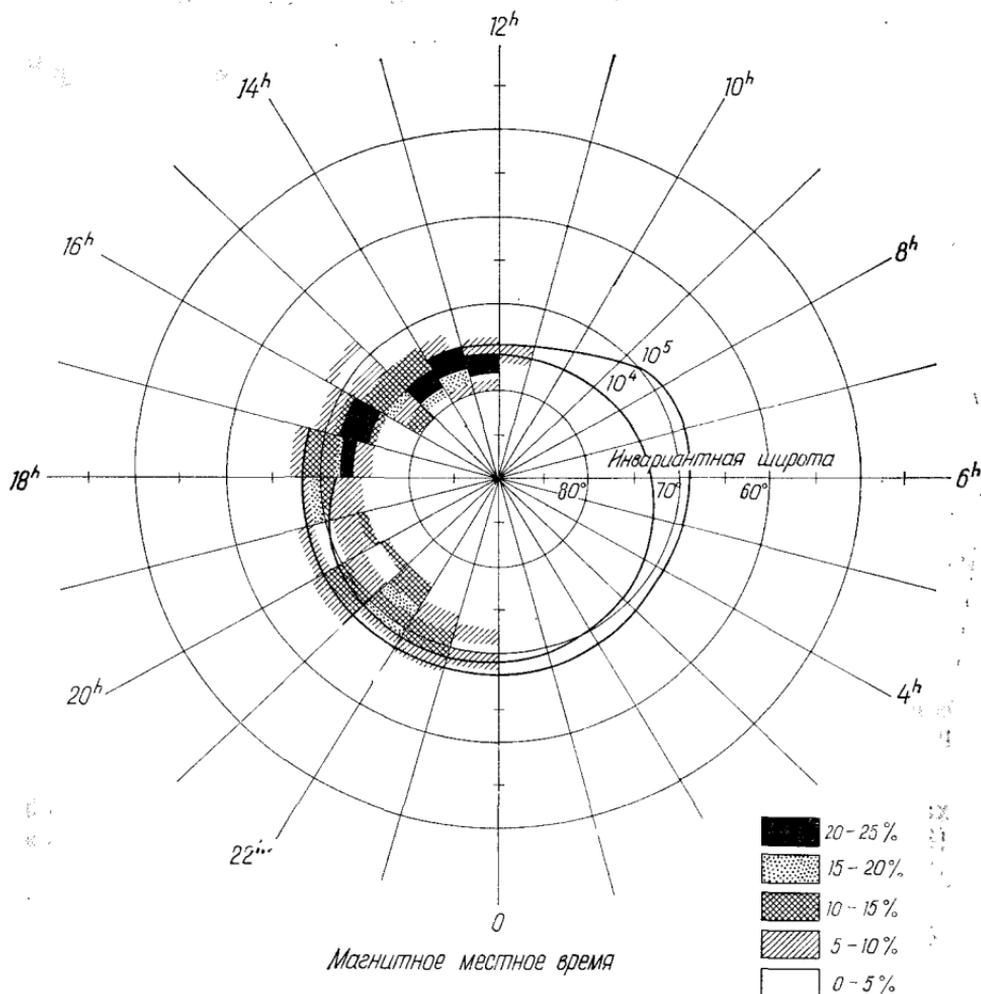


Р и с. 1016. Изолинии частоты появления шипений на частоте 8 кГц в умеренно возмущенные дни 1964 г.; использована система координат широта — время (широта взята по Майо, что примерно соответствует геомагнитным широтам) [8].

характеристик КНЧ- и ОНЧ-излучений по наземным данным [8, 12, 13] с картиной, полученной по данным спутника «Инджун-3» [3, 4, 18].

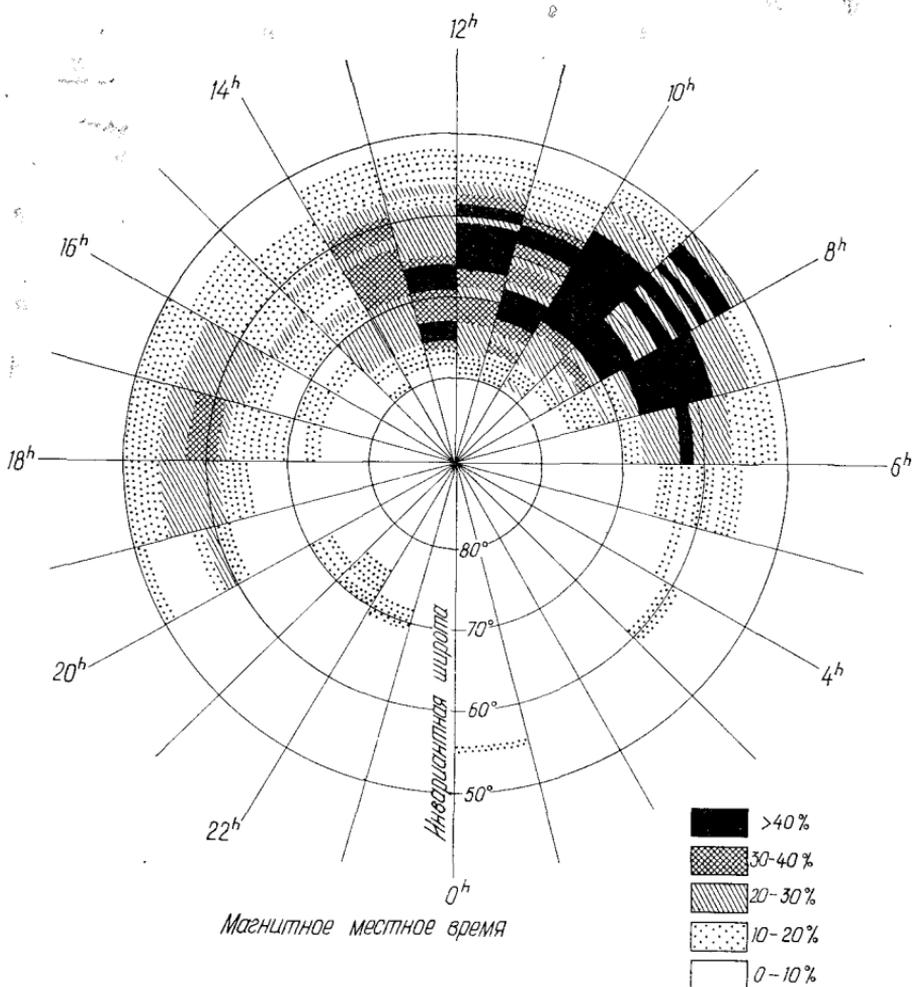
На рис. 102 представлено распределение частоты появления ОНЧ-излучения с плоским шумовым спектром (шипения) в диапазоне от 2 кГц до нескольких десятков килогерц [3]. Интересно отметить, что шипения появляются в основном в послеполуденные и вечерние часы примерно вдоль полярной границы овала полярных сияний. Рис. 102 представляет собой уточненный вариант картины распределения явлений типа *N1*, пример которых приведен на рис. 100.

На рис. 103 приведено распределение частоты появления еще одного вида широкополосных шипений и хоров в области КНЧ. Излучения этого типа появляются в основном в утренние часы на широтах от 50 до 70°. Картина распределения близка к представленной на рис. 100 для явлений типа *D*. Аналогичные исследования были проведены по данным спутника ОГО-2 [9]; результаты согласуются с представленными на рис. 101а, 1016—103. Отмечалось также [11], что авроральные шипения, зарегистрированные на



Р и с. 102. Частота появления шипений в диапазоне ОНЧ по данным спутника «Инджун-3» (учтены случаи, когда в полосе частот от 5,5 до 8,8 кГц были зарегистрированы излучения, для которых  $B^2/\Delta f \geq 3 \cdot 10^{-10} \gamma^2/\text{Гц}$ ) [3]. Замкнутая кривая соответствует внешней границе области захваченных электронов с энергиями более 400 кэВ [Frank L. A., Van Allen J. A., Craven J. D., J. Geophys. Res., 69, 3155 (1964)].

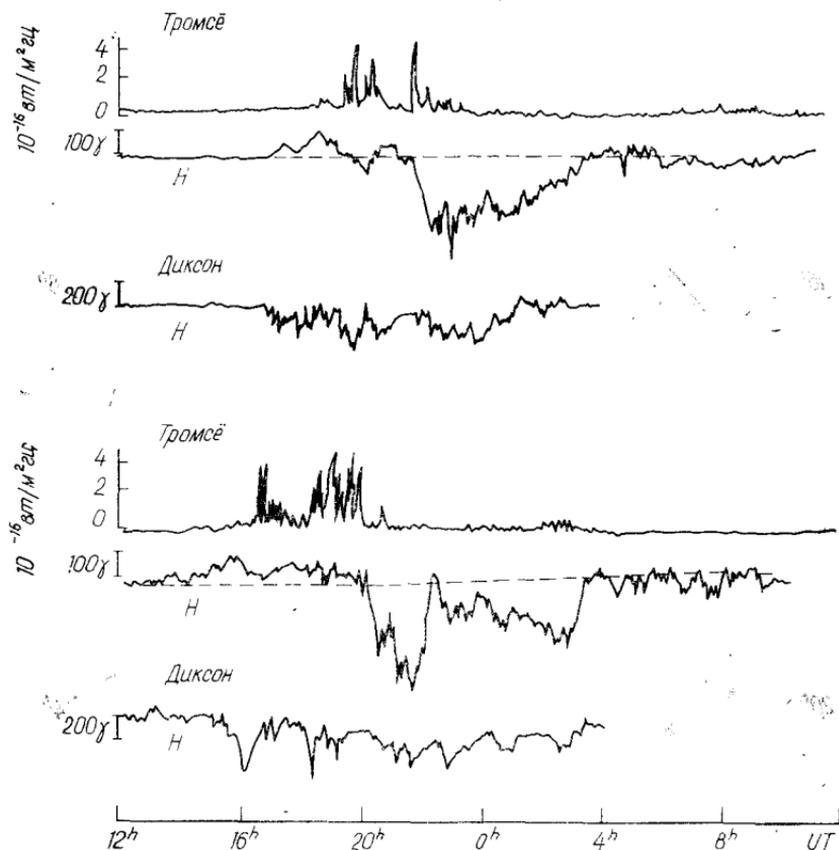
спутнике «Алуэтт-1», очень резко ограничены (так называемая отсечка) со стороны низких частот. При этом было высказано предположение, что отсечка соответствует нижней гибридной резонансной частоте (LHR) окружающей плазмы.



Р и с. 103. Частота появления КНЧ-шипений и хоров по данным спутника «Инджун-3» (учтены случаи, когда в полосе частот от  $\sim 200$  гц до 7 кГц регистрировались излучения с амплитудой более  $1,5 \cdot 10^{-3}$  γ) [18].

#### 7.4. Явления типа N1 и движущиеся к западу изгибы полярных сияний

Явления типа N1 наблюдаются в вечерние часы, до появления излучений типа N2, и при этом не сопровождаются существенным увеличением поглощения космического радиоизлучения. Можно поэтому предположить, что эти явления связаны со вторичной авральной активностью, порождаемой выпуклостью в полярном сиянии (как, например, псевдораспад полярного сияния или дви-



Р и с. 104. Два случая одновременного появления шипения и положительной геомагнитной бухты на станции Тромсё (вверху — 11 и 12 декабря 1962 г., внизу — 14 и 15 декабря 1962 г.); приведены также соответствующие магнитограммы о. Диксон, находящегося в полуночном секторе [5].

жущийся к западу изгиб полярного сияния. В этом смысле явления типа  $N1$  можно считать одним из проявлений суббури в ОНЧ-излучении, наиболее часто наблюдающимся в вечернем секторе.

Анализ многих записей очень низкочастотных излучений вместе с данными наблюдений камерами полного обзора неба, полученными на станции Берд, указывает, что для определения типа явления и характера последующего развития ОНЧ-излучений очень существенно положение станции наблюдения относительно активных форм полярных сияний\*.

\* При этом следует иметь в виду, что частотный спектр очень низкочастотных шипений сильно зависит от расстояния станции наблюдения до полярного сияния. — Прим. ред.

Если станция расположена далеко от активных форм полярных сияний, то единственным видом ОНЧ-излучений, регистрируемым на станции, будут, по-видимому, шипения. Как отмечалось в разд. 2.3, на типичной станции зоны полярных сияний движущиеся к западу изгибы полярных сияний в вечерние часы наиболее часто видны вблизи горизонта в направлении на полюс. Естественно поэтому, что на станциях зоны полярных сияний наиболее обычным видом ОНЧ-излучений являются шипения (явления типа  $N1$ ). На рис. 104 представлены два примера регистрации шипения одновременно с положительными бухтами [5]. Совершенно ясно, что шипение (явление типа  $N1$ ) в обоих случаях было связано с полярной магнитной суббури в полуночном секторе и было одним из проявлений суббури в очень низкочастотном излучении в вечернем секторе.

Если движущиеся к западу изгибы полярных сияний не очень интенсивны, то шипения могут регистрироваться непосредственно под ними. В этих случаях изгибы полярных сияний не сопровождаются интенсивным поглощением космического радиоизлучения. Пример явлений этого типа ( $N1$ ) приведен на рис. 99.

### 7. 5. Явления типа $N2$ в полуночном секторе

Одновременность начала шипения, увеличения интенсивности линии  $\lambda 5577\text{\AA}$ , усиления поглощения космического радиоизлучения и появления СНЧ-излучений (микропульсаций геомагнитного поля) была изучена для 24 случаев, наблюдавшихся на станции Берд [12]. Увеличение интенсивности линии  $\lambda 5577\text{\AA}$  может быть обусловлено либо внезапным увеличением яркости полярных сияний, либо их взрывным движением. На рис. 105 приведены негативы фотографий, полученных камерой полного обзора неба на станции Берд в период явления типа  $N2$ . Дуга, наблюдавшаяся в  $5^{\text{h}}10^{\text{m}}\text{UT}$  вблизи горизонта в направлении к экватору от станции, в  $5^{\text{h}}18^{\text{m}}\text{UT}$  внезапно стала активной и в  $5^{\text{h}}21^{\text{m}}\text{UT}$  быстро переместилась к станции. Шипение было зарегистрировано в течение именно этого очень короткого периода времени между  $5^{\text{h}}19^{\text{m}}$  и  $5^{\text{h}}20^{\text{m}}\text{UT}$  (см. рис. 99).

Статистические результаты анализа одновременности различных явлений, связанных с явлениями типа  $N2$  [12], суммированы на рис. 106. ОНЧ-излучения и геомагнитные микропульсации (СНЧ-излучения) опережают начало возрастания поглощения и интенсивности свечения в линии  $\lambda 5577\text{\AA}$  примерно на 1—2 мин. Ко времени максимума интенсивности свечения и поглощения космического радиоизлучения шипение почти пропадает. Такой ход событий имеет место в большинстве случаев, когда активные полярные сияния быстро приближаются к станции. Шипение может регистрироваться вплоть до момента, когда полярные сияния появятся над са-



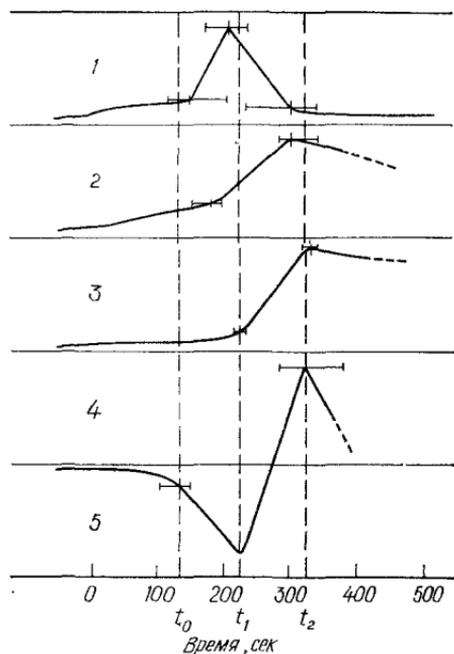
Р и с. 105. Взрывное движение к полюсу полярного сияния, наблюдавшееся 2 июля 1963 г., в период явления типа *N2* (см. рис. 99).

мой станцией. Приход активных сияний сопровождается сильным увеличением ионизации в нижней ионосфере, что приводит к поглощению шипения.

Последующие исследования [5] показали, что выше некоторого критического значения поглощения космического радиоизлучения шипения появляться не могут (таким образом, существует отрицательная корреляция между усилением поглощения и появлением шипений). При величине поглощения ниже критического значения шипения регистрируются (т. е. существует положительная корреляция между усилением поглощения и появлением шипений).

### 7. 6. Явления типа *N3* и *D*

Явления типа *N3*, как правило, наблюдаются после явлений типа *N2*, т. е. когда станция оказывается под выпуклостью в по-



Р и с. 106. Одновременность различных явлений, связанных с явлениями типа  $N2$  [12].

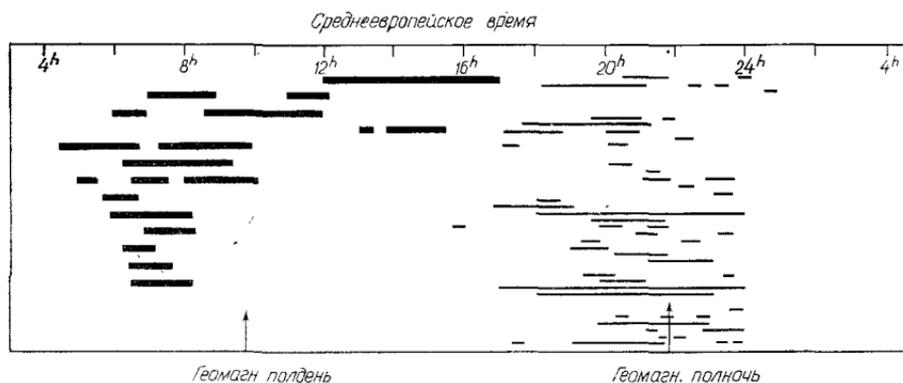
1 — ОНЧ-шипение; 2 — интенсивность свечения в линии  $\lambda 5577\text{\AA}$ ; 3 — поглощение космического радиоизлучения; 4 — СНЧ-излучение (микрорывы геомагнитного поля); 5 — вертикальная компонента геомагнитного поля.

лярном сиянии или под активными формами полярных сияний (см. рис. 99 и 105). Явления типа  $N3$  и  $D$  имеют много общего [12], и, по-видимому, можно утверждать, что как выпуклость в полярном сиянии, так и поздние утренние сияния создают по существу одинаковые условия для генерации и последующего распространения очень низкочастотных излучений.

Явления типа  $D$  наиболее часто появляются в поздние утренние часы и хорошо коррелируют с поглощением типа  $M$  (см. разд. 4.6). Можно поэтому утверждать, что они представляют собой одно из проявлений суббури в ОНЧ-излучении, которое обычно наблюдается в утренние часы. Было показано [15], что микровсплески в высыпаниях электронов всегда сопровождаются ОНЧ-излучением.

Недавно было обнаружено [6], что в периоды высокой геомагнитной активности очень низкочастотные излучения появляются одновременно в Ликселе (гм. широта  $62,5^\circ$ ), Осло (гм. широта  $60,0^\circ$ ), Руде-Сков (гм. широта  $55,8^\circ$ ) и Шамбон-ла-Форе (гм. широта  $50,5^\circ$ ). Столь низкоширотные ОНЧ-излучения появляются только в дневное время. На рис. 107 показано время появления как таких низкоширотных, так и полярных ОНЧ-излучений. Время появления низкоширотных излучений очень близко к времени появления излучений типа  $D$  (см. рис. 101а и 103).

Анализ магнитограмм станции Тромсё показывает, что низкоширотные излучения имеют тенденцию появляться в последнюю



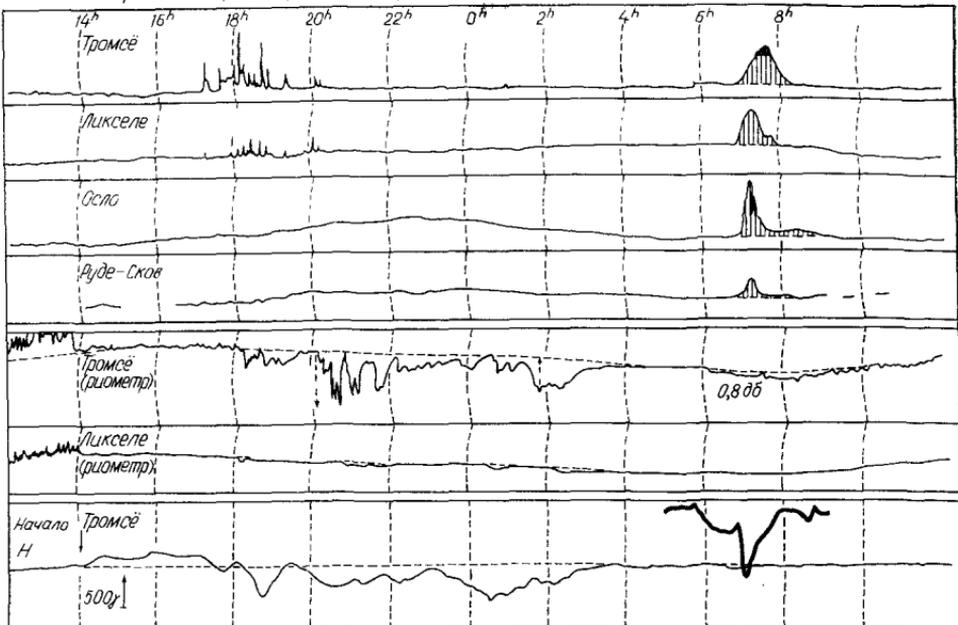
Р и с. 107. Появление низкоширотных (жирные линии) и полярных (тонкие линии) ОНЧ-излучений по данным, полученным в 1966 г. на станции Осло (гм. широта  $60^\circ$ ) и в ноябре — декабре 1965 г. на станции Тромсё соответственно [6].

фазу бурь [6]. Однако следует заметить, что в утренние часы расстояние между Тромсё и овалом полярных сияний увеличивается, так что «последняя фаза» по [16], по-видимому, только кажется последней. Действительно, анализ одновременно полученных магнитограмм канадской станции Грейт-Вейл-Ривер, расположенной в полудночном секторе, показывает, что периоды регистрации низкоширотных излучений совпадают с развитием интенсивных суббурь (рис. 108). Тот факт, что появление таких излучений связано с сильным поглощением космического радиоизлучения в Тромсё, также подтверждает эту точку зрения. По-видимому, этот интересный вид излучения тесно связан с явлениями типа *D*. Появление излучений этого типа только во время интенсивных бурь может быть следствием расширения овала полярных сияний к экватору, при котором среднеширотные станции временно становятся субавторальными (разд. 1.6).

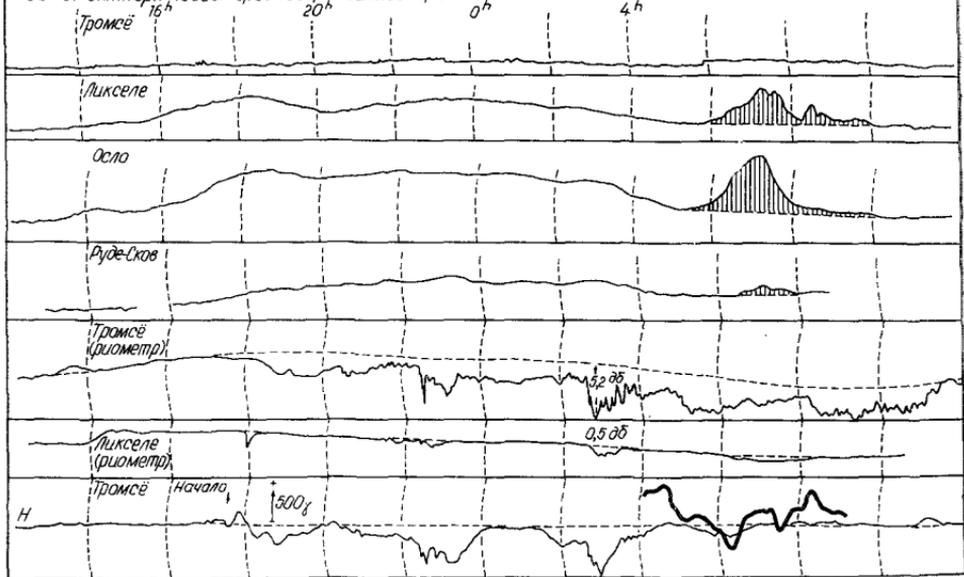
## 7. 7. Развитие суббури в ОНЧ-излучении

Во время ранней фазы суббури в ОНЧ-излучении, соответствующей взрывной фазе суббури в полярных сияниях, шипения наблюдаются как по направлению к полюсу, так и к экватору от овала, вдоль которого распространяется движущийся к западу изгиб (на рис. 109 заштрихованные области, обозначенные *N1*). Предполагается, что вдоль овала полярных сияний заметно увеличивается ионизация нижней ионосферы, в связи с чем шипения не могут регистрироваться на станциях непосредственно под овалом. Однако, если увеличение ионизации невелико или если движущийся к западу изгиб полярного сияния слаб, шипения могут

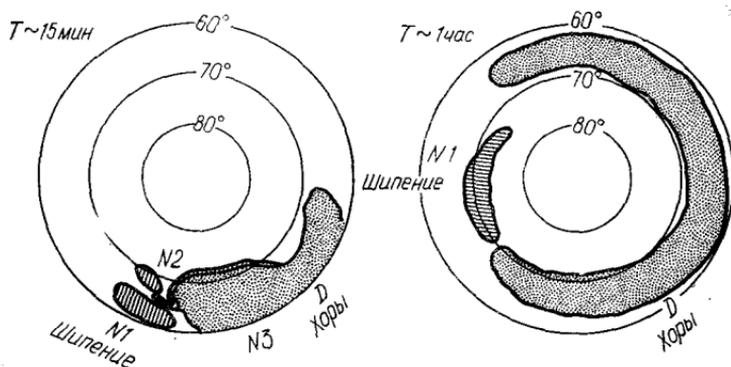
28-29 ноября 1966г. Среднеевропейское время



30-31 октября 1966г. Среднеевропейское время



Р и с. 108. Два примера появления низкоширотных излучений (вертикальная штриховка), зарегистрированных на частоте 8 кГц на меридиональной цепочке европейских станций Тромсё, Ликселе, Осло, Руде-Сков [6]. Приведены также магнитограммы (жирные кривые), одновременно полученные на канадской станции Грег-Вейл-Ривер.



Р и с. 109. Развитие суббури в ОНЧ-излучении.

регистрироваться в области, включающей затухающие участки на рис. 109.

Шипения наблюдаются также в узкой области, располагающейся перед фронтом расширяющейся выпуклости в полярном сиянии (узкая область *N2* на рис. 109).

Хоры наблюдаются в пределах выпуклости в полярном сиянии и вдоль овала полярных сияний в утреннем секторе (области *N3* и *D* на рис. 109). Следует отметить, что явления типа *N3* и *D* по классификации Морозуми [13] по существу представляют одно и то же физическое явление.

Во время более поздней фазы суббури в ОНЧ-излучении, соответствующей фазе восстановления в ходе развития суббури в полярных сияниях, шипения могут наблюдаться вдоль пути движущегося к западу изгиба полярного сияния. К этому времени изгиб успевает стать заметно слабее, так что нижняя ионосфера уже не поглощает шипения. Область, в которой могут наблюдаться хоры, простирается вплоть до полуденного сектора. Эта протяженная область очень близка к области усиления поглощения типа *D* и появления всплесков рентгеновского излучения (см. разд. 4.8 и 5.9).

#### ЛИТЕРАТУРА

##### Общая

- Gendrin R., Progrès récents dans l'étude des ondes T.B.F. et E.B.F., Space Sci. Rev., 7, 314—395 (1967).  
 Helliwell R. A., Whistlers and related ionospheric phenomena, Stanford, Calif., 1965.

##### Цитированная в тексте

1. Ellis G. R., Low-frequency radio emission from aurorae, J. Atmos. Terr. Phys., 10, 302—306 (1957).

2. Ellis G. R., Low-frequency electromagnetic radiation associated with magnetic disturbances, *Planet. Space Sci.*, **1**, 253—258 (1959).
3. Gurnett D. A., A satellite study of VLF hiss, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5599—5615 (1966).
4. Gurnett D. A., Satellite observations of VLF emissions and their association with energetic charged particles, Dept. of Phys. and Astronomy, Univ. of Iowa, Rept. 67—53, Sept. 1967.
5. Harang L., Larsen R., Radio wave emissions in the VLF-band observed near the auroral zone. I. Occurrence of emissions during disturbances, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **27**, 481—497 (1965).
6. Harang L., Larsen R., Skogtvedt J., VLF-emissions in the 8kc/s band observed at stations close to the auroral zone and at stations on lower latitudes, *Phys. Norvegica*, **2**, 271—292 (1967).
7. Helliwell R. A., Whistlers and related ionospheric phenomena, Stanford Univ. Press, Stanford, Calif., 1965.
8. Jørgensen T. S., Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1367—1375 (1966).
9. Jørgensen T. S., Interpretation of auroral hiss measured on OGO2 and at Byrd Station in terms of incoherent Cerenkov radiation, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1055—1069 (1968).
10. Liemohn H. B., Cyclotron-resonance amplification of VLF and ULF whistlers, *J. Geophys. Res.*, **72**, 39—55 (1967).
11. McEwen D. J., Barrington R. E., Some characteristics of the lower hybrid resonance noise bands observed by the Alouette I satellite, *Canadian J. Phys.*, **45**, 13—19 (1967).
12. Morozumi H. M., Diurnal variation of aurora zone geophysical disturbances, Rep. Ionos. Space Res. Japan, **19**, 286—298 (1965).
13. Morozumi H. M., Auroral-zone geophysical events and their relationship to the magnetosphere, Proc. Symp. on Pacific-Antarctic Sci., JARE Sci. Rep. Sp. Issue № 1, 53—64 (1967).
14. Morozumi H. M., Helliwell R. A., A correlation study of the diurnal-variation of upper atmospheric phenomena in the southern auroral zone, Radioscience Lab., Stanford Electronics Labs, Stanford Univ., SU-SEL-66-124, 1967.
15. Oliven M. N., Gurnett D. A., Microburst phenomena. 3. An association between microbursts and VLF chorus, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2355—2362 (1968).
16. Shannan S. D., Behavior of VLF ray paths in the ionosphere, Univ. of Iowa, Rept. Dept. of Physics, 1967.
17. Smith R. L., Helliwell R. A., Yabroff I. W., A theory of trapping of whistlers in field-aligned columns of enhanced ionization, *J. Geophys. Res.*, **65**, 815—823 (1960).
18. Taylor W. W. L., Gurnett D. A., The morphology of VLF emissions observed with the Injun 3 satellite, Dept. of Phys. and Astron., Univ. of Iowa, Rept. 68-6, 1968.
19. Watts J. M., An observation of audio-frequency electromagnetic noise during a period of solar disturbance, *J. Geophys. Res.*, **62**, 199—206 (1957).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Brice N., VLF radiation and polar substorms, *Space Res.*, **8**, eds. A. P. Mitra, L. G. Jacchia and W. S. Newman, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1968, p. 291—302.
- Bullough K., Hughes A. R. W., Kaiser T. R., Satellite evidence for the generation of VLF emissions at medium latitude by the transverse resonance instability, *Planet. Space Sci.*, **17**, 363—374 (1969).

- C a u f f m a n D. P., G u r n e t t D. A., VLF, emissions during magnetic storms and their association with 40-kev electrons, *J. Geophys. Res.*, **74**, 1114—1157 (1969).
- D a s A. C., A mechanism for VLF emissions, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7457—7471 (1968).
- D u n g e y J. W., Waves and particles in the magnetosphere, *Physics of the Magnetosphere*, eds. R. L. Carovillavo, J. F. McClay, H. R. Radoski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland, 1968.
- E v i a t a r A., S h u l t z M., Bounce-resonant scattering of auroral-zone electrons, *J. Geophys. Res.*, **74**, 169—182 (1969).
- G u r n e t t D. A., P f e i f f e r G. W., A n d e r s o n R. R., M o i s e r S. R., C a u f f m a n D. P., Initial observations of VLF electric and magnetic fields with the Injun 5 satellite, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4631—4648 (1969).
- G u r n e t t D. A., M o s i e r S. R., VLF electric and magnetic fields observed in the auroral zone with the Javelin 8. 40 sounding rocket, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3979—3991 (1969).
- H a r a n g L., Emission of VLF during the great disturbance of 25—26 May 1967, *Planet. Space Sci.*, **16**, 1081—1094 (1968).
- H a r a n g L., Radio noise from aurora, *Planet. Space Sci.*, **17**, 869—877 (1969).
- H e l l i w e l l R. A., A theory of discrete VLF emissions from the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4773—4790 (1967).
- H e l l i w e l l R. A., Whistlers and VLF emissions, *Physics of the Magnetosphere* eds. R. L. Carovillavo, J. F. McClay and H. R. Radoski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland, 1968, p. 106—146.
- H e l l i w e l l R. A., Low-frequency waves in the magnetosphere, *Rev. Geophys.*, **7**, 281—303 (1969).
- I v e r s e n I. B., O l e s e n O. H., U n g s t r u p E., Observation of VLF-radio noise in the ionosphere during an auroral absorption event, *Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 373—378.
- J ø r g e n s e n T. S., On the naturally occurring electromagnetic noise called auroral hiss, *Det Danske Meteorologiske Institut, Charlottenlund*, Sept. 1968.
- J ø r g e n s e n T. S., VLF and LF emissions in auroral regions of the ionosphere, *Atmospheric Emissions*, eds. B. M. McCormac, Van Nostrand Reinhold Co., N.Y., 1969, p. 165—174.
- K e n n e l C. F., Consequences of a magnetospheric plasma, *Rev. Geophys.*, **7**, 379—419 (1969).
- P e r k i n s F. W., Plasma-wave instabilities in the ionosphere over the aurora, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6631—6648 (1968).
- R o b e r t s C. S., S h u l t z M., Bounce resonant scattering of particles trapped in the earth's magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7361—7376 (1968).
- R o b e r t s C. S., Pitch-angle diffusion of electrons in the magnetosphere, *Rev. Geophys.*, **7**, 305—337 (1969).
- S h a w n a n S. D., G u r n e t t D. A., VLF electric and magnetic fields observed with the Javelin 8. 45 sounding rocket, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5649—5664 (1968).

# Суббуря в геомагнитных микропульсациях\*

## 8. 1. Введение

Давно известно, что в средних широтах во время начальной фазы развития бухтообразных возмущений наблюдаются микропульсации геомагнитного поля особого типа. Пульсации этого типа сначала называли пульсациями Pt; теперь их обозначают Pi2. Как показано в гл. 3, низкоширотные бухтообразные возмущения представляют собой одно из проявлений полярной геомагнитной суббури, так что пульсации Pi2, несомненно, следует считать еще одним проявлением магнитосферной суббури. В более высоких широтах, особенно вдоль овала и зоны полярных сияний, характеристики геомагнитных микропульсаций значительно сложнее.

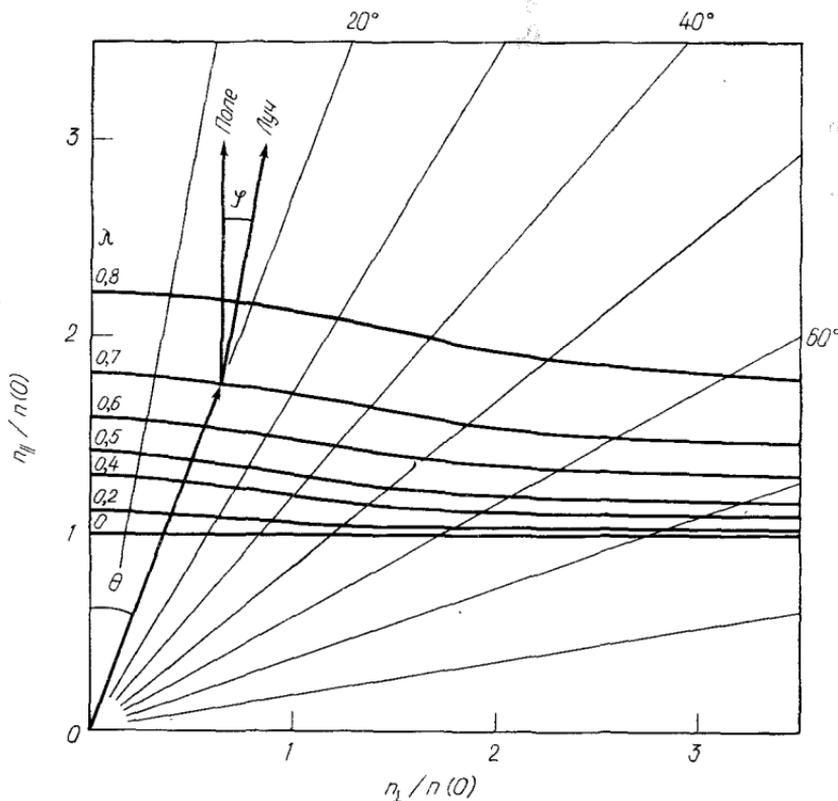
Ниже приводится принятая в настоящее время классификация микропульсаций.

Тип	Период, сек
<i>Устойчивые пульсации</i>	
Pc1	0,2—5
Pc2	5—10
Pc3	10—45
Pc4	45—150
Pc5	150—600
<i>Нерегулярные пульсации</i>	
Pi1	1—40
Pi2	40—150

Некоторые виды пульсаций из приведенной классификации имеют широко распространенные собственные названия. Например, пульсации типа Pc1 принято называть *жемчужинами*\*\* ; так назы-

\* Данные наземных наблюдений геомагнитных микропульсаций и существующие теории их происхождения подробно описаны в обзоре В. А. Троицкой и А. В. Гульельми «Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы» [Успехи физ. наук, 97, вып. 3, 453—493 (1969)]. — *Прим. ред.*

\*\* По сходству внешнего вида записи последовательности групп этих микропульсаций с жемчужинами, нанизанными на нитку. — *Прим. ред.*



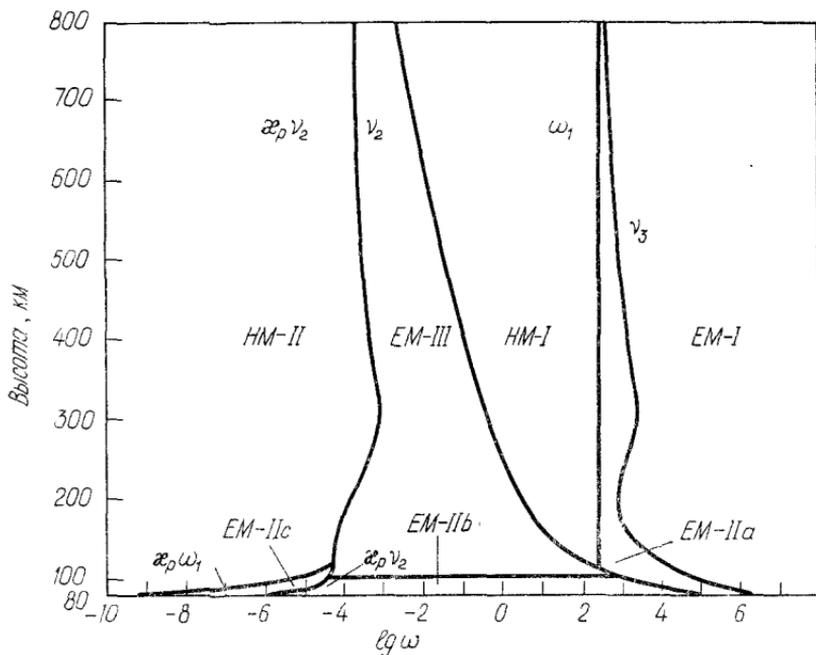
Р и с. 110. Полярная диаграмма зависимости нормированного показателя преломления от угла  $\theta$  между магнитным полем и волновой нормалью для различных значений нормированной частоты  $\lambda$ . Направление лучей (угол  $\varphi$ ) нормально к представленным кривым [3].

ваемые IPDP (интервалы пульсаций с уменьшающимися периодами), или КУП (колебания убывающего периода), представляют собой некое сочетание пульсаций типов P11 и Pс1; гигантские пульсации относятся к типам Pс4 или Pс5; короткие нерегулярные пульсации, или SIP, — к типу P11.

Микропульсации геомагнитного поля являются сверхнизкочастотными электромагнитными волнами. При распространении в ионизованном газе (в нашем случае — в магнитосфере) эти волны следует рассматривать как магнитогидродинамические, поскольку частота микропульсаций меньше гирочастоты положительных ионов.

Характеристики распространения таких волн, возникших в магнитосфере Земли, можно получить в предположении о распространении в сравнительно горячей плазме (с температурой  $\sim 10^4$  К)

Однако такой подход осложняется тем, что характеристики среды (магнитосферы), в которой распространяются волны, очень сильно меняются [16]. К тому же взаимодействие этих волн с энергичными частицами в радиационных поясах может привести к циклотронно-резонансному усилению волн [17]. На рис. 110 представлена зависимость нормированного показателя преломления от угла  $\theta$  между направлениями волновой нормали и поля  $\mathbf{B}$  для различных значений нормированной частоты  $\lambda$ , равной отношению частоты  $\omega$  к гирочастоте протонов;  $n(0) = c/V_A$ , где  $V_A$  — альвеновская скорость [3]. Направление луча (угол  $\varphi$ ) определяется нормалью



Р и с. 111. Характеристики электромагнитных волн разных частот в ионосфере [28].

к кривым. Очевидно, что для всех значений  $\theta$  и  $\lambda$  направление лучей близко к направлению магнитного поля, что является следствием сильного направляющего действия магнитного поля.

Картина распространения волн становится еще более сложной в нижней магнитосфере, где плазма ионизована лишь частично. В ионосфере, которую можно рассматривать как основание магнитосферы, плазма ионизована очень слабо. Рис. 111 показывает, как должны меняться характеристики поперечных волн при распространении через ионосферу [28]. В области  $EM-I$ , ограниченной кривой  $\nu_3 = \nu_{ie} + \nu_{en} + (m_e/m_i) \nu_{in}/2$ , частота достаточно велика, чтобы рассматривать волну как магнитоионную. В области

$EM-IIa$ , ограниченной кривыми  $v_3$  и  $\omega_i$  ( $\omega_i$  — гирочастота ионов), волны ведут себя как электромагнитные волны в анизотропной металлической среде без дисперсии. В области  $HM-I$ , ограниченной кривыми  $\omega_i$  и  $v_2 = (v_{in}/2) + (m_e/m_i) v_{en}$ , волны ведут себя как магнитогидродинамические (нейтральные частицы не влияют на распространение). В области  $EM-III$  поведение волн подобно поведению в области  $EM-II$ . В области  $HM-II$  волны можно рассматривать как магнитогидродинамические; однако в этой области нейтральные частицы участвуют в колебательных движениях [5, гл. 9].

## 8. 2. Типичные суточные вариации

На рис. 112а приведена сонограмма \* геомагнитных микропульсаций, зарегистрированных на типичной среднеширотной станции Аделаида (Австралия,  $L=2,0$ ) [4]. На этой сонограмме выявляются две характерные особенности. Во-первых, в дневные часы наблюдаются пульсации с периодами около 20 сек (тип Pc3). Во-вторых, примерно в  $21^{h}40^{m}LT$  ( $12^{h}40^{m}UT$ ) был зарегистрирован всплеск

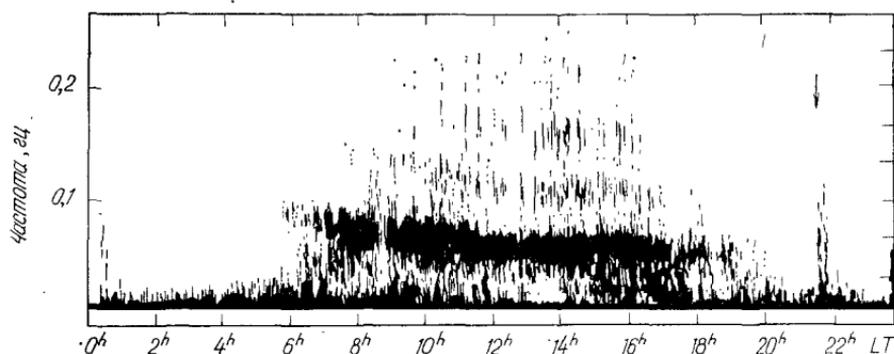
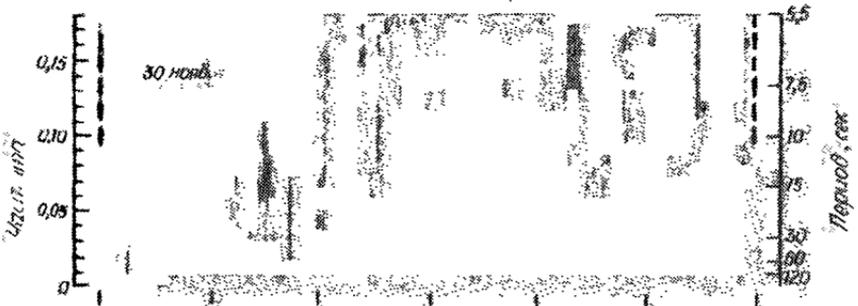
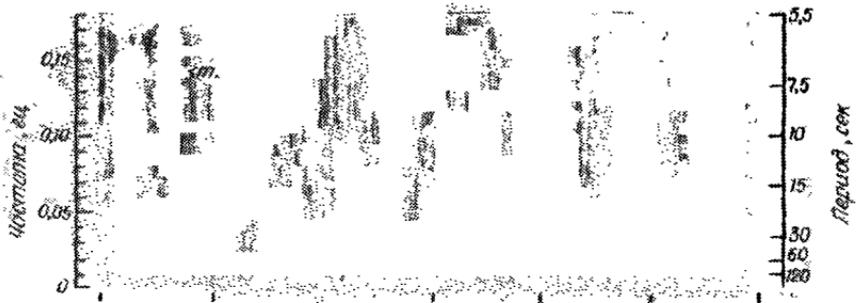
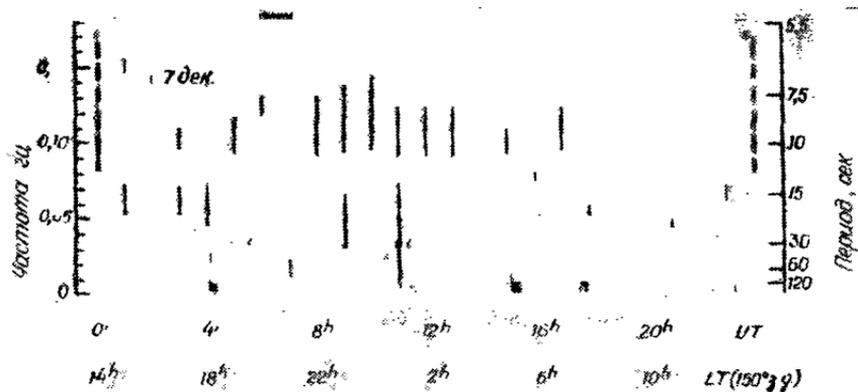


Рис. 112а. Сонограмма геомагнитных микропульсаций, наблюдавшихся 7 сентября 1960 г. в Аделаиде (Австралия) [4].

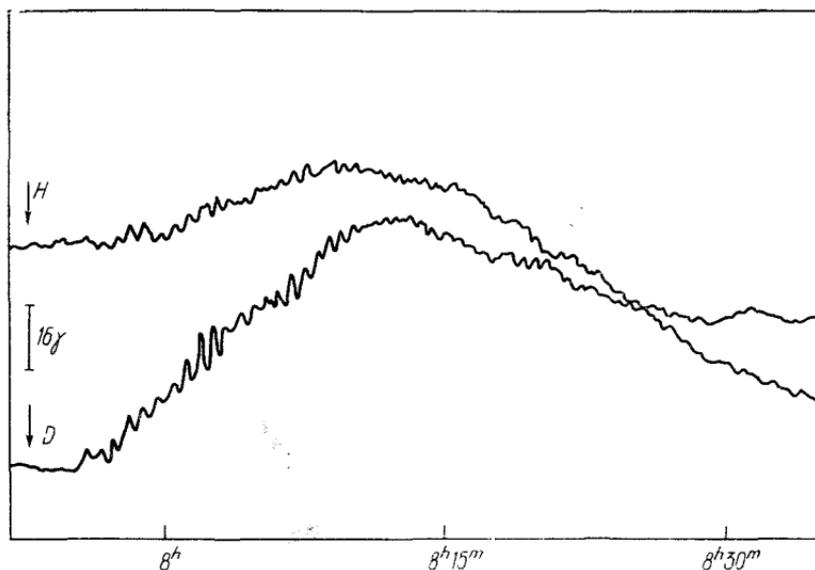
микропульсаций типа  $Pi2$ , продолжавшийся около 30 мин. В это же время в тихоокеанском секторе наблюдалась интенсивная геомагнитная бухта. На рис. 113 приведен пример записи изменения геомагнитного поля, детально иллюстрирующий наложение пульсаций  $Pi2$  на полярное магнитное возмущение в период суббури [21].

На рис. 112б приведено несколько сонограмм геомагнитных

\* Сонограмма представляет собой получаемую при помощи специального спектроанализатора — сонографа — зависимость спектра регистрируемых колебаний от времени (динамический спектр); по степени почернения сонограммы можно судить и об интенсивности анализируемого сигнала. — Прим. ред.



Р и с. 1126. Сонограммы геомагнитных микропульсаций, зарегистрированных в Колледже в 1966 г.



Р и с . 113. Пример наложения микропульсаций  $Pi2$  на бухтообразное возмущение [21].

микропульсаций по данным станции Колледж. Верхняя сонограмма соответствует записи в типичный спокойный день (7 декабря 1966 г.). В течение всего этого дня наблюдалась почти непрерывная активность пульсаций; нижний предел периодов зарегистрированных колебаний составлял около 20 сек. В более возмущенные дни микропульсации появляются как всплески (26 октября 1966 г.) либо как последовательности всплесков (25 октября и 30 ноября 1966 г.). В каждом всплеске наблюдаются микропульсации в довольно широком диапазоне частот. Типичное время жизни таких всплесков составляет  $\sim 1-3$  час.

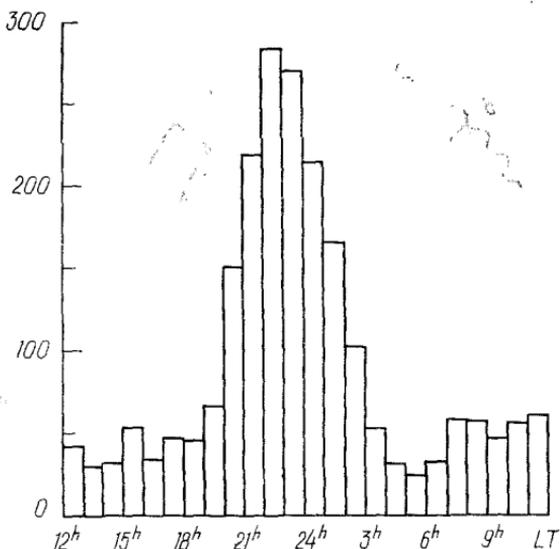
### 8. 3. Статистическая картина суточных вариаций

#### 8. 3. 1. Пульсации $Pi2$

Изменение частоты появления пульсаций  $Pi2$  в течение суток исследовалось многими специалистами. На рис. 114 представлены результаты, полученные Янагихарой [30]; частота появления имеет явно выраженный максимум примерно в  $22^h$  LT.

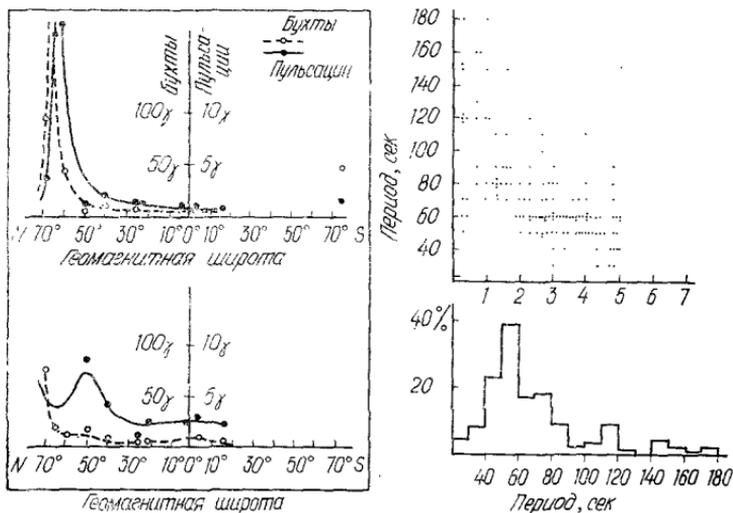
Амплитуда микропульсаций  $Pi2$  имеет отчетливый максимум в зоне полярных сияний и круто уменьшается к более высоким и более низким широтам [15]. Зависимость амплитуды от широты показана на рис. 115; микропульсации  $Pi2$  при этом были разде-

Р и с. 114. Частота появления микропульсаций  $Pi2$  в функции местного времени (измерения земных токов на станции Какиока, 1934 — 1953 гг.) [30].



лены на два типа, один из которых сопровождает отрицательную бухту, а другой — положительную.

Период пульсаций  $Pi2$  зависит от планетарного индекса  $K_p$ ; для малых значений  $K_p \sim 1$  период составляет около 120 сек, тогда как для  $K_p > 3$  период уменьшается до 60 сек или даже меньше [22, 25].



Р и с. 115. Слева — зависимость амплитуды микропульсаций  $Pi2$  и бухтообразных возмущений от геомагнитной широты (вверху — для отрицательных, внизу — для положительных бухт) [15]. Справа — зависимость периода микропульсаций  $Pi2$  от индекса  $K_p$  (вверху) и частота появления микропульсаций  $Pi2$  с различными периодами (внизу) [25].

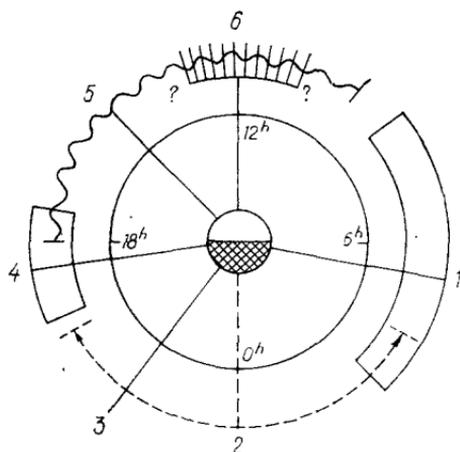


Рис. 116. Суточная вариация характеристик микропульсаций и высыпаний электронов по данным о всплесках рентгеновского излучения [18].

1 — нерегулярные пульсации в ограниченной полосе частот и модулированные высыпания электронов ( $\sim 10$  сек); 2 — шумовые всплески и импульсные высыпания электронов; 3 — предполуночные пульсации; 4 — КУП(?); 5 — квазисинусоидальные пульсации и модулированные высыпания электронов ( $\sim 2,5$  сек); 6 — геомагнитные импульсы и микровсплески высыпавшихся электронов.

### 8. 3. 2. Пульсации в высоких широтах

Характеристики микропульсаций, регистрируемых в высоких широтах, значительно сложнее, чем в более низких широтах, где преобладают пульсации типа  $Pi2$ . На рис. 116 показано, как меняются в течение суток характеристики микропульсаций в зоне полярных сияний; указаны также характеристики высыпаний электронов по данным о всплесках рентгеновского излучения [18].

$20^h00^m$ — $2^h00^m$  LT. Появление микропульсаций тесно связано с началом суббури в полярном сиянии [1, 28—30]. Было показано, что в этот период времени наиболее характерны нерегулярные микропульсации или шумовые всплески и что они связаны с импульсными высыпаниями электронов.

$2^h00^m$ — $10^h00^m$  LT. В эти утренние часы появляются микропульсации типа  $Pi1$  с периодами 5—10 сек, тесно связанные с соответствующей модуляцией высыпания электронов.

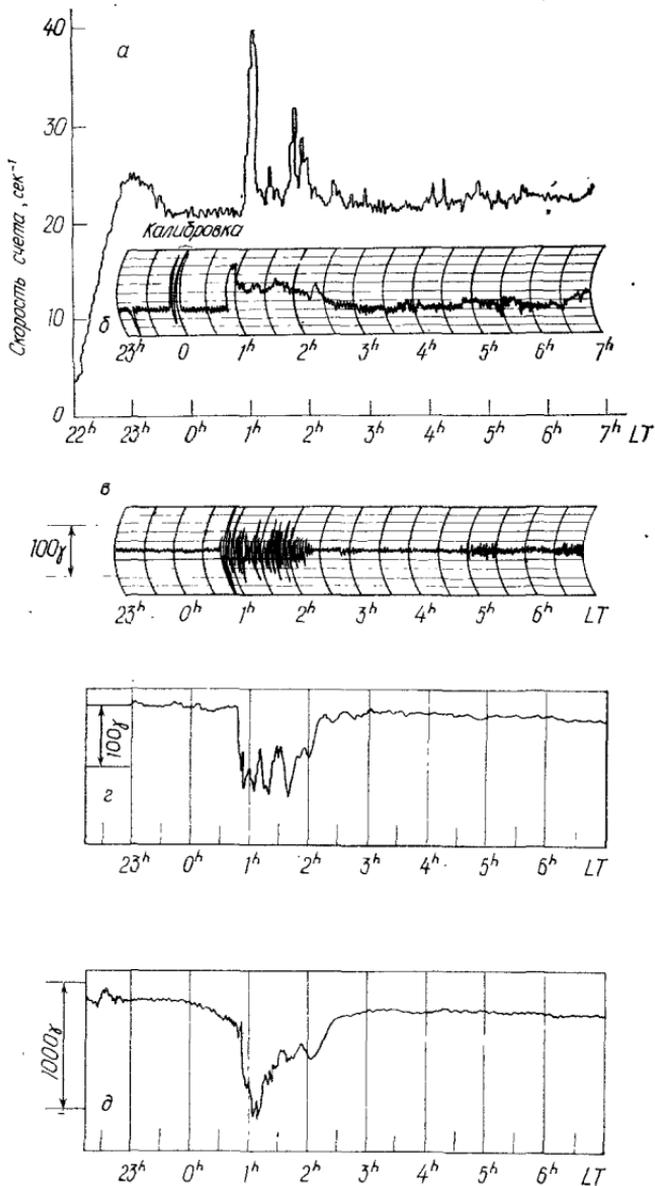
$10^h00^m$ — $15^h00^m$  LT. В полуденном секторе зоны полярных сияний появляются квазисинусоидальные микропульсации с периодами 15—40 сек (тип  $Pc3$ ); аналогичным образом модулировано и высыпание электронов.

$11^h00^m$ — $13^h00^m$  LT. В этот период времени появляются магнитные импульсы [19], с которыми связаны микровсплески высыпания электронов (см. разд. 5.6 и 5.7).

$15^h00^m$ — $22^h00^m$  LT. Сообщалось о появлении колебаний с убывающими периодами (КУП) [10, 26]. Примерно в  $15^h$  LT имеет место максимум частоты появления жемчужин.

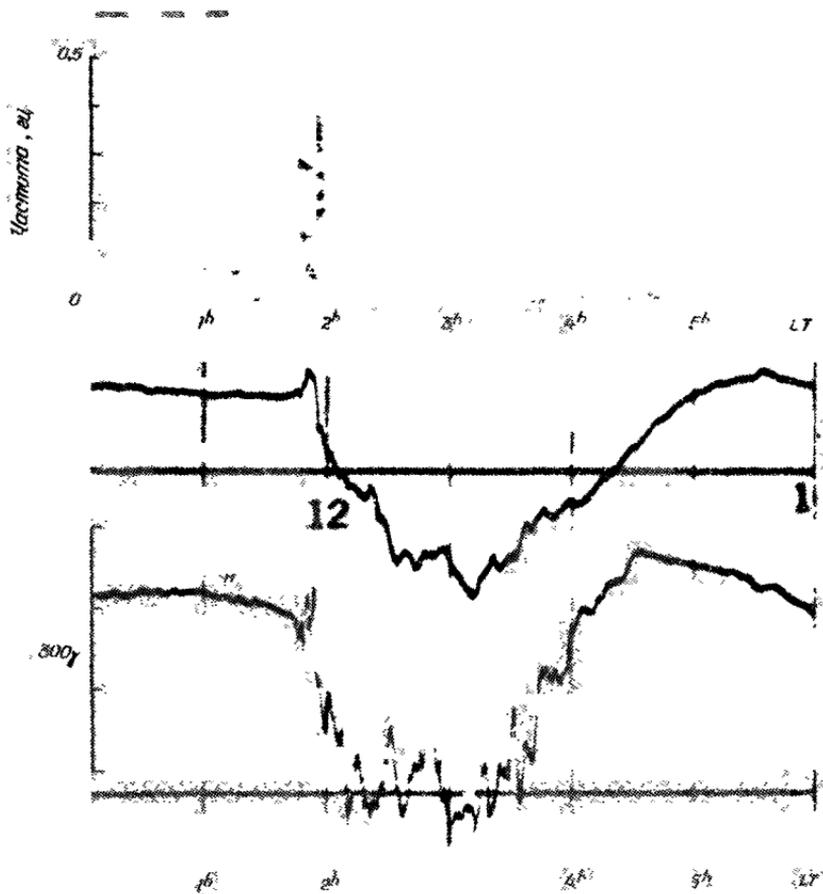
### 8. 4. Микропульсации внутри выпуклости в полярном сиянии

На рис. 117 приведены одновременно полученные записи всплесков рентгеновского излучения, поглощения космического радио-



Р и с. 117. Одновременное появление всплесков рентгеновского излучения, увеличение поглощения космического радиоизлучения, появление микропульсаций геомагнитного поля и отрицательной бухты [1].

*a* — рентгеновское излучение (измерения с аэростата); *б* — поглощение космического радиоизлучения (риометр на частоте 27,6 Мгц); *в* — микропульсации геомагнитного поля с периодами 5—30 сек (широтная составляющая); *г*, *д* — горизонтальная компонента магнитного поля в Колледже и Ситке соответственно.



Р и с. 118. Всплески пульсаций  $P_i$  во время отрицательной бухты с резким началом (3 августа 1965 г.) [11].

излучения, микропульсаций геомагнитного поля и горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $H$  в Колледже и Ситке [1]. Сопоставление этих записей показывает, что внезапное начало микропульсаций тесно связано с полярной суббурей, проявляющейся во всплесках рентгеновского излучения (см. разд. 5.4), в поглощении радиоволн типа  $N$  (см. разд. 4.4) и в отрицательных бухтах с резким началом (см. разд. 2.2). Сопоставление моментов начала микропульсаций, увеличения поглощения космического радиоизлучения, возрастания интенсивности излучения в линии  $\lambda 5577\text{Å}$  и других явлений показало [20], что микропульсации опережают усиление поглощения космического радиоизлучения примерно на

100 сек (см. разд. 7.5); это имеет место при быстром приближении активных форм полярных сияний к пункту наблюдения.

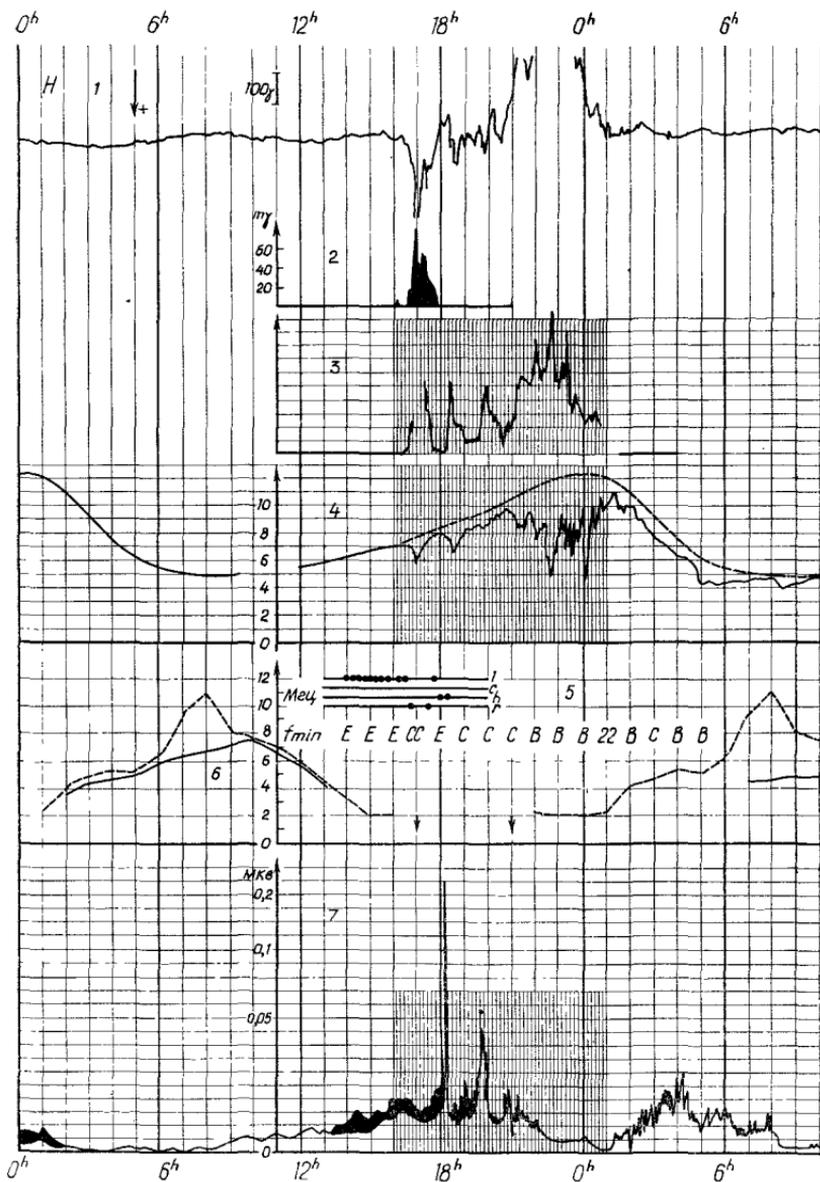
В момент начала отрицательной бухты (или суббури в полярном сиянии) появляются микропульсации по меньшей мере двух типов. В самом начале отрицательной бухты наблюдается короткий импульсный всплеск пульсаций поля, который длится около 15 мин. Пример такого всплеска приведен на рис. 118 [11]; некоторые исследователи называют такие всплески короткими нерегулярными пульсациями, или SIP.

За таким коротким всплеском следуют непрерывные микропульсации. Верхняя огибающая динамического спектра этих пульсаций по форме очень близка к изменению горизонтальной компоненты геомагнитного поля [11]. Такие микропульсации названы авроральными нерегулярными пульсациями (AIP) [6].

Показано, что они связаны со всплесками рентгеновского излучения [29].

#### 8. 5. Микропульсации и положительные бухты

Во время положительных бухт регистрируются микропульсации особого типа, середина частотного спектра которых дрейфует



Р и с . 120. Сопоставление появления пульсаций типа КУП и других полярных геофизических явлений: 1 — магнитограмма; 2 — амплитуда КУП в мV (частоты 0,2—5 гц); 3 — интенсивность свечения в линии  $\lambda$  3914 Å; 4 — поглощение космического радиоизлучения на частоте 20,5 Мгц; 5 — поведение спорадического слоя E; 6 — изменение критической частоты слоя F2; 7 — амплитуда ОНЧ-излучений в диапазоне 1,5—3,0 кгц (Кергелен, 1—2 апреля 1964 г.) [7].

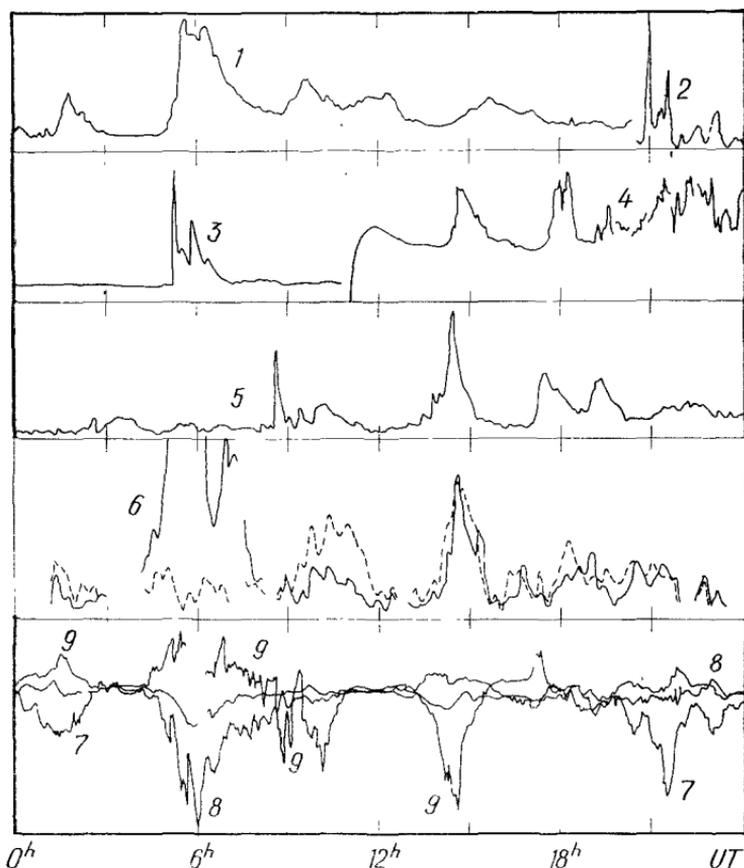
в сторону больших частот, сдвигаясь за 1 час с 0,1 до 0,5 гц [9]. Положительные бухты являются наиболее типичным проявлением полярных магнитных суббурь в вечернем секторе зоны полярных сияний; они появляются, когда вблизи горизонта через направление на полюс проходит движущийся на запад изгиб полярного сияния (см. разд. 2.3 и рис. 28). Хикок [9] отождествил микропульсации этого типа с открытыми Троицкой [24] колебаниями убывающего периода (КУП, или IPDP). По-видимому, исследования Троицкой опирались на данные среднеширотных станций, где КУП наблюдаются только во время интенсивных геомагнитных бурь. На станциях зоны полярных сияний эти пульсации — довольно обычное явление. На рис. 119 приведен пример динамического спектра КУП и соответствующая магнитограмма (наблюдения в Колледже). Изменения геомагнитного поля, связанные с КУП, подсказывают, что Колледж по отношению к движущемуся на запад изгибу полярного сияния соответствует станции В на рис. 28.

На рис. 120 приведен еще один интересный пример КУП в сопоставлении с другими полярными геофизическими явлениями [7]. Из сопоставления этих записей можно сделать вывод, что КУП появляются, когда движущийся к западу изгиб полярного сияния проходит около зенита (со стороны полюса). Когда регистрируются КУП, наблюдается большая положительная бухта. Высказано предположение [7], что волны, составляющие КУП, усиливаются в результате взаимодействия с малоэнергичными протонами (10—100 кэв). В разд. 1.3 отмечалось, что полярные суббури связаны с формированием кольцевого тока.

## 8. 6. Микропульсации и пульсирующие пятнообразные формы полярных сияний в утреннем секторе

Во время полярных суббурь в утреннем секторе наблюдается значительное усиление микропульсаций. На рис. 121 приведены значения амплитуды и частоты микропульсаций, наблюдавшихся на канадской станции Флин-Флон ( $6^{\text{h}}\text{UT}=0^{\text{h}}\text{LT}$ ) в период нескольких полярных суббурь; на других диаграммах этого рисунка приведены записи изменений геомагнитного поля, поглощения космического радиоизлучения по данным ряда станций северного полушария, а также данные о рентгеновском излучении по аэростатным измерениям.

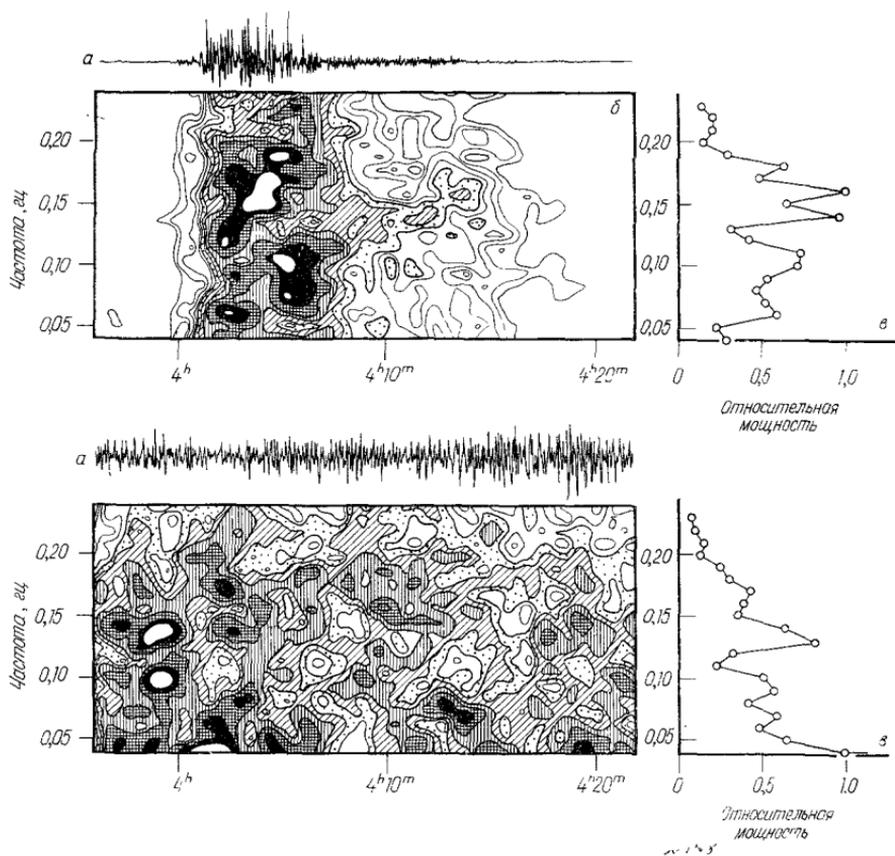
Первая интенсивная полярная буря, начавшаяся примерно в  $3^{\text{h}}\text{UT}$ , проявилась в виде интенсивной отрицательной бухты во Флин-Флоне, менее интенсивной отрицательной бухты в Кируне и положительной бухты в Колледже, а также как увеличение поглощения типа N во Флин-Флоне и типа M в Кируне. В Колледже увеличение поглощения не было зарегистрировано, поскольку



Р и с. 121. Активность микропульсаций (6) по наблюдениям во Флин-Флоне (сплошная линия — частота появления, штриховая линия — амплитуда) изменения поглощения в Кируне (1), форте Черчилл (3) и Колледже (5), всплески рентгеновского излучения по измерениям на аэростатах, полученные в Кируне (2) и Флин-Флоне (4), и вариации магнитного поля (горизонтальная составляющая) по данным измерений в Кируне (7), форте Черчилл (8) и Колледже (9); 19 августа 1965 г. [2].

Колледж в это время находился значительно южнее овала полярных сияний. Во время этой суббури во Флин-Флоне зарегистрировано значительное увеличение амплитуды микропульсаций.

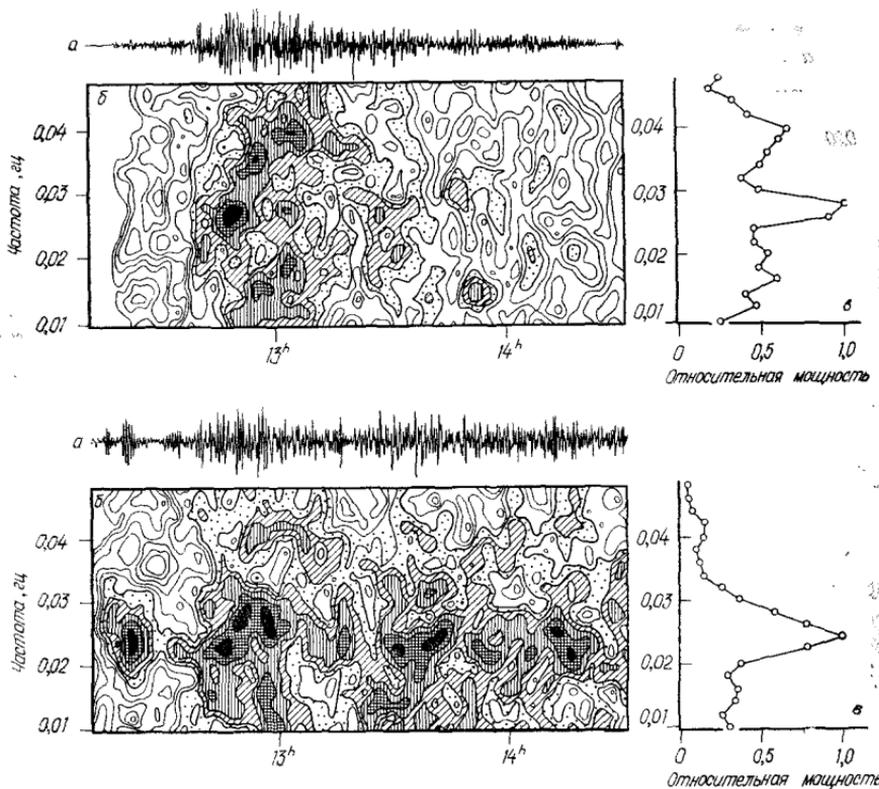
Вторая суббури (хотя и слабая) была зарегистрирована примерно в 8<sup>h</sup>UT как отрицательная магнитная бухта и увеличение поглощения типа *E* в Колледже, а также как увеличение поглощения типа *M* в Кируне. В то же время во Флин-Флоне увеличение поглощения и магнитной активности было очень малым (при значительном увеличении активности микропульсаций).



Р и с. 122. Микропульсации геомагнитного поля (внизу) и связанные с ними всплески рентгеновского излучения (вверху) (Флин-Флон, 6 сентября 1966 г., утренний сектор); приведены амплитудные аналоговые записи (а), сонограммы (б) и спектры мощности микропульсаций и пульсаций рентгеновского излучения (в) в диапазоне энергий от 20 до 45 кэв; оба спектра получены усреднением данных за период времени с 3<sup>h</sup>57<sup>m</sup> до 4<sup>h</sup> 23<sup>m</sup>LT [18].

Третья суббурия проявилась как хорошо выраженная отрицательная бухта и увеличение поглощения типа *N* в Колледже примерно в 13<sup>h</sup> UT, как всплеск рентгеновского излучения во Флин-Флоне и как слабое увеличение поглощения космического радиоизлучения в Кируне. Полярная суббурия сопровождалась и явным усилением микропульсаций, зарегистрированным во Флин-Флоне, который находился в середине утреннего сектора (7<sup>h</sup>LT).

Характеристики микропульсаций в утреннем секторе были исследованы очень детально. На рис. 122 показаны типичные утренние микропульсации и соответствующие всплески рентгеновского излучения (амплитудные аналоговые записи и сонограммы). Всплес-



Р и с. 123. То же, что на рис. 122, в дневном секторе  $12^{\text{h}}15^{\text{m}}-14^{\text{h}}30^{\text{m}}$  LT (Флин-Флон, 8 сентября 1966 г.).

ки рентгеновского излучения, как правило, имеют более резкое начало и быстрее затухают, чем микропульсации. Максимум спектра мощности микропульсаций приходится на период 7,1 сек, тогда как максимум спектра мощности рентгеновского излучения — на 6,2 сек; к тому же спектры мощности не схожи между собой. Отмечалось [18], что микропульсации рассматриваемого типа и соответствующие всплески рентгеновского излучения чаще всего появляются в 5<sup>h</sup> LT и связаны с диффузными формами полярных сияний (пятнами), сопровождающими отрицательные бухты.

### 8. 7. Микропульсации в дневное время ( $10^{\text{h}}-15^{\text{h}}$ LT)

Наиболее примечательной особенностью микропульсаций между  $10^{\text{h}}$  и  $15^{\text{h}}$  LT является их квазисинусоидальный характер; такой же характер имеет и модуляция всплесков рентгеновского излучения. Один из примеров приведен на рис. 123. В этом случае всплески рентгеновского излучения также обладают тенденцией

Р и с. 124. Пример интенсивных микропульсаций типа Pс1 по наблюдениям в Колледже [теллуриграмма широтной составляющей (б) и сонограмма (в)], связанных с увеличением поглощения космического радиоизлучения по данным риометра на частоте 30 Мгц в Колледже (а) и бухтообразным возмущением геомагнитного поля в Черчилле (г); 5 сентября 1964 г. [12].

к более резкому началу и более быстрому затуханию, чем микропульсации. В спектре мощности выделяются максимум, соответствующий периоду 40 сек. Микровсплески рентгеновского излучения (см. разд. 5.6 и 5.7) в полуденные часы ассоциируются с импульсными микропульсациями.

## 8. 8. Микропульсации в послеполуденные часы

Известно, что пульсации типа P<sub>с1</sub> (или жемчужины) в зоне полярных сияний наиболее часто появляются в послеполуденные часы [8, 14]. Природа пульсаций этого типа детально рассмотрена в нескольких обзорах (см. общую библиографию к этой главе).

Случаи появления микропульсаций P<sub>с1</sub> с большими амплитудами обычно имеют место одновременно со случаями заметного увеличения поглощения космического радиоизлучения [8, 12]. На рис. 124 приведена риометрическая запись, аналоговая запись пульсаций P<sub>с1</sub> и соответствующая ей сонограмма. Приведена также запись геомагнитного поля в Черчилле, который находился в это время в середине вечернего сектора. Совершенно очевидно, что данное явление было связано с полярной магнитной суббури, поскольку на магнитограмме Черчилла четко видна интенсивная отрицательная бухта. Усиленное поглощение космического радиоизлучения появилось несколько позже начала отрицательной бухты. Эта и другие особенности поглощения совершенно аналогичны особенностям поглощения типа M.

## 8. 9. Пульсации P<sub>i2</sub>

Было несколько попыток определить местоположение источника микропульсаций P<sub>i2</sub>. Обширные исследования начальной фазы пульсаций P<sub>i2</sub> [23] показали, что векторы магнитного поля в поздневечернем или полуночном секторе сходятся к широтам зоны полярных сияний.

По данным сети станций был изучен сдвиг по фазе пульсаций P<sub>i2</sub> [13] и высказано предположение, что пульсации P<sub>i2</sub> движутся от меридиана, соответствующего 10<sup>h</sup>—11<sup>h</sup>; однако это не единственно возможная интерпретация полученных результатов.

Анализ данных восточно-западной цепочки шести канадских станций от Виктории (гм. долгота 292,7°) до Монреаля (гм. долгота 354,3°) показал [21], что на всех этих станциях микропульсации P<sub>i2</sub> поляризованы против часовой стрелки (независимо от местного времени). На этом основании с учетом ионосферного экранирования был сделан вывод, что соответствующие магнитогидродинамические волны распространяются от зоны полярных сияний к более низким широтам через ионосферу.

## 8. 10. Развитие суббури в микропульсациях

Во время ранней фазы суббури в микропульсациях, соответствующей взрывной фазе суббури в полярных сияниях, к экватору от овала полярных сияний наблюдаются КУП. Эта область совпадает с областью, где наблюдается положительная магнитная бухта.

Всплески  $P_i$  наблюдаются вдоль узкой области несколько к полюсу от расширяющейся выпуклости полярного сияния (рис. 125). Пульсации типа  $P_{i1}$  наблюдаются в этой выпуклости и вдоль зоны полярных сияний в утреннем секторе. Пульсации  $P_{i2}$  наиболее четко наблюдаются в средних широтах в позднем вечернем секторе.

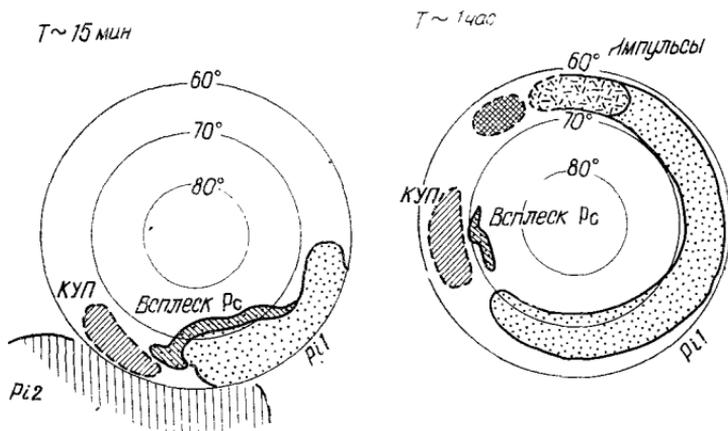


Рис. 125. Общая картина развития суббури в микропульсациях.

Во время более поздней фазы суббури в микропульсациях (соответствующей фазе восстановления в ходе развития суббури в полярном сиянии) несколько к экватору от движущегося на запад изгиба полярного сияния наблюдаются колебания убывающего периода (КУП); сам изгиб, возможно, связан со всплесками  $P_i$ . Область, в которой наблюдаются пульсации  $P_{i1}$ , сильно расширяется вплоть до полуденного сектора; это расширение тесно связано с поглощением типа  $M$ , со всплесками рентгеновского излучения и очень низкочастотными излучениями типа  $D$ . В полуденном секторе на пульсации  $P_{i1}$  накладываются импульсные микропульсации. Когда зона повышенного поглощения типа  $M$  достигает послеполуденного сектора, там появляются пульсации  $P_{c1}$ . Пульсации  $P_{i2}$  к этому времени могут прекратиться.

#### ЛИТЕРАТУРА

##### Общая

- Gendrin R., Progrès récent dans l'étude des ondes T.B.F. et E.B.F., Space Sci. Rev., 7, 314—395 (1967).  
 Hultqvist B., Plasma waves in the frequency range 0.001—10 cps in the earth's magnetosphere and ionosphere, Space Sci. Rev., 5, 599—695 (1966).  
 Троицкая В. А., Гульельми А. В., Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere, Space Sci. Rev., 7, 689—768 (1967).

## Цитированная в тексте

1. Campbell W. H., Matsushita S., Auroral-zone geomagnetic micropulsations with periods of 5 to 30 seconds, *J. Geophys. Res.*, **67**, 555—573 (1962).
2. Coroniti F. V., McPherron R. L., Parks G. K., Studies of the magnetospheric substorm. 3. Concept of the magnetospheric substorm and its relation to electron precipitation and micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1715—1722 (1968).
3. Dowden R. L., «Micropulsation mode» prepagation in the magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, **13**, 761—772 (1965).
4. Duncan R. A., Some studies of geomagnetic micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **66**, 2087—2094 (1961).
5. Dungey J. W., *Cosmic electrodynamics*, Cambridge Univ. Press, England, 1958. (Русский перевод: Дж. Данжи, *Космическая электродинамика*, М., Атомиздат, 1961).
6. Gendrin R., Lacombe S., Irregular micropulsations and their relations with the far magnetospheric perturbations, *Ann. Geophys.*, **24**, 267—273 (1968).
7. Gendrin R., Lacombe S., Троицкая В. А., Гохберг М., Шенетнов П. В., Caractéristiques des pulsations irrégulières de période décroissante (I.P.D.P.) et leurs relations avec les variations du flux des particules piégées dans la magnétosphère, *Planet. Space Sci.*, **15**, 1239—1259 (1967).
8. Heacock R. R., Auroral-zone telluric-current micropulsations,  $T < 20$  seconds, *J. Geophys. Res.*, **68**, 1871—1884 (1963).
9. Heacock R. R., The 4-second summertime micropulsation band at College, *J. Geophys. Res.*, **71**, 2673—2775 (1966).
10. Heacock R. R., Evening micropulsation events with a rising midfrequency characteristic, *J. Geophys. Res.*, **72**, 399—408 (1967).
11. Heacock R. R., Two subtypes of type Pi micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3905—3917 (1967).
12. Heacock R. R., Large amplitude Pc-1 events at College, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **20**, 263—269 (1968).
13. Herron T. J., Phase characteristics of geomagnetic micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **71**, 871—890 (1966).
14. Hessler V. P., Heacock R. R., Telluric current micropulsations at the auroral zone, Final Rep. AF19 (628)-1695, *Geophys. Inst. Univ. of Alaska UAG R-202*, 1967.
15. Jacobs J. A., Sinno K., World-wide characteristics of geomagnetic micropulsations, *Geophys. J.*, **3**, 333—353 (1960).
16. Jacobs J. A., Watanabe T., Micropulsation whistlers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 825—829 (1964).
17. Liemohn H. B., Cyclotron-resonance amplification of VLF and ULF whistlers, *J. Geophys. Res.*, **72**, 39—55 (1967).
18. McPherron R. L., Parks G. K., Coroniti F. V., Ward S. H., Studies of the magnetospheric substorm. 2. Correlated magnetic micropulsations and electron precipitation occurring during auroral substorms, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1697—1713 (1968).
19. Milton D. W., McPherron R. L., Anderson K. A., Ward S. H., Direct correspondence between X-ray microbursts and impulsive micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **72**, 414—417 (1967).
20. Morozumi H. M., Diurnal variation of aurora zone geophysical disturbances, *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*, **19**, 286—298 (1967).
21. Rostoker G., The polarization characteristics of Pi-2 micropulsations and their relation to the determination of possible source mechanisms for the production of nighttime impulsive micropulsation activity, *Canadian J. Phys.*, **45**, 1319—1335 (1967).

22. Rostoker G., The frequency spectrum of Pi-2 micropulsation activity and its relationship to planetary magnetic activity, *J. Geophys. Res.*, **72**, 2032—2039 (1967).
23. Saito T., Oscillations of geomagnetic field with progress of Pt type pulsation, *Sci. Rept. Tohoku Univ., Ser. 5 Geophys.*, **13**, 53—61 (1961).
24. Троицкая В. А., Pulsation of the earth's electromagnetic field with periods of 1 to 15 seconds and their connection with phenomena in the high atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **66**, 5—18 (1961).
25. Троицкая В. А., Гульельми А. В., Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, **7**, 689—768 (1967).
26. Троицкая В. А., Мельникова М. В., О характерных интервалах колебаний, убывающих по периоду (10—1 сек) в электромагнитном поле Земли, и их связи с явлениями в верхней атмосфере, *Докл. АН СССР*, **128**, 917—920 (1959).
27. Victor L. J., Correlated auroral and geomagnetic micropulsations in the period range 5 to 40 seconds, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3123—3130 (1965).
28. Watanabe T., Law of electric conduction for waves in the ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **24**, 117—125 (1963).
29. Wilhelm K., Geomagnetic micropulsations and electron bremsstrahlung in the northern auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1995—1999 (1967).
30. Yanagihara K., Geomagnetic pulsation in middle latitudes — morphology and its interpretation, *Mem. Kakioka Mag. Obs.*, **9**, 15—74 (1960).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Criswell D. R., Pc-1 micropulsation activity and magnetospheric amplification of 0.2—0.5-Hz hydromagnetic waves, *J. Geophys. Res.*, **74**, 205—224 (1969).
- Cornwall J. M., Micropulsations and the outer radiation zone, *J. Geophys. Res.*, **71**, 2185—2199 (1966).
- Dowden R. L., Dotted pearl micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2995—3004 (1968).
- Fooks G. F., Morgan D. P., Power spectra of geomagnetic micropulsations, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 201—206 (1967).
- Fraser B. J., Temporal variations in Pc-1 geomagnetic micropulsations, *Planet. Space Sci.*, **16**, 111—124 (1968).
- Fukunishi H., Hirasawa T., Ionospheric effect on geomagnetic micropulsations at low latitudes, *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*, **22**, 235—248 (1968).
- Gendrin R., Pitch angle diffusion of low energy protons due to gyroresonant interaction with hydromagnetic waves, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1313—1330 (1968).
- Gendrin R., Lacomby S., Irregular micropulsations and their relations with the far magnetospheric perturbations, *Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 275—289.
- Kennedy J. F., Knaflich H. B., Liemohn H. B., Magnetospheric parameters determined from structured micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6737—6749 (1968).
- Knaflich H. B., Kennedy J. F., IPDP events and their generation in the magnetosphere, *Earth. Planet. Sci. Letters*, **2**, 453—459 (1967).
- Manchester R. N., Propagation of Pc-1 micropulsations from high to low latitudes, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3749—3754 (1966).
- Ort D., Barcous H. G., Geomagnetic micropulsations, Pi-2, at low latitudes, *Planet. Space Sci.*, **17**, 497—507 (1969).

- Распопов О. М., Троицкая В. А., Шлиш Р., Лизункова И. С., Казак Б. Н., Кошелевский В. К., О поведении пульсаций геомагнитного поля типа Pi 2 в магнитосопряженных точках, *Геомагнетизм и аэрономия*, **7**, 858 (1967).
- Распопов О. М., О возможном механизме возбуждения пульсаций геомагнитного поля типа Pi2, *Геомагнетизм и аэрономия*, **8**, № 2, 325 (1968).
- Rostoker G., A critical study of the possible modes of propagation of Pi-2 micropulsation activity over the earth's surface, *Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 259—266.
- Selzer E., Les sous-orages magnétiques mondiaux (world-substorms), *Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 233—242.
- Southwood D. J., Dungey J. W., Etherington R. J., Bounce resonant interaction between pulsations and trapped particles, *Planet. Space Sci.*, **17**, 349—361 (1969).
- Swift D. W., A new interpretation of long period micropulsations, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4885—4898 (1967).
- Троицкая В. А., Баранский Л. Н., Виноградов П. А., Соболев А. В., Соловьев С. И., Некоторые свойства колебаний электромагнитного поля Земли типа Pc-1, наблюдаемых одновременно на большой площади, *Геомагнетизм и аэрономия*, **8**, № 4, 726 (1968).
- Троицкая В. А., Мальцева Н. Ф., О возможности влияния ионосферных условий на формирование интервалов колебаний убывающего периода в электромагнитном поле Земли, *Геомагнетизм и аэрономия*, **7**, № 6, 1125 (1967).
- Voelker H., Observations of geomagnetic pulsations: Pc-3, 4 and Pi-2 at different latitudes, *Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 251—258.
- Wilhelm K., Occurrences of Pc-1 pulsations in the course of magnetospheric substorms, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7491—7501 (1968).

# Наблюдения на спутниках во время полярных суббурь

## 9. 1. Введение

В этой главе собраны опубликованные результаты измерений на спутниках вариаций магнитного поля и потоков электронов и протонов в экваториальной плоскости и около нее во время суббурь в полярных сияниях или полярных магнитных суббурь. Положение точки в экваториальной плоскости в магнитосфере Земли и вне ее определяется геоцентрическим радиальным расстоянием.

Для наглядности изложения будем предполагать, что в течение некоторого дня происходят четыре магнитосферные суббури, скажем в  $4^{\text{h}}00^{\text{m}}$ ,  $7^{\text{h}}00^{\text{m}}$ ,  $10^{\text{h}}00^{\text{m}}$  и  $13^{\text{h}}00^{\text{m}}$  UT. Иначе говоря, эти четыре конкретных момента времени являются моментами начал ( $T=0$ ) четырех магнитосферных суббурь. Примем, кроме того, что каждая суббуря продолжается 2 час. Для упрощения рассуждений примем также, что каждый из четырех указанных моментов времени является моментом начала полярной магнитной суббури вблизи обращенного к экватору края овала полярных сияний в полуночном секторе, где легче всего определить начало суббури. Это предположение оправдано, поскольку нет сведений, на основании которых можно было бы сделать вывод, что изменения в магнитосфере имеют место до начала полярной магнитной суббури. Поэтому можно считать, что начало суббури в магнитосфере сразу же (с точностью до 30 сек или 1 мин) проявляется как начало полярной магнитной суббури.

Для большей наглядности изложения построим диаграммы, показывающие типичные изменения магнитного поля и потоков электронов и протонов на нескольких расстояниях от центра Земли вдоль радиуса, проходящего в экваториальной плоскости через центр тихоокеанского сектора. В этом секторе начала четырех гипотетических суббурь будут приходиться на  $18^{\text{h}}00^{\text{m}}$ ,  $21^{\text{h}}00^{\text{m}}$ ,  $0^{\text{h}}00^{\text{m}}$  и  $3^{\text{h}}00^{\text{m}}$  LT соответственно. Такая частота повторения суббурь обычна для умеренной магнитосферной бури. Этот сектор выбран, в частности, потому, что именно в нем располагаются типичная станция зоны полярных сияний Колледж (гм. широта  $64,7^{\circ}$ ) и

типичная низкоширотная станция Гонолулу (гм. широта  $21^\circ$ ), а также потому, что над этим сектором проходит орбита синхронного спутника АТС-1, при помощи которого получено большое количество данных.

Такой подход предполагает, что появление магнитосферной суббури не зависит от положения конкретной точки на Земле по отношению к Солнцу. Это предположение оправдывается результатами работы Дэвиса и Сугиуры [9], показавших, что индекс  $AE$

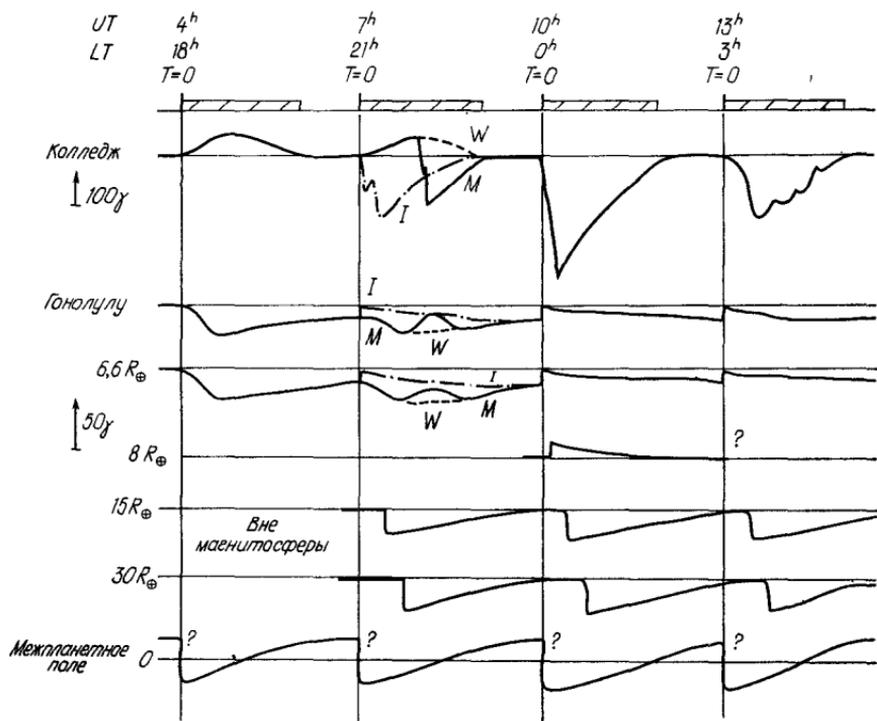
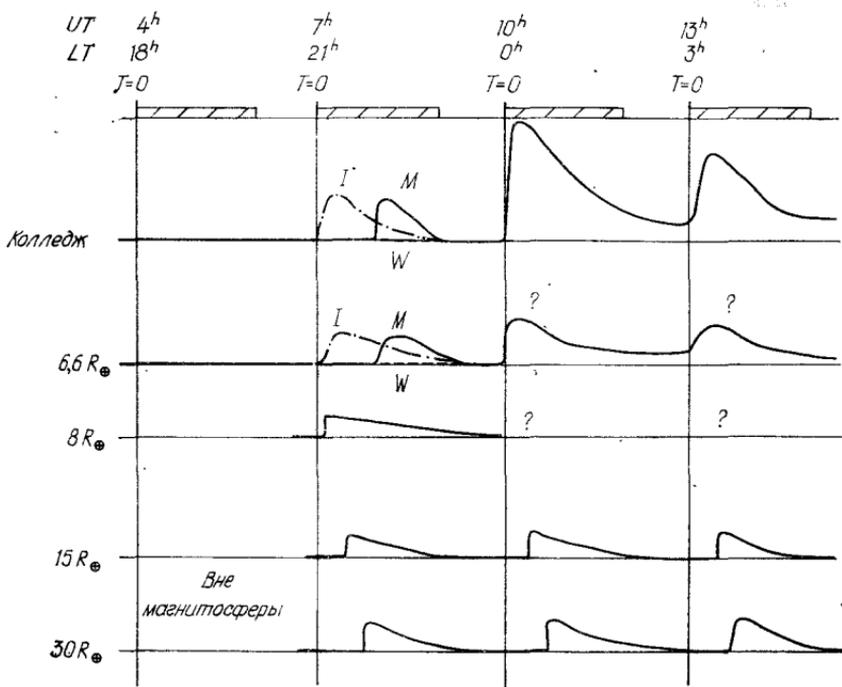


Рис. 126. Идеализированные вариации магнитного поля во время четырех гипотетических полярных суббурь, начинающихся в 18<sup>h</sup>, 21<sup>h</sup>, 0<sup>h</sup> и 3<sup>h</sup> LT ( $I$  — интенсивная суббуря,  $M$  — умеренная суббуря,  $W$  — слабая суббуря).

(мера интенсивности полярной электроструи) не зависит явно от всемирного времени (по крайней мере в первом приближении). Вместе с тем вариации магнитного поля и потоков заряженных частиц во время суббурь по существу определяются местным временем пункта наблюдения.

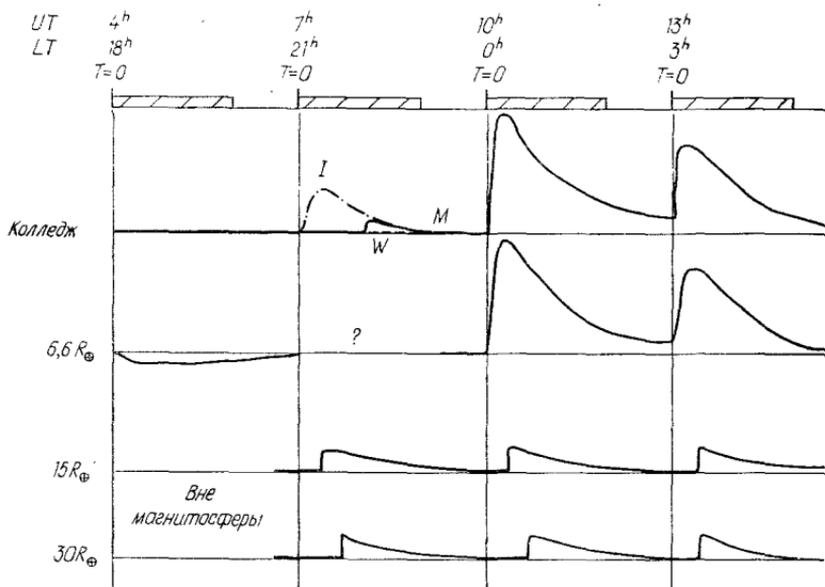
Приведем очень кратко сводку характеристик типичных магнитных вариаций и высыпаний электронов в зоне полярных сияний и соответствующих вариаций магнитного поля в низких широтах во время четырех суббурь; более детальное рассмотрение



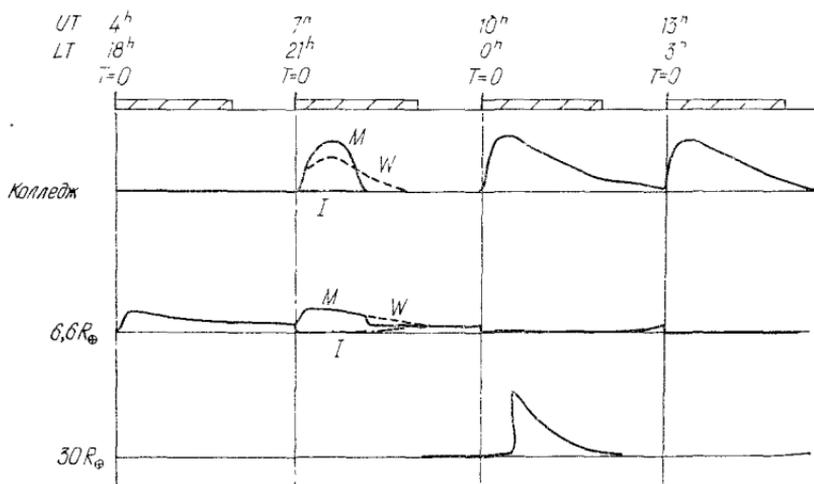
Р и с . 127. Идеализированные вариации потока электронов с энергиями порядка 1—10 кэв во время четырех гипотетических полярных суббурь. (Обозначения те же, что на рис. 126.)

было проведено в предыдущих главах. На рис. 126 приведены идеализированные вариации магнитного поля, которые наблюдались бы на станции зоны полярных сияний (Колледж) и на низкоширотной станции (Гонолулу) во время четырех гипотетических суббурь. Здесь же приведены идеализированные вариации магнитного поля, которые должны наблюдаться во время этих четырех суббурь на нескольких характерных геоцентрических расстояниях. Одна из целей этой главы — увязать вариации, наблюдаемые на земных станциях, с вариациями на расстояниях 6,6,8—10 и 15  $R_{\oplus}$  от Земли. Кривые вариаций потоков электронов и протонов приведены на рис. 127 (электроны с энергиями  $\sim 1$ —10 кэв), рис. 128 (электроны с энергиями  $\sim 50$  кэв) и рис. 129 (протоны с энергиями  $\sim 10$  кэв).

1. Зона полярных сияний. Во время суббури в послеполуденные и ранние вечерние часы наиболее обычной особенностью вариаций геомагнитного поля в зоне полярных сияний является положительная бухта; она наблюдается во время 1-й из четырех гипотетических суббурь, которая начинается в 4<sup>h</sup>UT, или в 18<sup>h</sup>LT (сектор Аляска — Гавайи). Движущийся к западу изгиб поляр-



Р и с. 128. Идеализированные вариации потока электронов с энергиями порядка 50 кэв во время четырех гипотетических суббурь. (Обозначения те же, что на рис. 126).



Р и с. 129. Идеализированные вариации потока протонов с энергиями порядка 10 кэв во время четырех гипотетических суббурь. (Обозначения те же, что на рис. 126.)

ного сияния проходит вдоль овала полярных сияний, т. е. значительно ближе к полюсу, чем находится в эти часы станция зоны полярных сияний, поэтому во время первой суббури высыпаний ча-

стиц (как протонов, так и электронов) над Колледжем не происходит (см. разд. 2.3, рис. 28).

В вечерние часы (2-я суббуря, начинающаяся в  $21^{\text{h}}\text{LT} = 7^{\text{h}}\text{UT}$ ) вариации магнитного поля можно считать переходными между положительной бухтой в послеполуденные часы и отрицательной бухтой в полуночные часы (см. разд. 2.3, рис. 28). Если суббуря слабая, то в Колледже будет положительная бухта, похожая на наблюдаемую в послеполуденные часы. Движущийся к западу изгиб полярного сияния проходит вдоль овала полярных сияний, т. е. несколько ближе к полюсу, чем станция в эти часы, поэтому высыпания электронов не будет. Однако протонное полярное сияние располагается по существу над зоной полярных сияний и его свечение усилится.

Если вечерняя суббуря умеренная, то за положительной бухтой следует отрицательная (см. разд. 2.3, рис. 28). В этом случае движущийся к западу изгиб полярного сияния можно считать западным фронтом расширяющейся выпуклости в полярном сиянии, и при его прохождении над станцией начинается отрицательная бухта. В это же время начинается высыпание электронов, приводящее к увеличению поглощения космического радиоизлучения типа *E*. Во время начальной положительной бухты протонное сияние располагается над зоной полярных сияний и его свечение усиливается. По мере сдвига видимого полярного сияния к экватору происходит смещение к экватору и протонного полярного сияния.

Если вечерняя суббуря интенсивная или если развивается сильная геомагнитная буря, то на станции будет наблюдаться отрицательная бухта. В этом случае выпуклость в полярном сиянии имеет значительную протяженность в направлении восток — запад, в связи с чем высыпание электронов начинается одновременно с отрицательной бухтой. Высыпание электронов приводит к увеличению поглощения космического радиоизлучения типа *N*. Протонное полярное сияние располагается значительно ближе к экватору, чем расширившийся овал полярных сияний, поэтому над станцией зоны полярных сияний высыпания протонов не будет.

В полуночные часы (3-я суббуря, начинающаяся в  $0^{\text{h}}\text{LT} = 10^{\text{h}}\text{UT}$ ) наиболее обычной особенностью является быстро развивающаяся отрицательная бухта. Высыпание мягких ( $1-10$  кэв) и жестких ( $50$  кэв) электронов начинается тогда, когда расширяющаяся к полюсу выпуклость в полярном сиянии проходит непосредственно над станцией (см. разд. 2.2, 4.4, 5.4). В той же области высыпаются и протоны (см. разд. 6.4).

В утренние часы (4-я суббуря, начинающаяся в  $3^{\text{h}}\text{LT} = 13^{\text{h}}\text{UT}$ ) отрицательная бухта начинается менее резко, чем в полночь. Такой же характер носит и начало высыпания электронов, связанного с увеличением поглощения типа *M* (см. разд. 4.6 и 5.6). Для утренних отрицательных бухт наиболее обычны дрейфующие к востоку

полярные сияния в форме полос и пятен (см. разд. 2.4). Протоны высыпаются довольно однородно по всей области, где видны пятнообразные формы полярных сияний (см. разд. 6.4).

2. *Низкие широты.* В послеполуденные и ранние вечерние часы (1-я суббура) наиболее обычной особенностью суббури по наблюдениям в низких широтах является отрицательная бухта (см. гл. 3). В вечерние часы (2-я суббура) вариацию геомагнитного поля можно рассматривать как переход от отрицательной бухты, наблюдающейся в послеполуденные часы, к положительной бухте, наблюдающейся в полуночные часы. Если суббура слабая, то будет наблюдаться отрицательная бухта, подобная наблюдаемой в полуденные часы. Если же суббура сильная или если развивается сильная геомагнитная буря, то будет наблюдаться положительная бухта. Чаще всего наблюдается отрицательная бухта, за которой следует положительная. В полуночные и ранние утренние часы (3-я и 4-я суббури соответственно) наиболее обычное явление — положительная бухта.

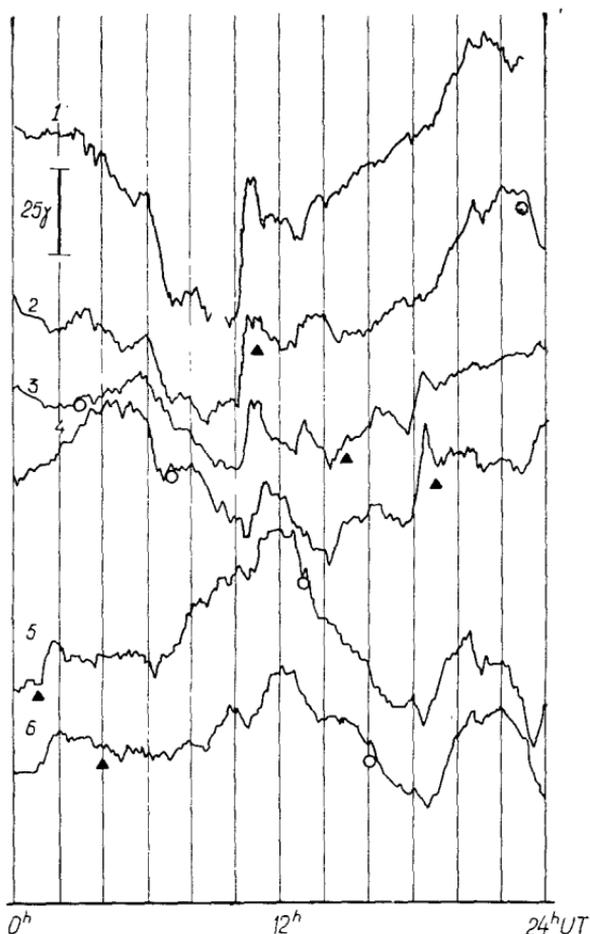
## 9. 2. Вариации магнитного поля и потока частиц на геоцентрическом расстоянии $6,6 R_{\oplus}$ (синхронный спутник АТС)

### 9. 2. 1. Магнитное поле

1. *Полуночный сектор.* Типичная вариация в полуночном секторе — резкое возрастание магнитного поля. Типичное явление такого рода наблюдалось вскоре после  $10^h$ UT 25 декабря 1966 г., что соответствует местной полночи в секторе Аляска — Гавайи — АТС (рис. 130а). На станции Какиока, где в этот момент было примерно  $18^h$ LT, также наблюдалось возрастание поля, соответствующее первому случаю на рис. 126. На станции Ташкент, где в этот момент было около  $14^h$ LT, изменение поля было сначала отрицательным и слабым по величине, а затем сменилось положительным, что также соответствовало сильной суббуре на рис. 126.

2. *Вечерний сектор.* На рис. 130а показаны также вариации магнитного поля по измерениям на спутнике АТС в период вечерней суббури. В полуночном секторе зоны полярных сияний отрицательная бухта началась в  $5^h50^m$ UT 25 декабря (см. магнитограмму станции Грейт-Вейл-Ривер на рис. 130б). Примерно в  $6^h$ UT ( $20^h$ LT) началось резкое уменьшение напряженности поля по наблюдениям на АТС и в Гонолулу, что соответствует слабой суббуре.

Ослабление поля наблюдалось не только в секторе Колледж — Гонолулу — АТС, но и в широкой области долгот вплоть до позднего утреннего сектора (до Среднего Востока). В секторе, соответ-



Р и с. 130а. Записи горизонтальной составляющей магнитного поля 25 декабря 1966 г., полученные на синхронном спутнике АТС (кривая 1) и на низкоширотных станциях: 2 — Гонолулу (гм. широта  $21,1^\circ$ ); 3 — Какиока (гм. широта  $26^\circ$ ); 4 — Ташкент (гм. широта  $32,5^\circ$ ); 5 — Мбур (гм. широта  $21,3^\circ$ ); 6 — Сан-Хуан (гм. широта  $29,6^\circ$ ). Треугольниками отмечены моменты местной полночи, кружками — полдень.

ствующем середине утра, за небольшим уменьшением напряженности последовало возрастание поля.

Когда полярные суббури сильны, вариации поля в вечернем секторе зоны полярных сияний становятся очень сложными. Тем не менее их можно рассматривать как переход от положительной бухты в послеполуденном секторе к отрицательной бухте в полуденном секторе. Типичный пример умеренной суббури приведен на рис. 131. По магнитограмме станции Черчилл зоны полярных

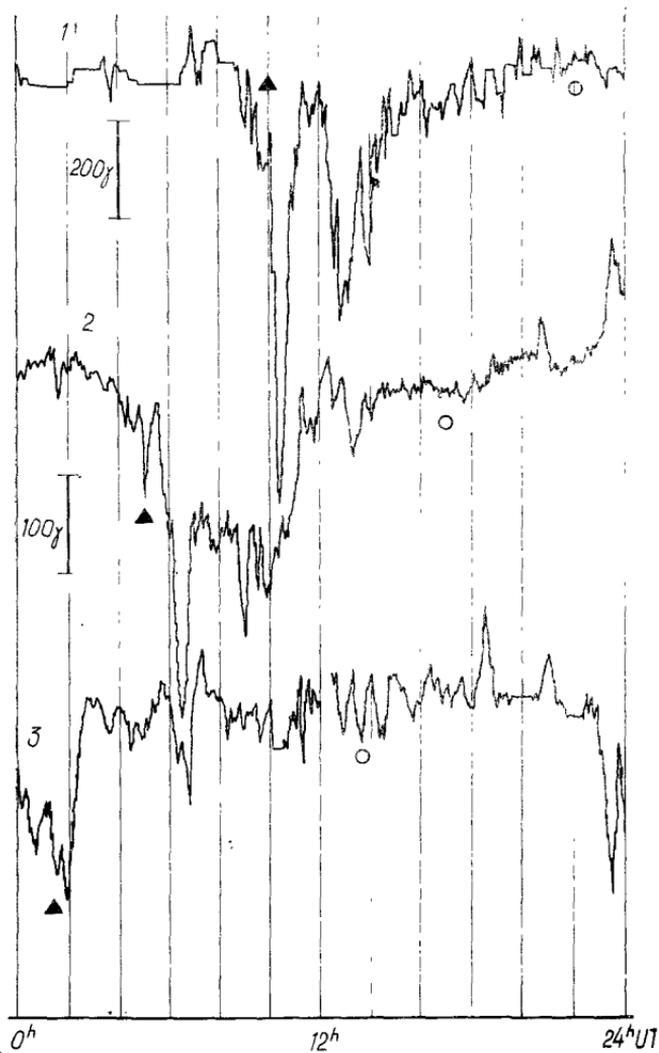
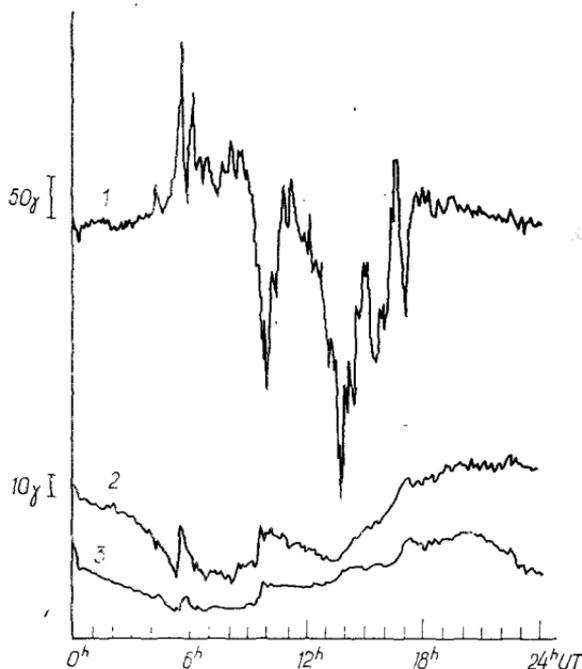


Рис. 1306. Записи горизонтальной составляющей магнитного поля 25 декабря 1966 г., полученные на станциях зоны полярных сияний: 1 — Колледж (гм. широта  $64,6^\circ$ ); 2 — Грейт-Вейл-Ривер (гм. широта  $66,6^\circ$ ); 3 — Лейрвогур (гм. широта  $70,2^\circ$ ). (Обозначения те же, что на рис. 130а.)

сияний, находившейся в полуночном секторе, можно заключить, что, хотя начало слабой суббури имело место примерно в  $3^h$ UT, четкая отрицательная бухта началась в  $5^h20^m$ UT. По магнитограммам Колледжа постепенное увеличение напряженности поля продолжалось примерно с  $4^h$  до  $5^h40^m$ UT (т. е. с  $18^h$  до  $19^h40^m$ LT), когда внезапно началось ослабление поля. По записям поля как



Р и с. 131. Записи изменений горизонтальной составляющей  $H$  магнитного поля на станциях Колледж (1), Гонолулу (3) и на синхронном спутнике АТС (2) 21 января 1967 г.

на спутнике АТС, так и на станции Гонолулу сначала имело место постепенное уменьшение напряженности поля, а затем (примерно в  $5^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT} = 19^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{LT}$ ) началось внезапное увеличение. Затем последовало медленное уменьшение поля до исходного уровня или немного ниже. На канадской станции Уайтхорс (гм. широта  $63,4^\circ$ ), наиболее близкой к долготе синхронного спутника, движущийся к западу изгиб полярного сияния появился на северо-востоке у горизонта в  $5^{\text{h}}20^{\text{m}}\text{UT}$  (по времени Аляски в  $19^{\text{h}}20^{\text{m}}$ ). К сожалению, небо над Аляской в этот день было облачным, но по рис. 28 можно заключить, что изгиб полярного сияния, обнаруженный станцией Уайтхорс примерно в  $5^{\text{h}}20^{\text{m}}\text{UT}$ , должен был достичь Колледжа примерно в  $5^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT} = 19^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{LT}$ . Тогда скорость перемещения изгиба составляет  $1,3 \text{ км/сек}$ ; эта величина является типичной. Записи 21 января 1967 г. дают также хороший пример полуночного явления, которое началось примерно в  $9^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{UT} = 23^{\text{h}}30^{\text{m}}\text{LT}$ : в Колледже наблюдалась отрицательная бухта, а на АТС и в Гонолулу — возрастание поля.

Во время интенсивной бури отрицательная бухта имеет тенденцию появляться в зоне полярных сияний в более ранние вечер-

ние часы. Это связано частично с расширением к экватору овала полярных сияний, вдоль которого течет электроструя.

Типичный пример такого аномального появления отрицательной бухты приведен на рис. 132 (начало в  $6^h UT = 20^h LT$  8 января). (См. случай сильной суббури на рис. 126). В Колледже дуга полярного сияния наблюдалась в зените сразу же после того, как достаточно стемнело (в  $16^{h30^m} LT = 2^{h30^m} UT$ ). Позднее (в  $20^{h23^m} LT = 6^{h23^m} UT$ ) на востоке у горизонта появился интенсивный изгиб

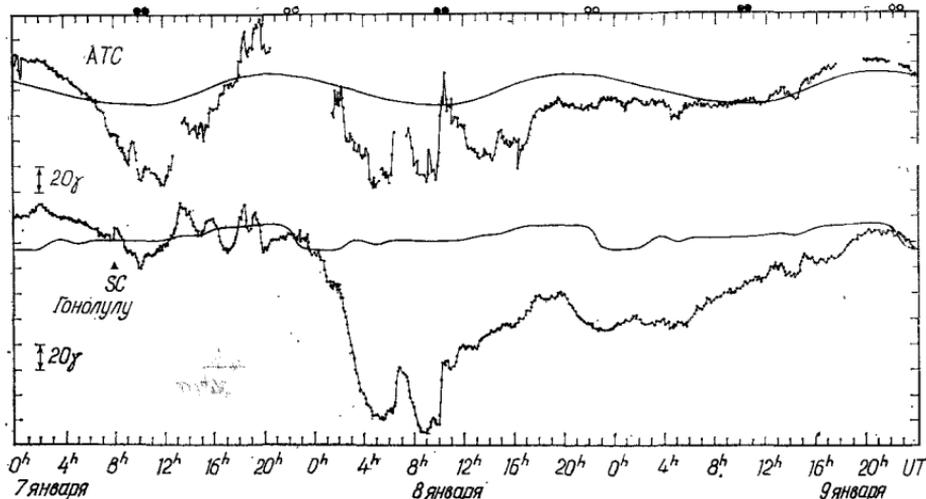


Рис. 132. Вариации горизонтальной составляющей магнитного поля по измерениям спутника АТС (6-минутные средние) и станции Гонолулу (отсчеты через каждые 7,5 мин) с 7 по 9 января 1967 г.; 9 января  $\Sigma K_p = 21$  [7]. Сдвоенные черные и белые кружки отмечают моменты местных полночи и полудня соответственно.

полярного сияния, через несколько минут покрывший все небо. Это интенсивное проявление полярного сияния продолжалось вплоть до  $21^h LT$ . В это время в Колледже наблюдалась отрицательная бухта.

На рис. 132 можно видеть хороший пример полуночного явления (интенсивная активность полярных сияний началась в  $0^{h07^m} LT = 10^{h07^m} UT$ ).

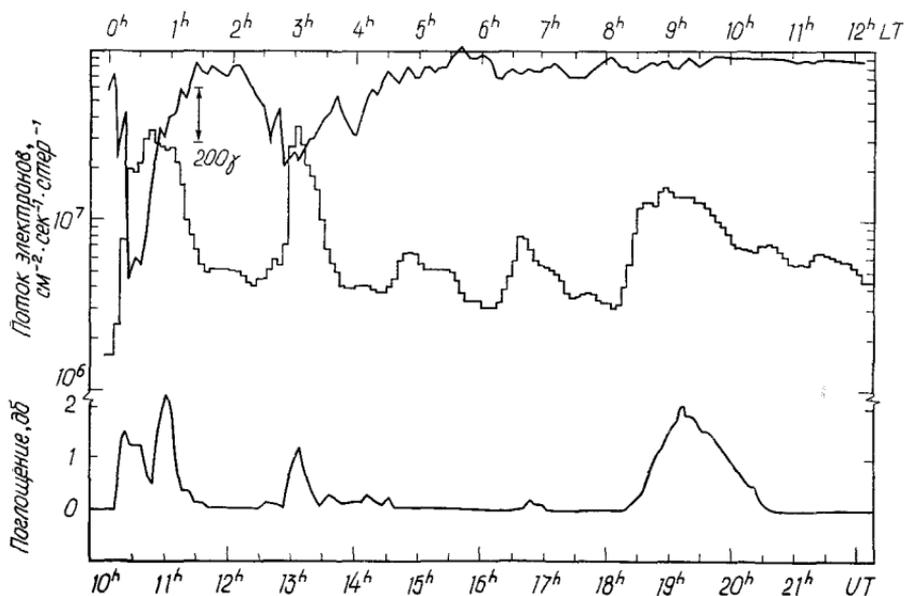
3. Сектор, соответствующий середине утра. На рис. 130а показана также полярная суббура, появившаяся в середине утра. Суббура началась примерно в  $17^{h50^m} UT = 7^{h50^m} LT$  (положительная бухта зарегистрирована в Какиоке и Ташкенте, где в это время были раннее утро и поздний вечер соответственно). В секторе, соответствующем  $18^h LT$  (Европа), наблюдалась большая отрицательная бухта, после чего началась сильная положительная бухта. Спутник АТС и станция Гонолулу находились в секторе, соответ-

ствующем середине утра, и зарегистрировали небольшое понижение напряженности поля.

Результаты, изложенные в разд. 9.2.1, позволили включить в рис. 126 идеализированные вариации магнитного поля на геоцентрическом расстоянии  $6,6 R_{\oplus}$ .

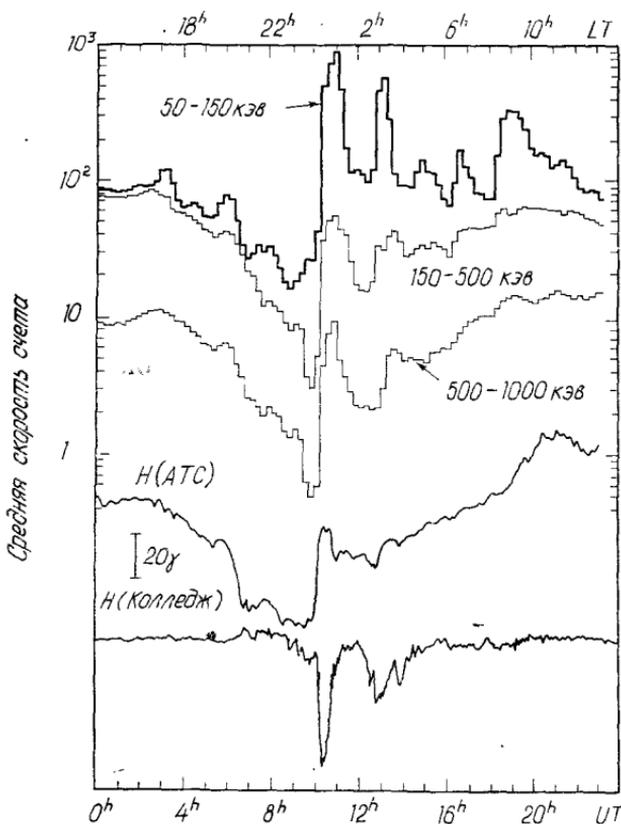
### 9. 2. 2. Электроны с энергиями около 50 кэв

К сожалению, на синхронном спутнике не было детекторов электронов с энергиями 1—10 кэв. Как будет видно в следующем разделе, имеются некоторые основания полагать, что в полуденном секторе во время суббурь такие электроны появляются на геоцентрическом расстоянии  $6,6 R_{\oplus}$ .



Р и с . 133. Вариации потоков электронов с энергиями от 50 до 150 кэв (средняя кривая), горизонтальной компоненты геомагнитного поля (верхняя кривая) и поглощения космического радиоизлучения на станции Колледж (нижняя кривая) 25 декабря 1966 г. [35].

Данные об электронах с энергиями от 50 до 150 кэв были проанализированы достаточно полно [35, 36]. Было показано, в частности, что усиление потоков электронов в экваториальной плоскости хорошо коррелирует с увеличением поглощения космического радиоизлучения. Пример такой корреляции приведен на рис. 133. Первое возрастание потока электронов в экваториальной плоскости, наблюдавшееся на спутнике примерно в  $0^h 10^m$  LT (средняя кривая),



Р и с . 134. Вариации потоков электронов с разными энергиями и горизонтальной компоненты  $H$  магнитного поля по данным спутника АТС 25 декабря 1966 г. Приведена также запись горизонтальной компоненты магнитного поля в Колледже [30].

связано с отрицательной геомагнитной бухтой (верхняя кривая) и поглощением типа  $N$  (нижняя кривая). Второе усиление потока электронов примерно в  $2^{\text{h}}30^{\text{m}}$ LT было связано с более слабой отрицательной бухтой и поглощением типа  $M$  (см. разд. 4.5). Третье усиление потока электронов, начавшееся примерно в  $4^{\text{h}}30^{\text{m}}$ LT, не сопровождалось в явном виде какими-либо вариациями поля и поглощения. Четвертое усиление, начавшееся в  $6^{\text{h}}15^{\text{m}}$ LT, сопровождалось только небольшим отклонением на риометрической записи. Новое значительное усиление потока электронов началось примерно в  $8^{\text{h}}15^{\text{m}}$ LT и было связано с интенсивным поглощением типа  $M$ . Поскольку в это время Колледж был далеко за пределами овала полярных сияний, то наблюдалось лишь очень небольшое бухтообразное изменение поля (см. разд. 4.6 и 5.6). Ранее указывалось, что соответствующая полярная магнитная суббура нача-

лась в  $17^{\text{h}}50^{\text{m}}\text{UT}$  (в Колледже в это время было  $7^{\text{h}}50^{\text{m}}\text{LT}$ ). Поэтому имело место различие по времени в 25 мин между началами усиления потока электронов и магнитной суббури, что согласуется с оценками, полученными в разд. 4.6.

Имеется некоторая неопределенность в вариации потоков электронов в послеполюденном секторе. На рис. 134 приведены изменения потока электронов 25 декабря 1966 г. Суббуря, начавшаяся в  $5^{\text{h}}50^{\text{m}}\text{UT}$ , по-видимому, была связана с уменьшением потока электронов.

На основе данных разд. 9.2.2 были построены идеализированные вариации потоков электронов, приведенные на рис. 127.

### 9. 2. 3. Электроны с энергиями 0,4—2 Мэв

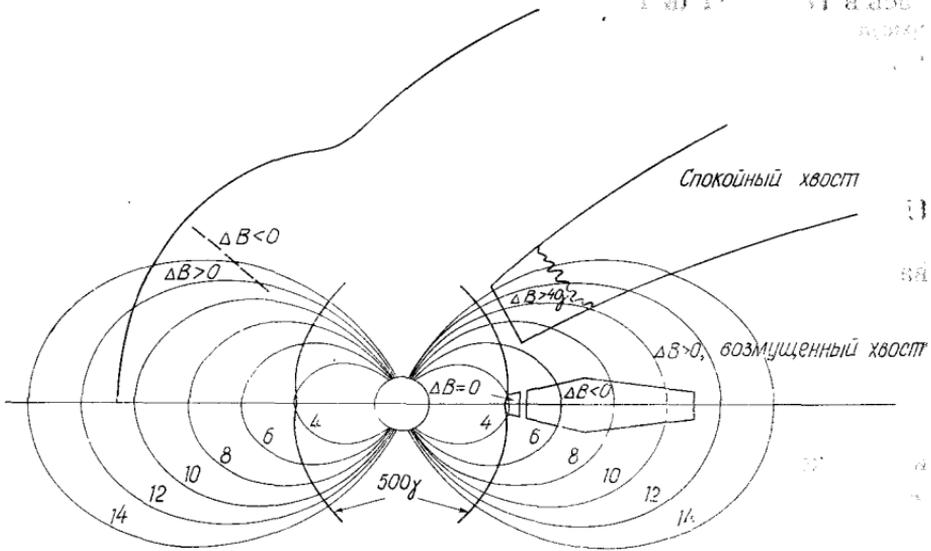
Было обнаружено [29], что интенсивность потока электронов иногда колеблется с периодами 7—25 мин и что период зависит от энергии электронов. При этом было высказано предположение, что осцилляция потоков электронов обусловлена долготным дрейфом вокруг Земли группы электронов, инжектированных в магнитосферу Земли или локально ускоренных. Расчетные периоды довольно хорошо согласуются с наблюдаемыми. На основе спутниковых наблюдений [27] можно предположить, что протоны с энергиями в несколько сот килоэлектронвольт дрейфуют к дневной стороне после инжекции на ночной стороне.

## 9. 3. Вариации магнитного поля и потоков частиц на геоцентрических расстояниях 4—15 $R_{\oplus}$

### 9. 3. 1. Магнитное поле

Область геоцентрических расстояний от 4 до  $15R_{\oplus}$  подробно исследовалась при помощи спутников серии ОГО. Спокойная магнитосфера была разделена [23] на несколько областей в зависимости от наблюдаемого и расчетного магнитных полей (в качестве расчетного поля была выбрана модель поля с определенными значениями коэффициентов сферических гармоник, представляющих распределение геомагнитного поля). Соответствующая диаграмма представлена на рис. 135. В области экваториальных геоцентрических расстояний 4—4,5  $R_{\oplus}$  наблюдаемое поле приблизительно совпадает с расчетным. В области расстояний 4,7—11  $R_{\oplus}$  наблюдаемое поле меньше расчетного ( $\Delta B < 0$ ), а дальше 11  $R_{\oplus}$  — больше расчетного ( $\Delta B > 0$ ).

На общую картину постоянного искажения геомагнитного поля накладываются различные временные вариации. Для нас осо-

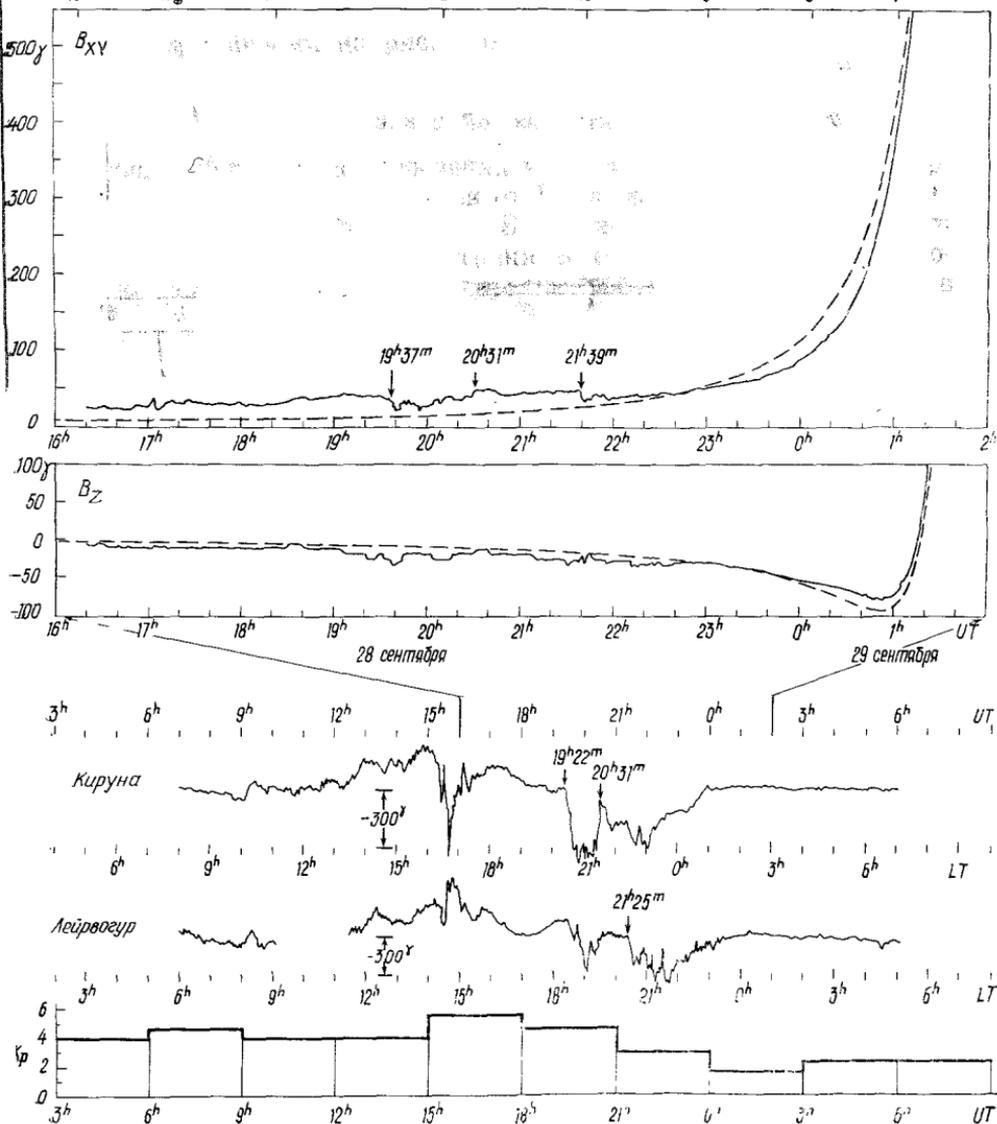


Р и с. 135. Искажение геомагнитного поля в магнитосфере;  $\Delta B$  — разница между наблюдаемым полем и вычисленным на основе представления наземного распределения поля при помощи сферических гармоник. В области, ограниченной линиями, обозначенными «500γ», спутниковый магнитометр не мог производить измерений из-за насыщения. Показаны также силовые линии неискаженного дипольного поля и теоретическая граница магнитосферы [23].

бый интерес представляют вариации во время суббурь. Было показано [23], что знак этих вариаций противоположен знаку  $\Delta B$ . На рис. 136а приведен пример таких изменений. Одна из отрицательных бухт, начавшаяся по магнитограмме станции Кируна в  $19^{\text{h}} 22^{\text{m}}$  UT, была связана с уменьшением напряженности поля на расстоянии  $\sim 12,5 R_{\oplus}$ , наблюдавшимся в  $19^{\text{h}} 37^{\text{m}}$  UT. Другая отрицательная бухта, начавшаяся в  $21^{\text{h}} 25^{\text{m}}$  UT, тоже была связана с уменьшением поля на расстоянии  $\sim 10 R_{\oplus}$ , наблюдавшимся в  $21^{\text{h}} 39^{\text{m}}$  UT. Оба понижения напряженности имели место в области, где  $\Delta B > 0$ .

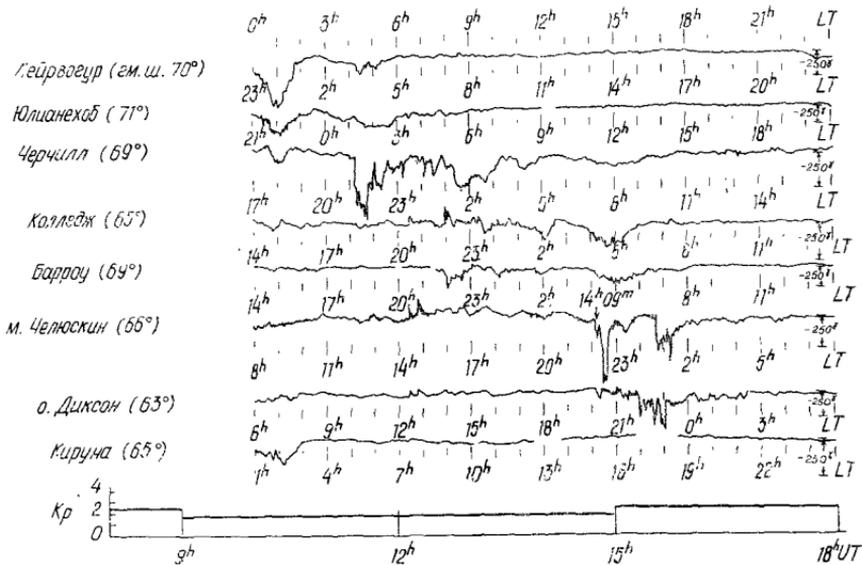
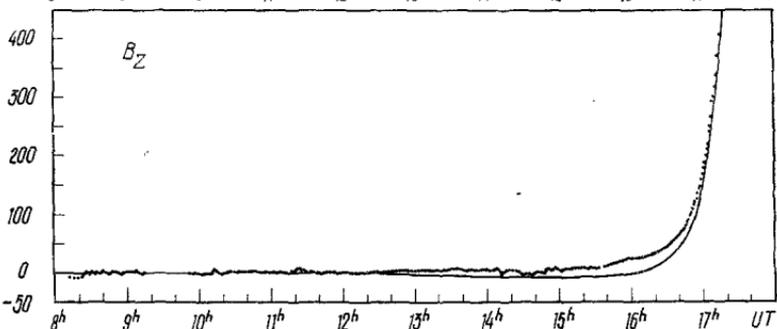
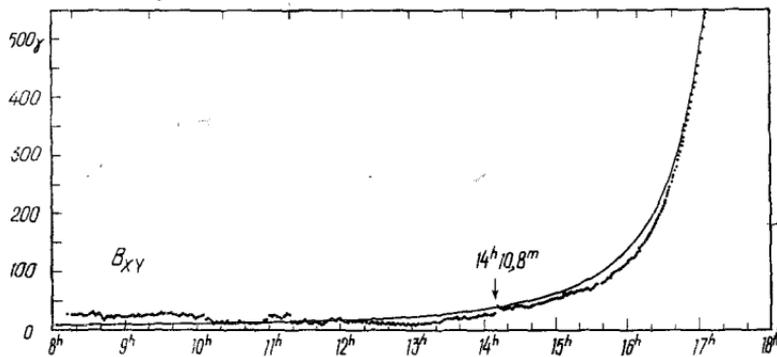
Отрицательная бухта, зарегистрированная на станции м. Челюскин в  $14^{\text{h}} 09^{\text{m}}$  UT (рис. 136б), была связана с возрастанием напряженности поля по измерениям спутника, находившегося в  $14^{\text{h}} 10,8^{\text{m}}$  UT на расстоянии  $\sim 9,5 R_{\oplus}$ , где  $\Delta B < 0$ . Эти данные согласуются с полученными на синхронном спутнике. Правда, имеет место определенная задержка начала явления, регистрируемого на спутнике. По-видимому, в полуночном секторе возрастание поля проис-

21 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup>	LT спутника	21 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup>	21 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup>	21 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup>	22 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup>	22 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup>	23 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup>
13,3°	геогр широта	11,6°	9,6°	7,1°	4,0°	-0,6°	-7,9°
4,1°	Гм. широта	6,9°	9,6°	11,0°	10,5°	7,6°	0,5°
16,1	L	14,2	12,4	10,4	8,3	6,2	4,1
16	R <sub>⊕</sub>	14	12	10	8	6	4



Р и с. 136а. Записи измерений магнитного поля 28—29 сентября 1964 г. по данным спутника ОГО-1 (штриховая линия— расчетное поле, сплошная линия — измеренное поле) и станций Кируна (*N*-составляющая) и Лейрвогур (*H*-составляющая) [23].

20 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> LT	спутника	21 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup>	21 <sup>h</sup> 20 <sup>m</sup>	21 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup>	21 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup>	22 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup>	23 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>
10,5°	Гм. широта	3,7°	-1,2°	-4,8°	-8,0°	-12,1°	-19,5°
13,2°	геогр. широта	11,4°	3,4°	6,9°	3,7°	-0,8°	-8,3°
16,5	L	14,0	12,0	10,1	8,1	6,2	4,4
16	R <sub>0</sub>	14	12	10	8	6	4



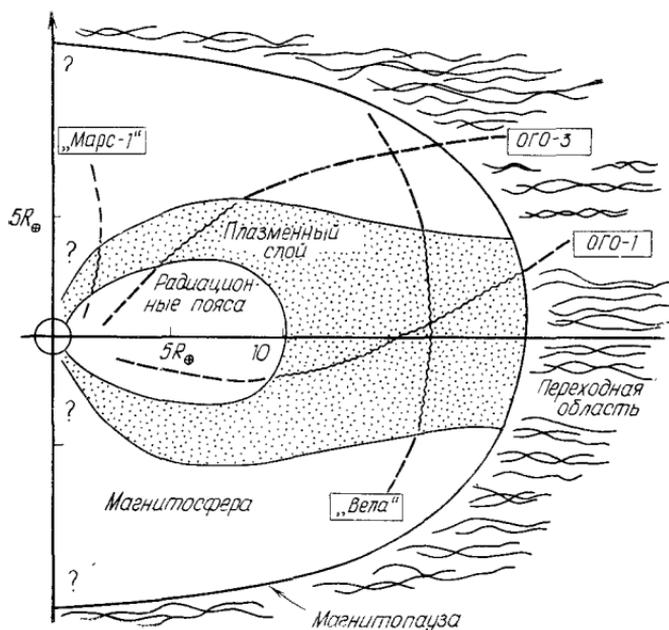
Р и с. 1366. Записи измерений магнитного поля 1 октября 1964 г. по данным спутника ОГО-1 (сплошная линия — расчетное поле, пунктирная линия — измеренное поле) и ряда станций. Для станций Черчилл и Кируна приведена N-составляющая поля, для остальных — H-составляющая [23].

ходит не только на расстоянии  $6,6R_{\oplus}$ , но и с задержкой порядка нескольких минут на расстоянии по меньшей мере до  $10R_{\oplus}$ .

Описанные наблюдения были учтены при построении соответствующих диаграмм на рис. 126.

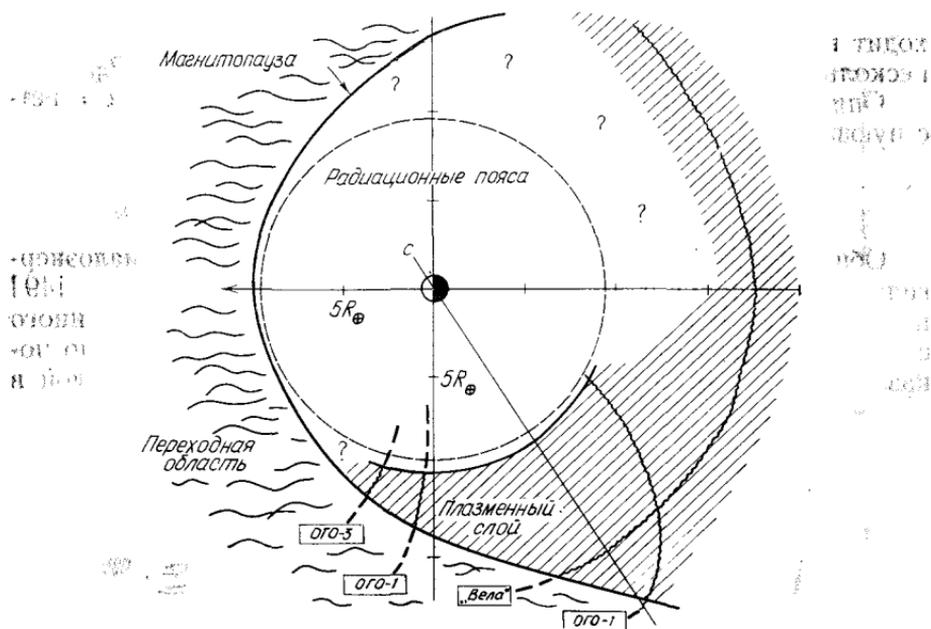
### 9. 3. 2. Потoki частиц

Общая картина распределения интенсивных потоков малоэнергичных электронов с энергиями от  $125 \text{ эв}$  до  $2 \text{ кэв}$  по данным [49] представлена на рис. 137 и 138. Внутренняя граница плазменного слоя резко очерчена внешней границей области захвата. Было показано [49], что во время полярных суббурь плазменный слой в



Р и с. 137. Схематическая картина распределения интенсивных потоков малоэнергичных электронов (заштрихованная область) в плоскости меридиана, соответствующего позднему вечеру [49].

области хвоста приближается к Земле. Это явление было интерпретировано как движение плазмы к Земле во время полярных суббурь (рис. 139а). В одном случае скорость движения к Земле была оценена в  $12 \text{ км/сек}$ . Если предположить, что это движение к Земле является результатом дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях, то разность потенциалов поперек хвоста магнитосферы должна составлять около  $48 \text{ кВ}$  (см. также [18]). На рис. 139б

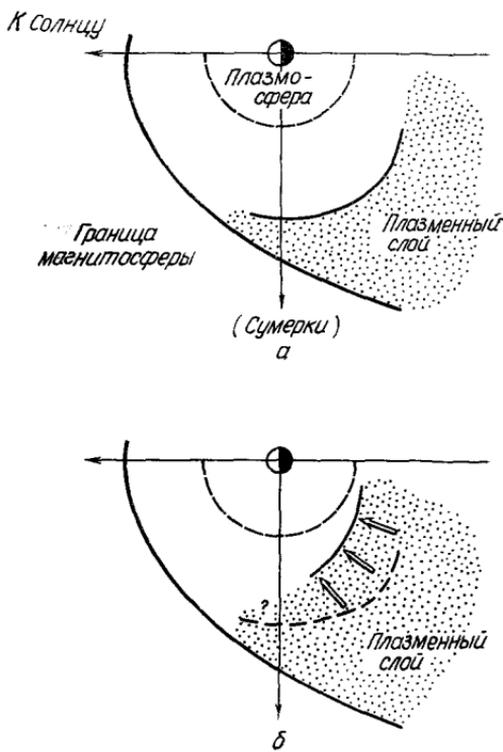


Р и с . 138. То же, что на рис. 137, в экваториальной плоскости [49].

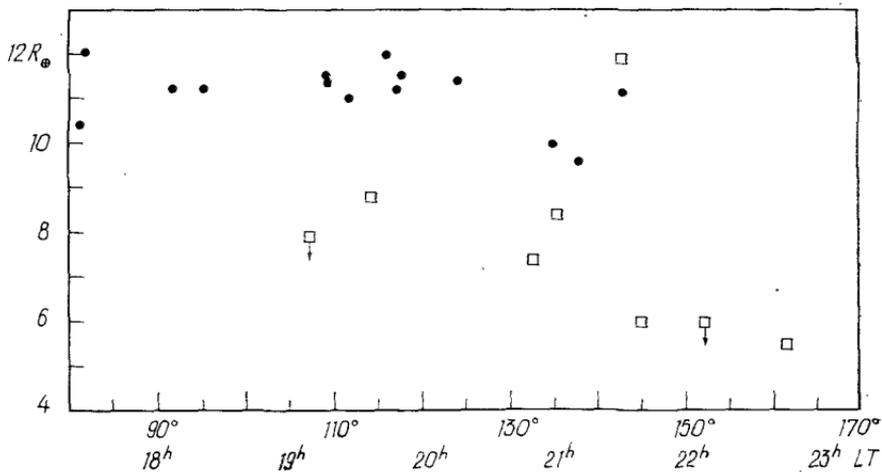
приведена зависимость радиального расстояния до внутренней границы плазменного слоя для периодов с полярными суббурями и без них. На рис. 139в приведены измерения потоков малоэнергичных электронов 11—12 октября 1964 г. Интенсивные потоки были зарегистрированы в 6<sup>h</sup>45<sup>m</sup> UT, через 3 мин после начала отрицательной бухты на станции Черчилл (6<sup>h</sup>42<sup>m</sup> UT), которая находилась в это время в полуночном секторе. Суббуря 12 сентября наблюдалась и спутником «Вела», находившимся на расстоянии 17  $R_{\oplus}$ . Эти наблюдения будут рассмотрены в следующем разделе.

Усиления потока имеют место и для более энергичных электронов ( $E > 45$  кэВ). Было показано [1, 43], что потоки электронов вне области захвата подвержены быстрым изменениям, которые характеризуются увеличением потока за время порядка минуты и гораздо более медленным спадом. Такие всплески энергичных электронов связаны с увеличениями поглощения космического радиоизлучения [37, 38]. На рис. 140а приведены два всплеска электронов, зарегистрированные 22 ноября 1962 г. на спутнике «Эксплорер-14» примерно в 7<sup>h</sup>04<sup>m</sup> и 10<sup>h</sup>12<sup>m</sup> UT. На рис. 140б представлены соответствующие риометрические записи ряда станций, а на рис. 140в — фотоснимки, полученные камерами полного обзора неба в Колледже.

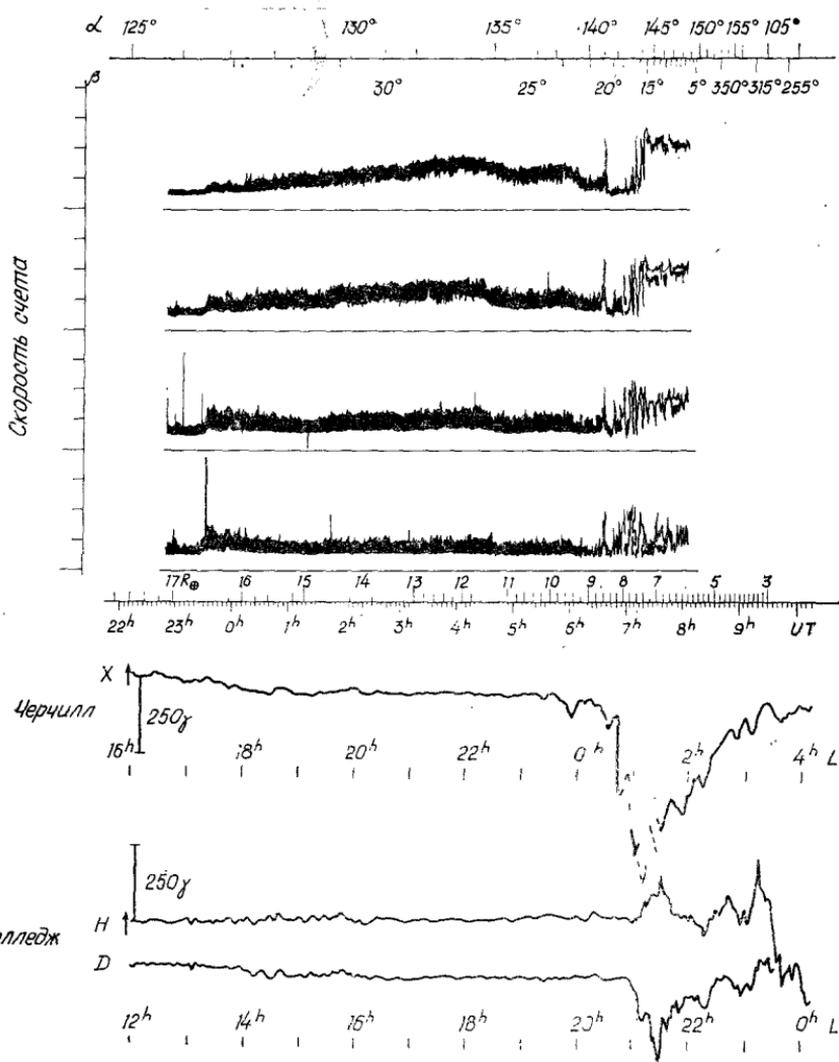
22 ноября 1962 г. были довольно возмущенные условия, южная граница овала полярных сияний уже в 21<sup>h</sup>00<sup>m</sup> LT располагалась



Р и с . 139а. Схематическая картина изменения распределения интенсивных потоков малоэнергичных электронов [49]. *а* — спокойные условия; *б* — во время магнитной бухты. Стрелками показано движение плазмы в начале бухты.

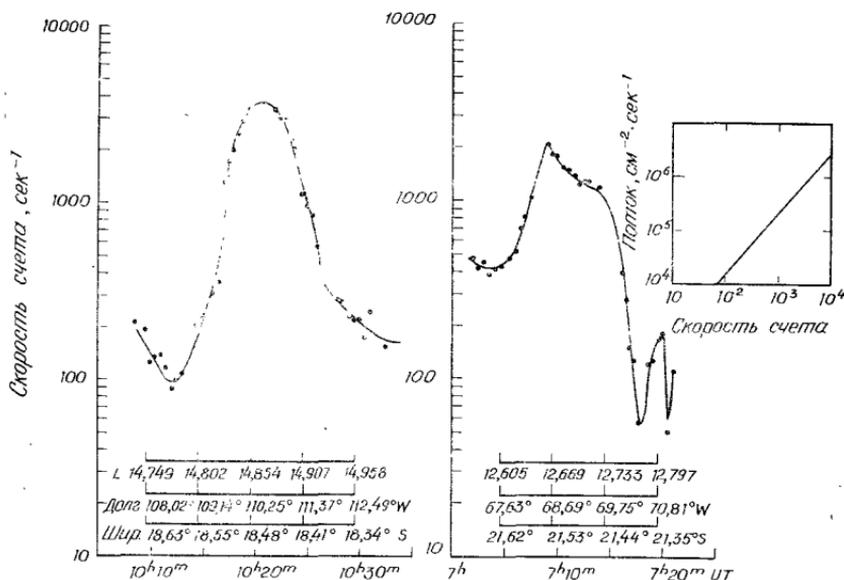


Р и с . 139б. Радиальное расстояние до внутренней границы области интенсивных потоков малоэнергичных электронов в зависимости от местного геомагнитного времени при наличии бухты (квадратики) и без них (точки) [49].



Р и с. 139в. Интенсивные потоки малознергичных электронов 11—12 октября 1964 г. по измерениям на спутнике ОГО-1 (виток № 14) [49]. Угол  $\alpha$  — угол Солнце — центр Земли — спутник, угол  $\beta$  — азимут спутника. Кривые счета соответствуют разным энергетическим каналам (1 деление — 50 отсчетов).

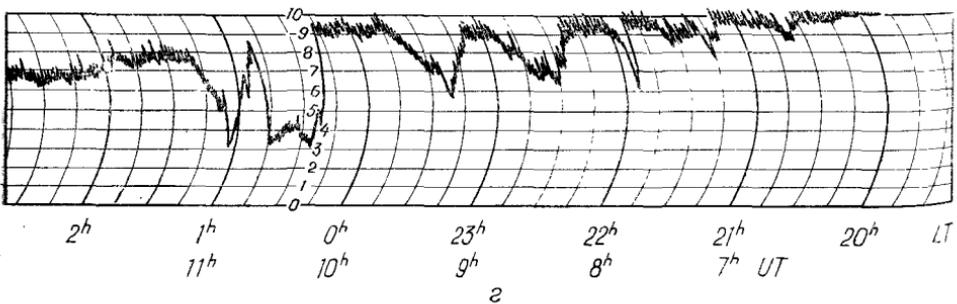
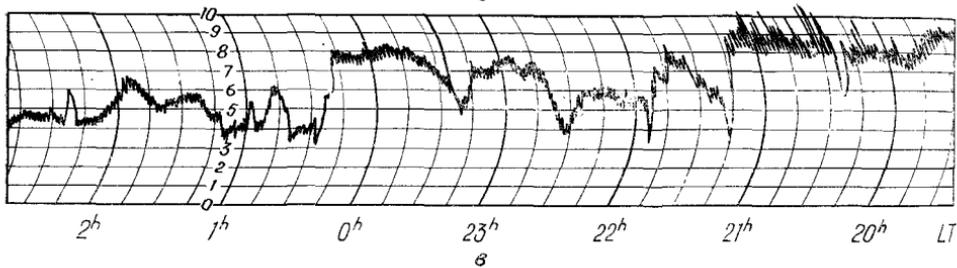
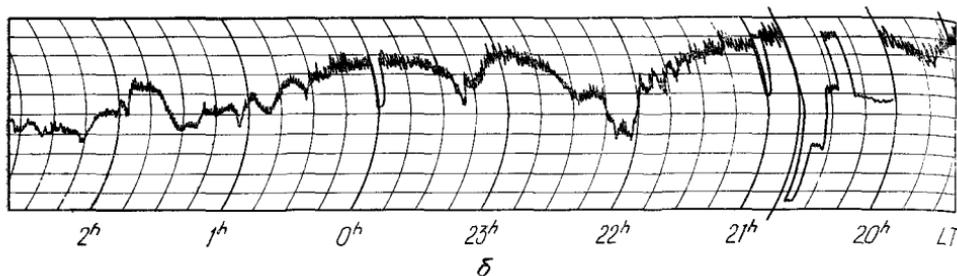
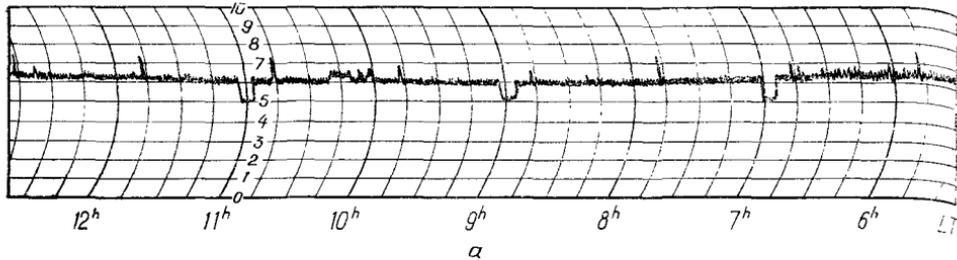
значительно южнее направления на зенит в Колледже. Новая дуга полярного сияния сформировалась к полюсу от самой южной дуги в 7<sup>h</sup>02<sup>m</sup> UT. Движущийся к западу изгиб полярного сияния появился на этой вновь сформировавшейся дуге в 7<sup>h</sup>09<sup>m</sup> UT и покрыл небо над Колледжем в 7<sup>h</sup>15<sup>m</sup> UT. По риометрическим записям видно, что поглощение типа *E* началось в 7<sup>h</sup>10<sup>m</sup> UT в Хэли и в 7<sup>h</sup>12<sup>m</sup> UT в



Р и с. 140а. Всплески электронов, наблюдавшиеся 22 ноября 1962 г. в хвосте магнитосферы на спутнике «Эксплорер-14» [38].  
 В правой верхней части рисунка приведен график перевода скорости счета в поток электронов с энергиями более 65 кэв; скорость счета—число отсчетов в 1,6 сек.

Колледже. Более раннее начало явления в Хэли обусловлено тем, что начальное положение активной дуги было ближе к Хэли, чем к Колледжу. Во время этого явления спутник (на расстоянии 12,6  $R_{\oplus}$ ) и центральная часть Канады находились в полуночном секторе, тогда как Аляска — в вечернем. Можно, таким образом, заключить, что суббуря началась в Канаде примерно в 7<sup>h</sup>02<sup>m</sup>UT или несколько раньше. Следует также отметить, что во время этого явления расширяющаяся выпуклость в полярном сиянии не охватила форт Юкон ( $L=6$ ), так что область интенсивных потоков электронов, по-видимому, была ограничена довольно узкой полосой в южной части Аляски.

Затем были по меньшей мере еще три последовательные слабые суббури, но к 9<sup>h</sup>50<sup>m</sup>UT полярные сияния стали совсем спокойными. В 10<sup>h</sup>04<sup>m</sup>UT возросла яркость самой южной дуги полярного сияния. В 10<sup>h</sup>16<sup>m</sup>UT эта дуга стала очень яркой и начала быстро двигаться к полюсу, что ясно видно по резкому началу усиления поглощения типа  $N$ , зарегистрированному почти одновременно в 10<sup>h</sup>17<sup>m</sup>UT в Хэли и Колледже. В 10<sup>h</sup>13<sup>m</sup>UT на спутнике было зарегистрировано увеличение потока электронов. В это время спутник и Аляска находились в полуночном секторе. Последовательность в развитии полярных сияний была следующей: в 10<sup>h</sup>04<sup>m</sup>UT



Р и с. 1406. Риометрические записи 22 ноября 1962 г. *a* — Туле; *b* — форт Юкон; *в* — Колледж; *г* — Хэли [38].



Р и с. 140в. Фотоснимки полярных сияний, полученные 22 ноября 1962 г. камерой полного обзора неба в Колледже во время двух всплесков электронов, представленных на рис. 140а.

отмечено начало явления (уярчение дуги по наблюдениям в Хэли); в  $10^h 16^m$  UT началось сильное увеличение яркости; примерно через минуту интенсивное полярное сияние охватило почти все небо в пределах поля зрения камеры в Колледже.

#### 9. 4. Область хвоста магнитосферы (спутники «Вела» и ИМП)

##### 9. 4. 1. Поток частиц

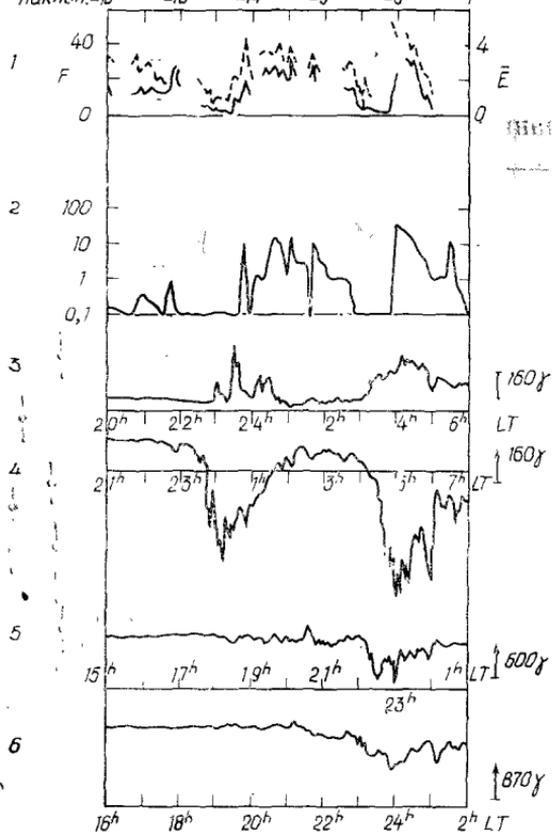
1. *Малознергичные электроны* в хвосте магнитосферы во время полярных суббурь изучались по данным измерений на спутниках «Вела» ( $R=17 R_{\oplus}$ ) [25]. Пример таких данных за 12 октября 1964 г. приведен на рис. 141 (вместе с магнитограммами нескольких станций). Судя по магнитограмме Черчилла, имели место две четкие отрицательные бухты примерно в  $6^h 43^m$  и  $10^h 50^m$  UT. Во время ранней фазы отрицательных бухт скорость счета частиц по счетчику Гейгера упала до фонового значения, уменьшились и показания анализатора частиц. Однако примерно в момент максимума развития бухт около  $7^h 30^m$  UT показания обоих приборов внезапно возросли.

В разд. 9.3 было отмечено, что в этот же день в  $6^h 45^m$  UT спутник ОГО обнаружил движущуюся к Земле границу плазменного слоя. В работе [25] было высказано предположение, что плазменный слой сжимается во время ранней фазы бухт и внезапно расширяется вблизи момента максимума развития бухт. Был сделан также вывод, что увеличения (всплески) потоков горячей плазмы в хвосте происходят за счет процессов, развивающихся в областях, в которых проходят орбиты спутников «Вела».

2. *Электроны с энергиями  $E > 45$  кэв*. Потоки электронов с энергиями более 45 кэв подвержены характерным вариациям, состоящим из быстрого роста и медленного спада [1]. В работе [41] была детально изучена взаимосвязь этого явления с полярными магнитными суббурями. Оказалось, что резкое начало отрицательных бухт имеет место на несколько десятков минут раньше увеличения потока электронов. Разница во времени наименьшая, когда спутник близко к Земле, и возрастает с удалением от Земли (рис. 142). Высказывалось предположение, что возмущение, следствием которого являются магнитные бухты и связанное с ними ускорение частиц, начинается довольно глубоко в магнитосфере и распространяется наружу к более высоким значениям  $L$ .

Было показано [37], что всплески электронов в области хвоста связаны также с увеличением поглощения космического радионизлучения. На рис. 143 приведен пример всплеска электронов, зарегистрированного 28 мая 1964 г. в  $22^h 10^m$  UT спутником ИМП-1 (на расстоянии  $28 R_{\oplus}$ ). Приведены также риометрические записи

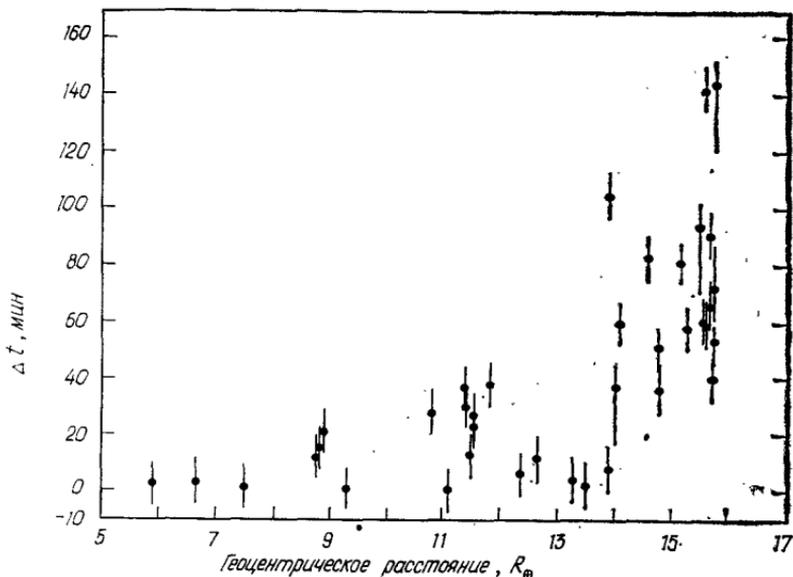
UT	4h	6h	8h	10h	12h	14h
R	17,0	17,0	17,0	17,1	17,1	17,1 R <sub>0</sub>
Шир.	-5°	-9°	-11°	-13°	-17°	-22°
Долг.	189°	195°	202°	209°	216°	222°
Наклон.	-18°	-18°	-14°	-9°	-3°	1°



Р и с. 141. Потоки электронов, зарегистрированные спутником «Вела» 12 октября 1964 г. [25]: 1 — скорость счета ( $F \times 5,2 \cdot 10^6$  электрон/см<sup>2</sup>.сек.стер) электронов с энергиями от 300 эв до 20 кэв (сплошная кривая),  $\bar{E}$  — средняя энергия, измеренная анализатором (штриховая кривая); 2 — скорость счета электронов с  $E > 145$  кэв ( $3 \cdot 10^3$  электрон/см<sup>2</sup>.сек.стер), счетчик Гейгера. Магнитограммы станций: 3 — Бейкер Лейк (гм. широта 74°), 4 — форт Черчилл (гм. широта 69°), 5 — Барроу (гм. широта 69°) и 6 — Колледж (гм. широта 65°).

станций Южный полюс и Кируна. Поглощение на станции Южный полюс (гм. широта 78,5°) началось примерно в то время, когда в хвосте был зарегистрирован всплеск электронов. Магнитограммы станции Халли-Бей (зона полярных сияний) показывают, что полярная суббуря началась раньше (примерно в 22<sup>h</sup>05<sup>m</sup>UT).

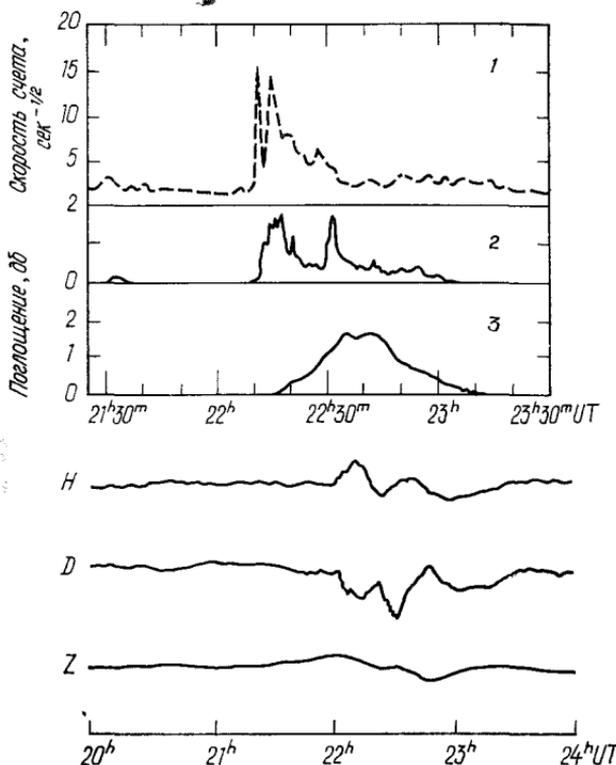
Этот важный пример подсказывает, что суббури в полярном сиянии в зоне сияний должна была начаться примерно в  $22^{\text{h}}05^{\text{m}}\text{UT}$  и что расширяющаяся выпуклость в полярном сиянии должна была достичь станции Южный полюс в  $22^{\text{h}}10^{\text{m}}\text{UT}$ . Фотоснимки, сделанные камерой полного обзора неба (здесь не приведенные), показывают, что активные сияния достигли зенита от горизонта в направлении экватора в  $22^{\text{h}}10^{\text{m}}\text{UT}$ . Можно поэтому заключить, что в ходе данного явления развитие суббури началось сначала



Р и с. 142. Разница в моментах начала внезапных возрастаний потоков электронов в хвосте и полярных магнитных суббурь с 5 марта по 4 апреля 1965 г. [41].

вблизи внешней границы области захвата (или вблизи внутренней границы внешней магнитосферы) и что процесс возмущения распространялся от Земли. Интенсивный поток электронов, генерированных этим процессом, достиг в хвосте расстояния от Земли в  $28R_{\oplus}$  и почти одновременно был зарегистрирован на станции Южный полюс. Данный пример свидетельствует о том, что взрывное движение к полюсу системы полярных сияний в полуночном секторе связано с распространением процесса суббури наружу от Земли. Однако необходимо тщательно проанализировать еще много подобных примеров, прежде чем делать окончательные выводы.

Аналогичное явление 15 мая 1964 г. было рассмотрено в работе [6]. Сопоставление всплеска электронов, начавшегося примерно в  $2^{\text{h}}50^{\text{m}}\text{UT}$ , с риометрическими записями канадских станций показало, что всплеск электронов и увеличение поглощения начались



Р и с. 143. Всплеск потока электронов (1), зарегистрированный 28 мая 1964 г. в хвосте магнитосферы счетчиком Гейгера — Мюллера на спутнике ИМП-1 ( $R = 28R_{\oplus}$ ), риометрические записи станций Южный полюс (2) и Кируна (3), а также магнитограммы трех составляющих геомагнитного поля по измерениям станции Халли-Бей.

примерно в одно и то же время. Однако самое раннее проявление этой полярной суббури было зарегистрировано как отрицательная бухта в Мурманске (гм. широта  $63,5^{\circ}$ ) примерно в  $2^{\text{h}}40^{\text{m}}$  UT, т. е. приблизительно за 10 мин до начала всплеска электронов.

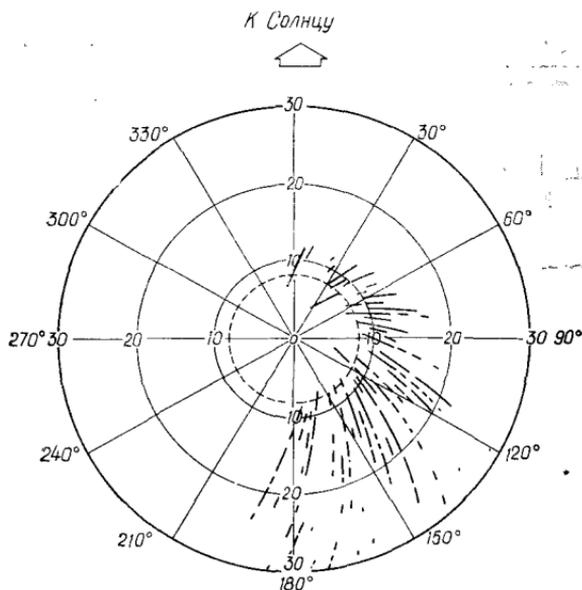
Корреляция всплесков электронов с соответствующими увеличениями поглощения космического радиоизлучения была детально изучена в работе [22], выполненной на основе большого числа данных по риометрам и спутникам «Вела». Основные выводы этого анализа следующие:

1) взаимосвязь возрастаний потоков электронов в хвосте магнитосферы с увеличением поглощения в области *D* подтверждается практически для каждого случая регистрации на спутнике при условии, что положение риометра позволяет записать соответствующее увеличение поглощения;

2) на геоцентрическом расстоянии  $17R_{\oplus}$  возмущения движутся от Земли, причем силовые линии, пересекающие экваториальную

плоскость на  $17R_{\oplus}$ , пересекают поверхность Земли в ночное время значительно ближе к полюсу, чем располагается максимум полярных сияний;

3) поток электронов с энергиями более 45 кэв, вторгающийся в плотные слои атмосферы, значительно интенсивнее соответствующих потоков, регистрируемых на  $17R_{\oplus}$ ; эта особенность, возможно,



Р и с. 144. Области, в которых наблюдались случаи периодической модуляции потоков электронов (спутник ИМП-1, части витков, соответствующие движению к Земле) [31].

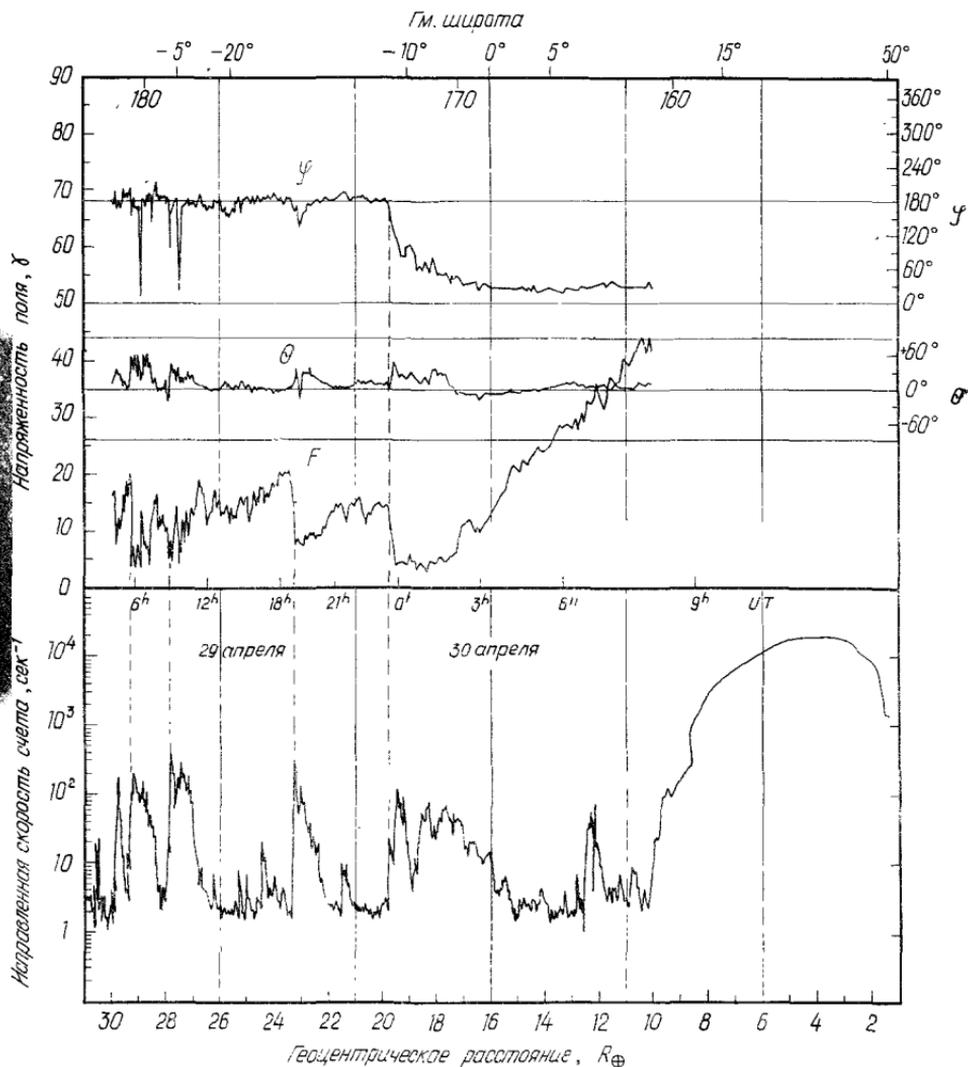
не более чем простой геометрический эффект вследствие того, что всплески размываются в слабом магнитном поле хвоста магнитосферы.

Еще одной интересной особенностью всплесков энергичных электронов в хвосте магнитосферы является сильная асимметрия распределения по отношению к полуночному меридиану [4] и периодическая модуляция потоков. Сообщалось [31], что периоды модуляции меняются от нескольких минут до получаса, причем модуляция может продолжаться до нескольких часов. Амплитуда и длительность существования модуляции увеличиваются с ростом  $K_p$ , что говорит о связи с полярными суббуриями. На рис. 144 указаны места, где обнаруживалась модуляция. Модуляция наиболее сильна в ранние утренние часы и довольно резко ограничена областью с  $L=8$ .

3. Энергичные протоны ( $E > 0,31$  Мэв). Сообщалось [31], что спутник «Эксплорер-33» зарегистрировал небольшой поток протонов  $\sim 5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ , движущихся от Земли вдоль хвоста. Такое явление, по-видимому, связано с развитием полярной суббури.

9. 4. 2. Магнитное поле

Вариация магнитного поля во время полярной магнитной суббури представляет собой уменьшение напряженности поля. Уменьшение поля хорошо коррелирует со всплесками электронов, упомянутыми в разд. 9.4.1 (рис. 145) [2]. Предполагается, что понижение напряженности поля вызывается диамагнитным



Р и с. 145. Корреляция уменьшения напряженности магнитного поля в хвосте со всплесками электронов. Измерения на спутнике ИМП-1, виток № 40, движение к Земле. Углы  $\varphi$  и  $\theta$  определяют пространственную ориентацию вектора магнитного поля [2].

эффектом плазмы, хотя диамагнетизм измеренного потока электронов объясняет всего около 1% общего эффекта. Поскольку такие всплески электронов наблюдаются во время полярных магнитных суббурь, то естественно сделать вывод, что диамагнитный эффект — это появление суббури в магнитном поле хвоста.

Рассмотренные случаи уменьшения поля не следует путать с общим увеличением напряженности поля хвоста в возмущенные периоды [51]; эффекты суббурь накладываются на такое общее увеличение.

Было показано [33], что хотя меридиональная составляющая поля хвоста в общем положительна, на расстояниях более  $30 R_{\oplus}$  часто наблюдаются случаи смены ее направления на обратное (вниз). Было бы очень интересно проанализировать, связаны ли такие обращения с полярными суббурями.

### 9. 5. Область захвата в магнитосфере ( $R < 6R_{\oplus}$ )

Со времени открытия радиационных поясов вариации потока и спектры энергичных частиц в области их захвата изучались целым рядом исследователей. Результаты этих работ суммированы в книге Гесса [24] и обзоре Родерера [39]. К сожалению, большинство исследований по этому вопросу основано на данных об изменениях радиационных поясов в функции времени от начала бури; поэтому временная шкала слишком велика, чтобы можно было изучать вариации отдельных суббурь. Магнитосферная суббуря, несомненно, представляет собой явление с большим расходом энергии и, конечно, должна играть важную роль в определении поведения энергичных частиц в области захвата. В разд. 9.2 было показано, что потоки электронов с энергиями более 50 кэВ существенно увеличиваются во время отдельных суббурь. Значит, большая их часть должна генерироваться внутри области захвата или же поставляться извне спорадически и импульсно в результате процессов, связанных с суббурями. Поэтому без исследования вариаций потоков частиц в функции времени от начала суббури нельзя понять основные процессы, генерирующие частицы радиационных поясов.

Вариации радиационных поясов во время магнитных бурь имеют два аспекта. Что касается общей кинетической энергии, то энергичные частицы (протоны и электроны с энергиями более 100 кэВ) вряд ли имеют первостепенное значение; некоторые из них могут быть просто побочными продуктами процессов во время суббурь. А на долю частиц с энергиями менее 100 кэВ, особенно протонов с энергиями менее 50 кэВ, приходится значительная часть энергии (см. разд. 10.4.1)\*. Если они являются побочным продуктом суб-

\* Справедливость этого утверждения особенно убедительно показали измерения на спутнике ОГО-5. —Прим. ред.

бурь, то основными процессами затраты энергии являются накопление энергии в полярной верхней атмосфере и передача энергии протонам. По этой причине поведение малоэнергичных частиц с энергиями менее 100 кэв может дать ключ к пониманию основных процессов, определяющих развитие магнитосферной суббури.

### 9. 5. 1. Энергичные электроны

Изменения потока электронов с энергиями порядка 40 кэв коррелируют с изменениями индекса  $K_p$ . Это наиболее отчетливо проявляется в центральной области внешнего пояса ( $L=4-4,5$ ). На  $L=3,0$  поток электронов и индекс  $K_p$  коррелируют плохо.

Электроны с энергиями более 280 кэв ведут себя несколько иначе. На  $L>4,5$  при  $\Sigma K_p > 20$  имеет место быстрое уменьшение потока: с последующим восстановлением до исходного уровня. На  $L < 4,0$  начальное уменьшение не имеет места. Получены доказательства [51] в пользу представлений о локальном ускорении электронов с энергиями более 300 кэв примерно на  $L=4$  и последующей их диффузии к Земле и от нее.

С геомагнитной активностью заметно меняется и поток электронов с энергиями более 1,6 Мэв. Для этих изменений характерны быстрое уменьшение во время ранней фазы геомагнитных возмущений и последующее вполне заметное восстановление.

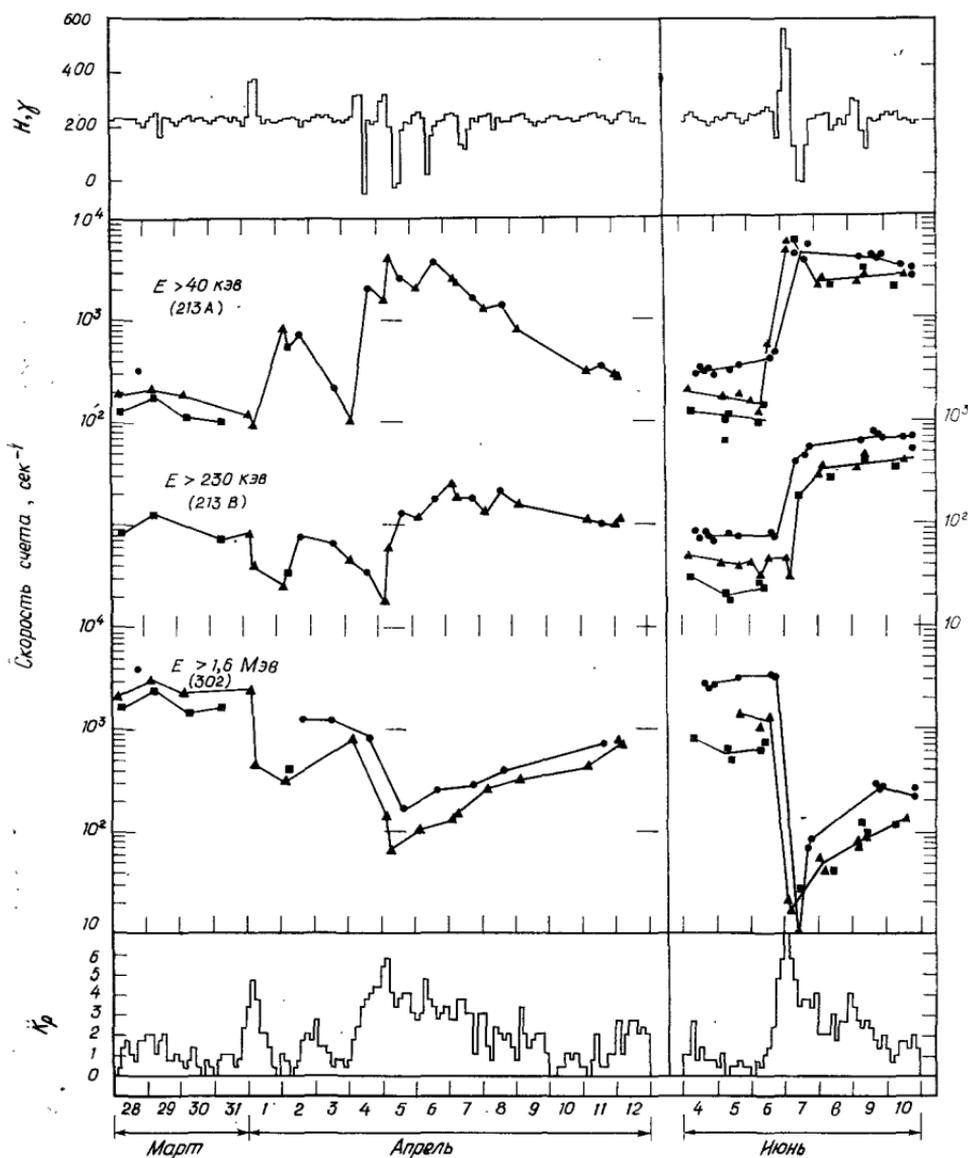
Указанные особенности были детально изучены по данным измерений с наилучшим разрешением по времени ( $\sim 2$  час), проведенных на спутнике «Инджун-3» в течение двух периодов (28 марта—12 апреля и 4—10 июня 1963 г.). На рис. 146 видно, что изменения потоков электронов могут происходить за несколько часов, что значительно короче длительности геомагнитных бурь.

### 9. 5. 2. Протоны с энергиями 1—50 кэв

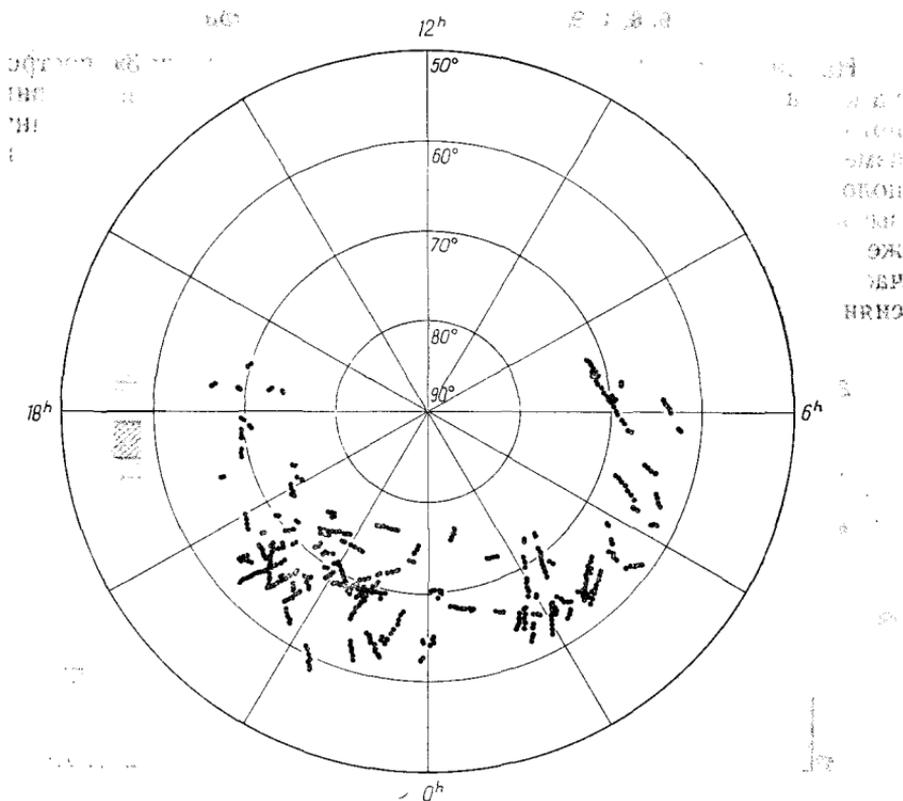
К сожалению, вариации потока протонов с такими энергиями во время полярных суббурь пока не изучены. Однако было показано [13—16], что даже при довольно слабых магнитных бурях протоны являются глубоко в магнитосфере и что отношение плотности кинетической энергии протонов к плотности энергии магнитного поля иногда превышает единицу.

## 9. 6. Наблюдения при помощи спутников на малых высотах

Обширные исследования вариаций потоков энергичных частиц были проведены также при помощи спутников на малых высотах. Некоторые результаты этих исследований уже упоминались в предыдущих разделах. Основная часть этих работ была суммирована О'Брайеном [34] и другими авторами, поэтому главное внимание



Р и с . 146. 3-часовые средние значения горизонтальной составляющей магнитного поля в Колледже, вариации потока электронов различных энергий, измерявшегося тремя различными счетчиками (кружки  $0,17 \leq B < 0,25$ , треугольники  $0,25 \leq B < 0,30$ , квадратики  $0,30 \leq B \leq 0,37$ ), и 3-часовые значения индекса  $K_p$  за два периода 1963 г. [8].



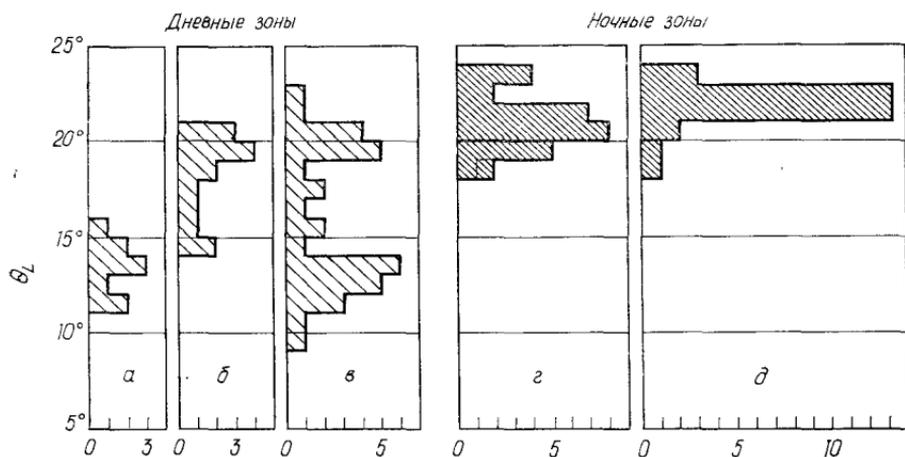
Р и с. 147. Распределение областей, где наблюдались интенсивные потоки электронов с энергиями более 10 кэв [20].

можно обратить лишь на часть соответствующих результатов, относящихся к суббурям и связанным с ними явлениям.

Орбитальные характеристики спутников на малых высотах неудобны для наблюдения развития отдельных полярных суббурь, поскольку период их обращения вокруг Земли сравним с временем жизни суббури. Тем не менее данные измерений на таких спутниках представляют ценность по крайней мере в двух отношениях. Во-первых, поскольку эти спутники быстро движутся с севера на юг, их можно использовать для грубой оценки широтного распределения потоков частиц и интенсивности авроральных излучений в конкретный момент суббури и в определенном секторе местного времени. Во-вторых, такие спутники могут обеспечить обширный статистический материал с гораздо большей эффективностью, чем меридиональная цепочка наземных обсерваторий. Именно по этой причине некоторые спутниковые наблюдения уже приводились в предыдущих разделах.

9. 6. 1. Электроны с энергиями  $\sim 10$  кэв

На основе данных измерений на спутнике «Инджун-3» построена карта распределения областей, где наблюдались интенсивные потоки электронов с энергиями более 10 кэв (рис. 147). Данные измерений относятся только к неосвещенной полусфере, но положение экваториальной границы области высыпаний подсказывает, что они имеют место вдоль овала полярных сияний. К тому же интенсивные потоки регистрировались в области, где наиболее часто появляются движущиеся к западу изгибы полярных сияний.

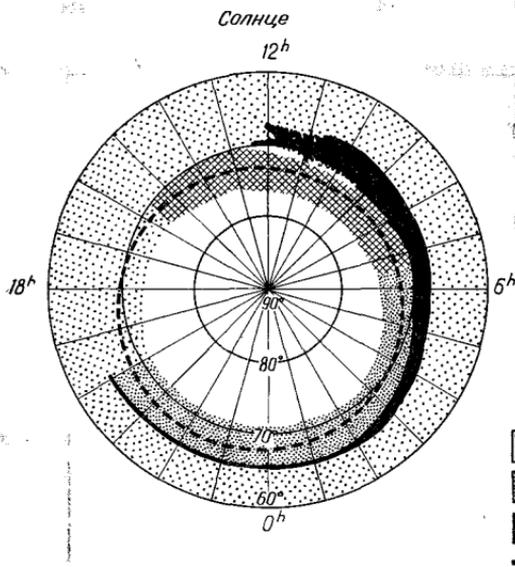


Р и с. 148. Широтное распределение высыпания электронов и протонов вдоль полуденно-полуночного меридиана (по оси абсцисс — число случаев на  $1^\circ$  кошироты); данные за 9—10 ноября 1965 г. [44].  
 а — мягкие электроны, б — жесткие электроны, в — протоны, г — электроны, д — протоны.

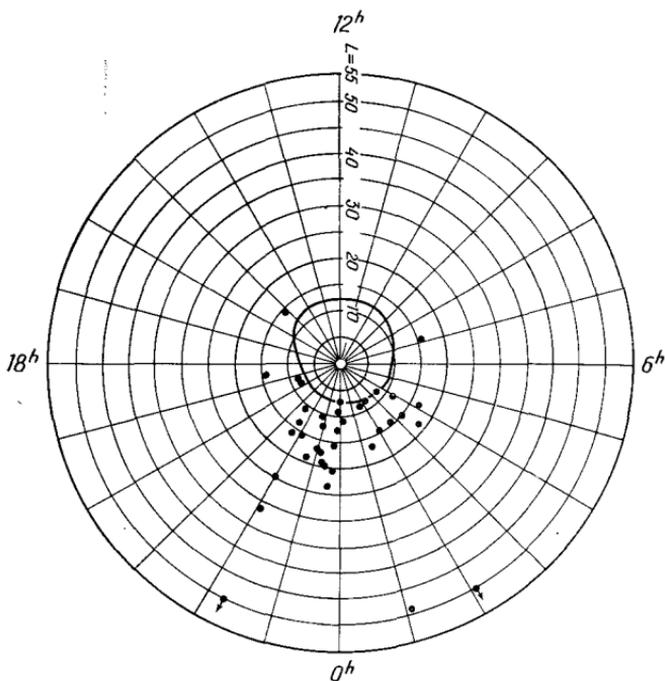
Были проведены обширные исследования потоков частиц и вдоль полуночно-полуденного меридиана [10, 45, 46]. На полуночном меридиане имеется одиночная узкая полоса, в которой происходит высыпание как электронов, так и протонов. На полуденном меридиане имеются две отдельные полосы (рис. 148): мягкие электроны высыпаются в полосе, центр которой приходится на  $77^\circ$ , а жесткие — на  $71^\circ$ . Вероятно, высыпание на более высокой широте соответствует овалу полярных сияний, а на более низкой — области поглощения типа *M*.

9. 6. 2. Электроны с энергиями  $\sim 50$  кэв

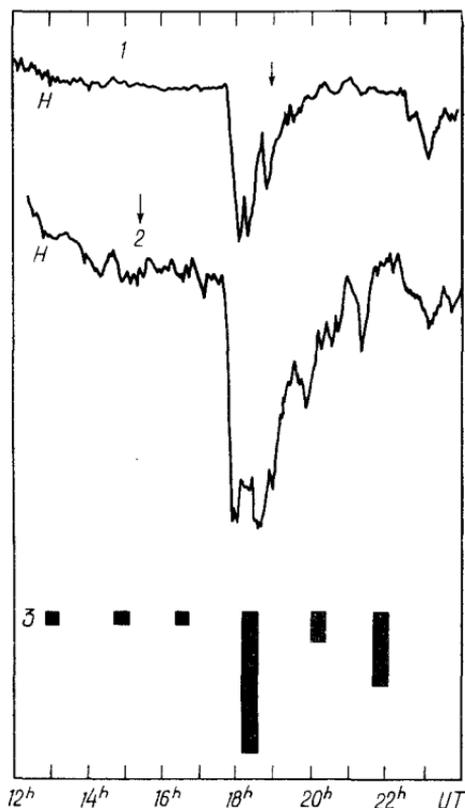
По данным спутниковых измерений удалось построить линию пересечения ионосферы силовыми линиями, проходящими вдоль



Р и с. 149. Распределение различных степеней изотропии потока электронов с энергиями более 40 кэв [19].  
1 — анизотропия ( $\varphi < 0,5$ ), 2 — изотропия ( $\varphi > 0,5$ ), 3 — граница, 4 — средняя граница.



Р и с. 150. Распределение областей, где наблюдались интенсивные потоки электронов с энергиями более 40 кэв [32].



Р и с. 151. Внезапное увеличение потоков электронов, наблюдавшееся над Канадой во время интенсивной отрицательной бухты в Сибири 8 октября 1962 г. [26]. 1 — о. Диксон, 2 — бух. Тикси, 3 — потоки электронов. Стрелками указаны моменты местной полноты на о. Диксон и в бух. Тикси.

внешней границы области захвата (иначе говоря, проекцию вдоль силовых линий внешней границы области захвата на ионосферу) [17, 32]. В общем поток электронов с энергиями более 40 кэВ и питч-углами  $90^\circ$  резко уменьшается на широтах выше некоторой границы. Эта граница эксцентрична по отношению к полюсу диполя. В разд. 1.1 отмечалось, что эта линия пересечения ионосферы и внешней границы области захвата приблизительно совпадает с овалом полярных сияний.

Недавно эта граница была исследована более детально [19] посредством введения параметра  $\phi$ , определяемого как отношение потока высыпающихся в атмосферу электронов с  $E > 40$  кэВ к потоку электронов с такими же энергиями, отражающихся вблизи положения спутника «Инджун-3». В полуночном секторе параметр  $\phi$  очень быстро увеличивается вблизи границы в сторону больших

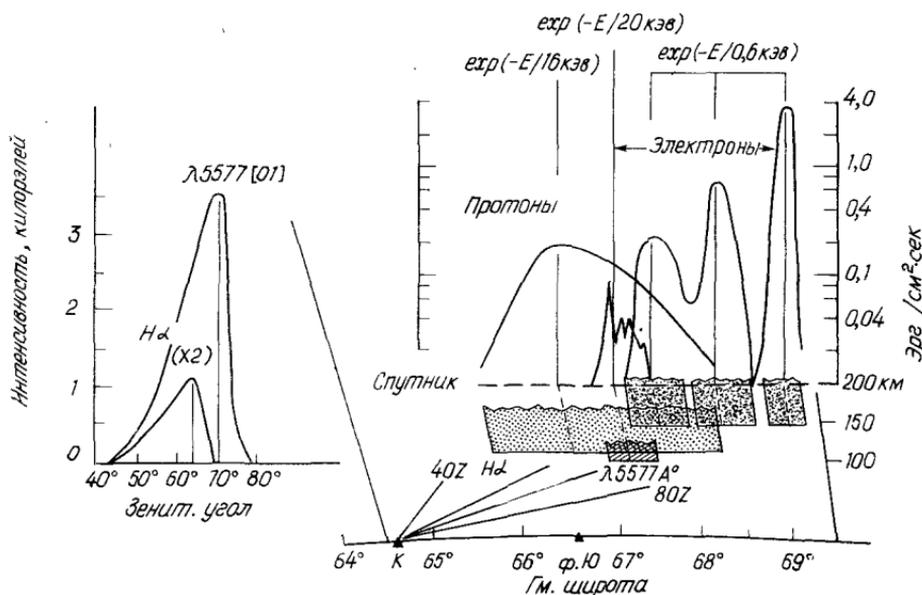
широт от примерно  $10^{-2}$  до 1. На широтах выше границы поток остается изотропным ( $\varphi=1$ ). Однако с ростом местного времени тенденция к изотропии вблизи границы уменьшается; в  $18^h$ LT изотропия наблюдается очень редко (рис. 149).

Интересной особенностью распределения электронов с  $E > 40$ кэВ является очень высокая интенсивность потоков за пределами границы (рис. 150).

Интенсивные потоки электронов были зарегистрированы в дневном секторе, когда в полуночном секторе развивались полярные магнитные суббури [26]. На рис. 151 показано заметное увеличение потока электронов в период резкой ночной отрицательной бухты в Сибири (о. Диксон, бух. Тикси), зарегистрированное при последовательных прохождении спутника над Канадой.

### 9. 6. 3. Протоны

Как упоминалось ранее, вдоль полуночно-полуденного меридиана имеется одиночный максимум выпадения протонов вблизи зоны полярных сияний в ночном секторе и двойной максимум в дневном секторе [44]. Энергетические спектры этих максимумов, по-видимому, одинаковы, однако поток в вечернем секторе более интенсивен, чем в утреннем. На рис. 152 представлены некоторые



Р и с. 152. Одновременные наблюдения протонного полярного сияния спутниковыми детекторами и наземными приборами [40] (К—Колледж, ф. Ю — форт Юкон).

результаты наблюдений излучения в линии  $H\alpha$  (водородные полярные сияния) при помощи детектора на спутнике и наземных приборов [40]. В одном случае водородное полярное сияние имело протяженность по широте около  $3^\circ$  (от  $65,7$  до  $68,3^\circ$ ). В пределах этого сияния была одна узкая область, в которой выпалились жесткие электроны; в этой области регистрировалось излучение в линии  $\lambda 5577 \text{ \AA}$ . Наблюдалось три области выпадения мягких электронов, одна из которых находилась в водородном полярном сиянии, вторая — вблизи обращенной к полюсу границы этого сияния, а третья — еще дальше к полюсу.

#### 9. 6. 4. Магнитное поле

Над овалом полярных сияний (но не везде) наблюдались перпендикулярные к направлению магнитного поля магнитные возмущения [52, 53]. При сдвиге овала к экватору во время геомагнитных бурь происходил сдвиг области поперечных магнитных возмущений. Предполагается, что эти возмущения вызваны электрическими токами, текущими вдоль силовых линий геомагнитного поля, проходящих через овал.

Были проанализированы также данные полярного спутника ОГО-2 за 13—14 марта 1966 г. [28]. Спутник измерял только модуль вектора напряженности возмущенного поля, тем не менее удалось оценить распределение тока поперек траектории полета. Согласно [28], двухвихревая модель токовой системы ( $SD$ -токовая система) лучше согласуется с наблюдениями, чем одновихревая (о моделях токовых систем см. гл. 3, рис. 31а—31в).

### 9. 7. Солнечный ветер и полярные магнитные суббури

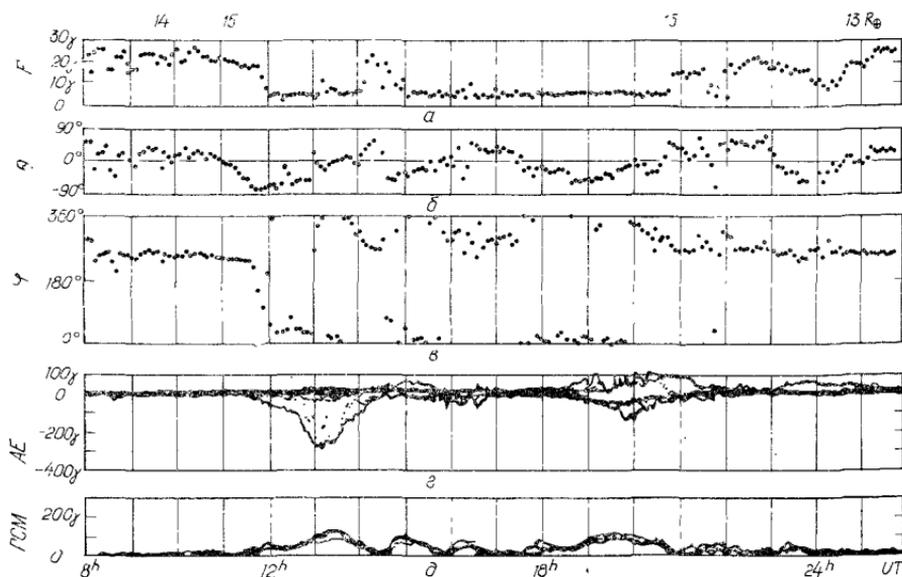
#### 9. 7. 1. Частицы солнечного ветра

До сих пор всего несколько исследований было посвящено возможной связи изменений параметров солнечного ветра (концентрация, скорость, поток частиц, поток энергии и импульса) и начал отдельных полярных суббурь. Тем не менее удалось показать [42, 48, 50], что единственной величиной, имеющей очевидную связь с геомагнитным планетарным индексом  $K_p$ , является скорость солнечного ветра. Между концентрацией солнечного ветра и индексом  $K_p$  корреляция плохая.

Это заключение подтверждается наблюдениями солнечного ветра во время геомагнитной бури 17—18 апреля 1954 г., проведенными на спутнике «Вела» [21]. Во время ранней фазы бури, когда неоднократно возникали интенсивные полярные суббури, видимых изменений параметров солнечного ветра не было.

## 9. 7. 2. Межпланетное магнитное поле

Обнаружено, что направленная к югу составляющая межпланетного магнитного поля более тесно связана с полярными магнитными суббурями, чем направленная к северу [11, 12]. Пример такой связи приведен на рис. 153 по измерениям 5—6 ноября 1964 г. с 9<sup>h</sup>00<sup>m</sup> до 11<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT; условия были спокойными. В 11<sup>h</sup>05<sup>m</sup> UT угол  $\theta$  стал отрицательным. Это значит, что меридиональная сос-



Р и с. 153. Возможная связь между изменениями межпланетного магнитного поля и полярными магнитными суббурями [11]. *a* — напряженность поля, *b* и *в* — широта и долгота в солнечно-эклиптической системе координат, определяющие ориентацию вектора поля в пространстве, *г* — индекс силы тока в полярной электроосфере, определяемый как огибающая наложенных друг на друга магнитограмм 6 арктических станций, *д* — возмущение поля в полярной шапке по данным станций Резольют, Моулд-Бей и Алерт.

ставляющая сменила знак и стала направленной к югу. Вскоре после этого возрос индекс *AE*. Затем примерно в 14<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT угол  $\theta$  опять стал положительным; в 14<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, 17<sup>h</sup>40<sup>m</sup> и 23<sup>h</sup>00<sup>m</sup> UT он был отрицательным. Во время этих изменений наблюдались некоторые признаки полярных магнитных возмущений. Направление межпланетного магнитного поля на север связано с уменьшением полярных магнитных возмущений. Результаты статистического изучения приведены на рис. 154 [11]. Самые сильные возмущения связаны с большой направленной к югу (отрицательной) составляющей межпланетного поля, самые спокойные условия — с небольшой по величине и направленной к северу (положительной) состав-

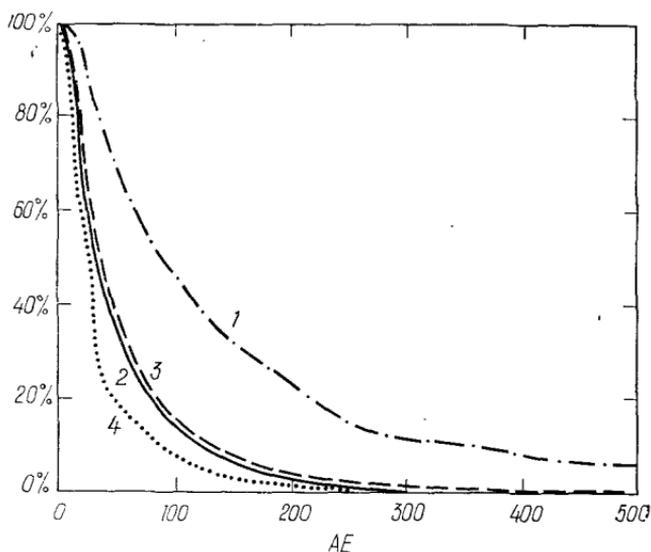


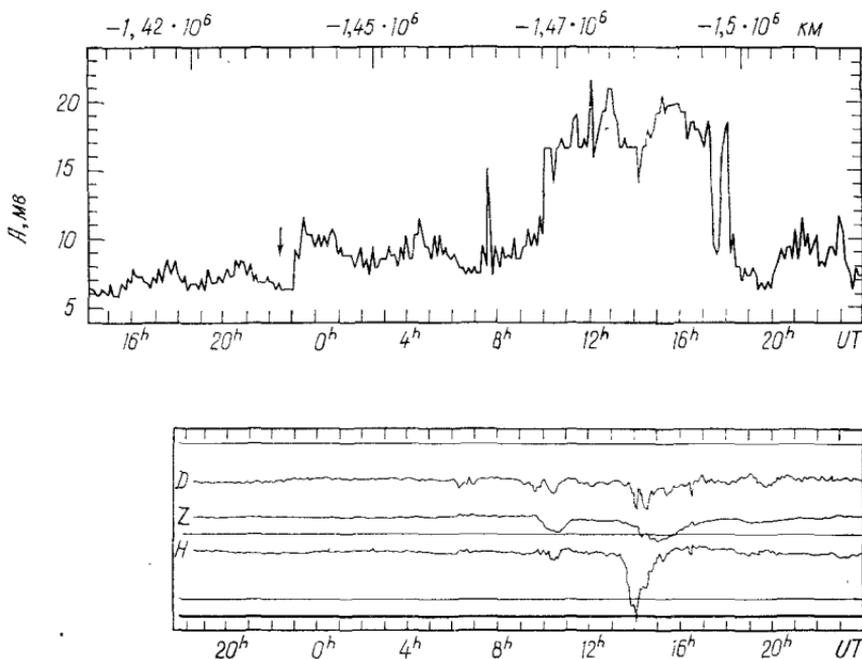
Рис. 154. Доля случаев, когда индекс  $AE$  превышал значения, указанные по оси абсцисс. Четыре кривые соответствуют различным величинам и направлениям магнитного поля в переходной области по измерениям на спутнике ИМП-2 (первые 40 витков) [11]: 1—отрицательное направление поля,  $F > 15 \gamma$  (68 час наблюдений); 2—положительное направление поля,  $F > 15 \gamma$  (71 час наблюдений); 3—отрицательное направление поля,  $F < 15 \gamma$  (108 час наблюдений); 4—положительное направление поля,  $F < 15 \gamma$  (98 час наблюдений).

ляющей межпланетного поля. Результаты этой работы свидетельствуют о том, что геомагнитная активность зависит как от величины так и от направления межпланетного поля.

Однако было показано [42, 50], что единственной величиной, имеющей очевидную связь с  $K_p$ , является напряженность межпланетного поля.

### 9. 7. 3. Электрическое поле

Электрические поля в диапазоне ОНЧ (0,1—100 кГц) в межпланетном пространстве измерялись на «Пионере-8» [47]. Пример данных, полученных 29—30 декабря 1967 г., приведен на рис. 155. В этот день «Пионер-8» находился на таком расстоянии от Земли, которое солнечный ветер проходит примерно за 55—65 мин при обычной скорости потока (380—450 км/сек). Приведены также магнитограммы станции Колледж. Было высказано предположение [47], что интенсивная отрицательная бухта, начавшаяся в Колледже в 13<sup>h</sup>44<sup>m</sup> UT, была связана со всплесками шумового электрического поля в диапазоне ОНЧ, наблюдавшимися на «Пионере-8» в 14<sup>h</sup>50<sup>m</sup> UT.



Р и с. 155. Интенсивные электрические поля в диапазоне ОНЧ, наблюдавшиеся в межпланетном пространстве 29—30 декабря 1967 г. на «Пионере-8» (удаление от Земли по оси  $y$  в солнечно-эклиптической системе координат составляло  $-0,585 \cdot 10^6$  км). Стрелкой указан момент внезапного начала бури, зарегистрированный на поверхности Земли. По оси ординат отложена величина  $A$  — амплитуда потенциала в широкой полосе частот. Внизу приведены магнитограммы геомагнитного поля, полученные на станции Колледж [47].

#### ЛИТЕРАТУРА

##### Общая

- O'Brien B. J., Review of studies of trapped radiation with satellite-borne apparatus, *Space Sci. Rev.*, **1**, 415—484 (1962).  
 O'Brien B. J., Interrelations of energetic charged particles in the magnetosphere, *Solar-Terrestrial Physics*, eds. J. W. King and W. S. Newman, Academic Press, New York, 1967, p. 169—211. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)  
 Gowll R. R., Electron precipitation in the auroral zone, *Space Sci. Rev.*, **5**, 311—387 (1966).  
 Hess W. N., *The radiation belt and magnetosphere*, Blaisdel Publ. Co., Waltham, Mass., 1968.

##### Цитированная в тексте

- Anderson K. A., Energetic electron fluxes in the tail of the geomagnetic field, *J. Geophys. Res.*, **70**, 4741—4763 (1965).
- Anderson K. A., Ness N. F., Correlation of magnetic fields and energetic electrons on the IMP 1 satellite, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3705—3727 (1966).

3. Armstrong T. P., Krimigis S. M., Observations of protons in the magnetosphere and magnetotail with Explorer 33, *J. Geophys. Res.*, **73**, 143—152 (1968).
4. Bame S. J., Asbridge J. R., Felthouser J. E., Hones E. W., Jr., Strong I. B., Characteristics of the plasma sheet in the earth's magnetotail, *J. Geophys. Res.*, **72**, 113—129 (1967).
5. Behannon K. W., Ness N. F., Magnetic storms in the earth's magnetic tail, *J. Geophys. Res.*, **71**, 2327—2351 (1966).
6. Brice N., Morphology of elementary magnetospheric substorms, Cornell-Sydney Univ. Astron. Center, CSUAC 94, 1967.
7. Coleman P. J., Jr., Cummings W. D., *Radio Sci.*, **3**, 762 (1968).
8. Craven J. D., Temporal variations of electron intensities at low altitudes in the outer radiation zone as observed with satellite Injun 3, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5643—5663 (1966).
9. Davis T. N., Sugiura M., Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations, *J. Geophys. Res.*, **71**, 785—801 (1966).
10. Evans J. E., Joki E. G., Johnson R. G., Sharp R. D., Austral and boreal zone precipitation patterns for low-energy protons, *Space Res.*, Vol. VI, ed. R. L. Smith-Rose, Spartan Books, Washington, 1966, p. 773—788.
11. Fairfield D. H., Polar magnetic disturbances and the interplanetary magnetic field, Goddard Space Flight Center, Publ. X-612-67-338, July 1967.
12. Fairfield D. H., Cahill L. J., Jr., Transition region magnetic field and polar magnetic disturbances, *J. Geophys. Res.*, **71**, 155—169 (1966).
13. Frank L. A., Initial observations of low-energy electrons in the earth's magnetosphere with OGO 3, *J. Geophys. Res.*, **72**, 185—195 (1967).
14. Frank L. A., On the extraterrestrial ring current during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3753—3767 (1967).
15. Frank L. A., On the distributions of low-energy protons and electrons in the earth's magnetosphere, *Earth's Particles and Fields*, ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York, 1967, p. 67—87.
16. Frank L. A., Several observations of low-energy protons and electrons in the earth's magnetosphere with OGO 3, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1905—1916 (1967).
17. Frank L. A., Van Allen J. A., Graven J. D., Large diurnal variations of geomagnetically trapped and of precipitated electrons observed at low altitudes, *J. Geophys. Res.*, **69**, 3155—3167 (1964).
18. Freeman J. W., Jr., Observation of flow of low-energy ions at synchronous altitude and implications for magnetospheric convection, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4151—4158 (1968).
19. Fritz T. A., The high latitude outer zone boundary for  $>40$  keV electrons as observed by Satellite Injun 3, Dept. Physics and Astronomy, Univ of Iowa, 68—21, March, 1968.
20. Fritz T. A., Gurnett D. A., Diurnal and latitudinal effects observed for 10-keV electrons at low satellite altitudes, *J. Geophys. Res.*, **70**, 2485—2502 (1965).
21. Gosling J. T., Asbridge J. R., Bame S. J., Hudhausen A. J., Strong I. B., Measurements of the interplanetary solar wind during the large geomagnetic storm of April 17—18, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1813—1821 (1967).
22. Hargreaves J. K., Hones W. W., Jr., Singer S., Relations between bursts of energetic electrons at 17 earth-radii in the magnetotail and radio absorption events in the ionospheric D-region, *Planet. Space Sci.*, **16**, 567—580 (1968).
23. Heppner J. P., Sugiura M., Skillman T. L., Ledley B. G., Campbell M., OGO-A magnetic field observations, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5417—5471 (1967).

24. Hess W. N., The radiation belt and magnetosphere, Blaisdell Publ. Co., Waltham, Mass., 1968.
25. Hones E. W., Jr., Asbridge J. R., Bame S. J., Strong I. B., Outward flow of plasma in the magnetotail following geomagnetic bays, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5879—5892 (1967).
26. Jelly D., Brice N., Changes in the Van Allen radiation associated with polar substorms, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5919—5931 (1967).
27. Konradi A., Proton events in the magnetosphere associated with magnetic bays, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3829—3841 (1967).
28. Langel R. A., Cain J. C., OGO-2 magnetic field observations during the magnetic storm of March 13—15, 1966, Goddard Space Flight Center, Publ. X-612-68-88, October 1967.
29. Lanzerotti L. J., Roberts C. S., Brown W. L., Temporal variations in the electron flux at synchronous altitudes, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5893—5902 (1967).
30. Lezniak T. W., Arnoldy R. L., Parks G. K., Winckler J. R., Measurement and intensity of energetic electrons at the equator at 6.6  $r_e$ , *Radio Sci.*, **3**, 710—714 (1968).
31. Lin R. P., Anderson K. A., Periodic modulations of the energetic electron fluxes in the distant radiation zone, *J. Geophys. Res.*, **71**, 1827—1835 (1966).
32. McDiarmid I. B., Burrows J. R., Local time asymmetries in the high-latitude boundary of the outer radiation zone for the different electron energies, *Canadian J. Phys.*, **46**, 49—57 (1968).
33. Mihalov J. D., Colburn D. S., Currie R. G., Sonett C. P., Configuration and reconnection of the geomagnetic tail, *J. Geophys. Res.*, **73**, 943—959 (1968).
34. O'Brien B. J., Interrelations of energetic charged particles in the magnetosphere, *Solar-Terrestrial Physics*, eds. J. W. King, W. S. Newman, Acad. Press, New York, 1967, p. 169—211. (Русский перевод в сб. «Солнечно-земная физика», М., изд-во «Мир», 1968.)
35. Parks G. K., Winckler J. R., Acceleration of energetic electrons observed at the 6.6  $R_e$  equatorial plane during magnetospheric substorms, *Cosmic Ray Group, School of Physics and Astronomy, Univ. of Minnesota Report*, 1968.
36. Parks G. K., Arnoldy R. L., Lezniak T. W., Winckler J. R., Conjugate effects on energetic electrons between the equator at 6.6  $R_e$  and the auroral zone, *Radio Sci.*, **3**, 715—719 (1968).
37. Parthasarathy R., Reid G. C., Magnetospheric activity and its consequences in the auroral zone, *Planet. Space Sci.*, **15**, 917—929 (1967).
38. Reid G. C., Parthasarathy R., Ionospheric effects of energetic electron bursts in the tail of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3267—3272 (1966).
39. Roederer J. G., Experimental evidence on radial diffusion of geomagnetically trapped particles, *Earth's Particles and Field*, ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York, 1968, p. 143—155.
40. Romick G. J., Sharp R. D., Simultaneous measurements of an incident hydrogen flux and the resulting hydrogen Balmer alpha emission in an auroral hydrogen arc, *J. Geophys. Res.*, **72**, 4791—4801 (1967).
41. Rothwell P., Wallington V., The polar substorm and electron «islands» in the earth's magnetic tail, *Birkeland Symposium*, Sandfjord, Norway, 1967.
42. Schatten K. H., Wilcox J. M., Response of the geomagnetic activity index  $K_p$  to the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5185—5191 (1967).
43. Serlemitsos P., Low-energy electrons in the dark magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **71**, 61—77 (1966).

44. Sharp R. D., Johnson R. G., Satellite measurements of auroral particle precipitation, *Earth's Particles and Fields*, ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York, 1967, p. 113—125.
45. Sharp R. D., Johnson R. G., Some average properties of auroral electron precipitation as determined from satellite observations, *J. Geophys. Res.*, **73**, 969—990 (1968).
46. Sharp R. D., Johnson R. G., Shea M. F., Shook G. B., Satellite measurements of precipitating protons in the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **72**, 227—237 (1967).
47. Scarf F. L., Crook G. M., Green I. M., Virobik P. F., Initial results of the Pioneer 8 VLF electric field experiment, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6665—6686 (1968).
48. Snyder C. W., Neugebauer M., Rao U. R., The solar wind velocity and its correlation with cosmic-ray variations and with solar and geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, **68**, 6361—6370 (1963).
49. Vasyliunas V. M., A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with OGO 1 and OGO 3, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2839—2884 (1968).
50. Wilcox J. M., Schatten K. H., Ness N. F., Influence of interplanetary magnetic field and plasma on geomagnetic activity during quiet-sun conditions, *J. Geophys. Res.*, **72**, 19—26 (1967).
51. Williams D. J., Arens J. F., Lanzerotti L. J., Observations of trapped electrons at low and high altitudes, *Goddard Space Flight Center Report, X-611-68-38*, February 1968.
52. Zmuda A. J., Heuring F. T., Martin J. H., Dayside magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral oval, *J. Geophys. Res.*, **72**, 1115—1117 (1967).
53. Zmuda A. J., Martin J. H., Heuring F. T., Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5033—5045 (1966).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

##### *Магнитное поле*

- Cummings W. D., Coleman P. J., Jr., Magnetic fields in the magnetopause and vicinity at synchronous altitude, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5699—5718 (1968).
- Fairfield D. H., Simultaneous measurements on three satellites and the observation of the geomagnetic tail at 1000  $R_e$ , *J. Geophys. Res.*, **73**, 6179—6187 (1968).
- Laird M. J., Structure of the neutral sheet in the geomagnetic tail, *J. Geophys. Res.*, **74**, 133—139 (1969).
- Russel C. T., Holjer R. E., AC magnetic fields, Summer Advanced Study Institute, *Earth's Particles and Fields*, Santa Barbara, Calif. Aug. 1969.

##### *Частицы*

- Arnoldy R. L., Chan K.-W., Particle substorms observed at the geostationary orbit, UNH-R69-8, Phys. Dept. Univ. Hampshire, May, 1969.
- Brewer H. R., Schulz M., Eviatar A., Origin of drift periodic echoes in outer-zone electron flux, *J. Geophys. Res.*, **74**, 159—167 (1969).
- Bryant D. A., Couptia G. M., Johnstone A. D., Modulation of auroral electrons at large distances from the earth, *J. Atmospheric Terrest. Phys.*, **31**, 579—592 (1969).
- Burch J. L., Low-energy electron fluxes at latitudes above the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **73**, 3585—3591 (1968).

- Chase L. M., Evidence that the plasma sheet is the source of auroral electrons  
*J. Geophys. Res.*, **74**, 348—350 (1969).
- Evans D. S., On auroral electrons, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 333—339.
- Frank L. A., Recent observations of low energy charged particles in the earth's magnetosphere, *Physics of the Magnetosphere*, eds. R. L. Carovillano, J. F. McClay, H. R. Radoski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland, 1968, p. 271—289.
- Frank L. A., Owens H. D., Low-energy proton ( $0.5 \leq E \leq 50$  kev) omnidirectional intensity contours in the earth's outer radiation zone at the magnetic equator, Univ. of Iowa 69—32, Dept. Physics and Astronomy, July 1969.
- Frank L. A., Further comments concerning low-energy charged particles distribution within the earth's magnetosphere and its environs, Univ. of Iowa 69—42, Dept. Physics and Astronomy, July 1969.
- Freeman J. W., Jr., Maguire J. J., On the variety of particle phenomena discernible at the geostationary orbit via the ATS-1 satellite, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 345—354.
- Freeman J. W., Jr., Warren C. S., Maguire J. J., Plasma flow directions at the magnetopause on January 13 and 14, 1967, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5719—5731 (1968).
- Haskell G. P., Anisotropic fluxes of energetic particles in the outer magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **74**, 1740—1748 (1969).
- Hoffman R. A., Low-energy electron precipitation at high latitudes, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2425—2432 (1969).
- Hoffman R. A., Evans D. S., Field-aligned electron bursts at high latitudes observed by OGO 4, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6201—6214 (1968).
- Hones E. W., Jr., Observations in the magnetotail and their interpretation, *Atmospheric Emissions*, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 351—363.
- Hones E. W., Jr., Bame S. J., Singer S., Brown R. R., Observed correlation between electron bursts in the magnetotail and electron precipitation in the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6189—6199 (1968).
- Hones E. W., Jr., Singer S., Rao C. S. R., Simultaneous observations of electrons ( $E > 45$  kev) at 2000 kilometer altitude and at 100,000 kilometers in the magnetotail, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7339—7359 (1968).
- Kavanagh L. D., Jr., Freeman J. W., Jr., Chen A. J., Plasma flow in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5511—5519 (1968).
- Konradi A., Rapid increases in the proton and electron fluxes in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **73**, 3449—3458 (1968).
- Lanzerotti L. J., Outer-zone electrons and the interplanetary magnetic fields during two geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4388—4392 (1968).
- Lanzerotti L. J., Brown W. L., Roberts C. S., Energetic electrons at  $6.6 R_E$  during the January 13—14, 1967, geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5751—5760.
- Lezniak T. W., Winkler J. R., Structure of the magnetopause at  $6.6 R_E$  in terms of 50- to 150-kev electrons, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5733—5742 (1968).
- Maehlum B. N., Satellite and rocket particle observations in the auroral zone, Birkeland Symposium on aurora and magnetic storms, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 303—312.
- Maehlum B. N., Universal-time control of the low-electron fluxes in the polar regions, *J. Geophys. Res.*, **73**, 3459—3468 (1968).
- McCoy J. E., High-latitude ionization spikes observed by the POGO ion chamber experiment, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2309—2318 (1969).
- McDiarmid I. B., Budzinski E. E., Search for low-altitude acceleration mechanisms during an auroral substorm, *Canadian J. Phys.*, **46**, 911—921 (1968).

- McDiarmid I. B., Burrows J. R., Wilson M. D., Morphology of outer radiation zone electron ( $E > 35$  kev) acceleration mechanisms, *J. Geophys. Res.*, **74**, 1749—1758 (1969).
- McDiarmid I. B., Burrows J. R., Wilson M. D., Dawn—dusk asymmetries in the outer radiation zone at magnetically quiet times, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3554—3560 (1969).
- Mihalov J. D., Colburn D. S., Currie R. G., Sonett C. P., Configuration and reconnection of the geomagnetic tail, *J. Geophys. Res.*, **73**, 943—959 (1968).
- Parks G. K., The acceleration and precipitation of Van Allen outer zone energetic electrons, Techn. Rep. CR-138, Univ. Minnesota, June 1969.
- Parks G. K., Winckler J. B., Simultaneous observations of 5—15 second period modulated energetic electron fluxes at the synchronous altitude and the auroral zone, Techn. Rep. CR-129, Univ. Minnesota, March 1969.
- Parks G. K., Winckler J. R., Simultaneous observations of 5- to 15-second period modulated energetic electron fluxes at the synchronous altitude and the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4003—4017 (1969).
- Paulikas G. A., Blake J. B., Freden S. C., Imamoto S. S., Observations of energetic electrons at synchronous altitude, 1. General features and diurnal variations, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4915—4925 (1968).
- Paulikas G. A., Blake J. B., Freden S. C., Imamoto S. S., Boundary of energetic electrons during the January 13—14, 1967, magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5743—5750 (1968).
- Pfitzer K. A., Winckler J. R., Intensity correlations and substorm electron drift effects in the outer-radiation belt measured with the OGO-III and ATS-I satellites, Tech. Rep. CR-136, Univ. Minnesota, April 1969.
- Rao C. S. R., Study of the temporal variations of 40 kev electrons in the magnetosphere during and after the magnetic storm on April 18, 1965, Univ. of Iowa 67—16, Dept. Physics and Astronomy, May 1967.
- Rao C. S. R., Local time asymmetries in the increase of electron fluxes in the outer Van Allen zone during substorms, Univ. of Iowa 69—8, Dept. Physics and Astronomy, February 1969.
- Rao C. S. R., Some observations of energetic electrons in the outer radiation zone during magnetic bays, *J. Geophys. Res.*, **74**, 794—801 (1969).
- Reasoner D. L., Relationship between the flux magnitude and pitch-angle distribution for post-substorm auroral electrons, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4018 — 4024 (1969).
- Rothwell P., Wallington V., The polar substorm and electron «islands» in the earth's magnetic tail, *Planet. Space Sci.*, **16**, 1441—1451 (1968).
- Schild M. A., Frank L. A., Electron observations between the inner edge of the plasma sheet and the plasmasphere, Univ. of Iowa 69—46, Dept. Physics and Astronomy, August 1969.
- Swisher R. L., Frank L. A., Lifetimes for low-energy protons in the outer radiation zone, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5665—5672 (1968).
- Van Allen J. A., Particle description of the magnetosphere, *Physics of the Magnetosphere*, eds. R. L. Carovillano, J. F. McClay, H. R. Radoski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland, 1968, p. 147—217.
- Vasyliunas V. M., Low-energy electrons on the day side of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7519—7523 (1968).
- Vasyliunas V. M., Low-energy electrons in the magnetosphere as observed by OGO-1 and OGO-3, *Physics of the Magnetosphere*, eds. R. L. Carovillano, J. F. McClay, H. R. Radoski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht-Holland, 1968, p. 622—640.
- Вернов С. Н., Горчаков Е. В., Кузнецов С. Н., Логачев Ю. Л., Сосновец Е. Н., Столповский В. Г., Particle fluxes in the outer geomagnetic field, *Rev. Geophys.*, **7**, 257—280 (1969).

- Westerland L. H., The auroral electron energy spectrum extended to 45 ev, *J. Geophys. Res.*, **74**, 351—354 (1969).
- Whalen B. A., McDiarmid I. B., Summary of rocket measurements of auroral particle precipitation, *Atmospheric Emissions*, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 93—106.
- Williams D. J., Arens J. F., Lanzerotti L. J., Observations of trapped electrons at low and high altitudes, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5673—5696 (1968).

#### *Электрическое поле*

- Aggson T. L., Probe measurements of electric fields in space, *Atmospheric Emissions*, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 305—316.
- Föppel H., Haerendel G., Haser L., Lüst R., Melzner F., Meyer B., Neuss H., Rabben H.-H., Rieger E., Stöcker J., Stoffergen W., Preliminary results of electric field measurements in the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, **73**, 21—26 (1968).
- Mozer F. S., Serlin R., Magnetospheric electric field measurements with balloons, *J. Geophys. Res.*, **74**, 4739—4754 (1969).
- Van Allen J. A., On the electric field in the earth's distant magnetotail, Univ. of Iowa 69—29, Dept. Physics and Astronomy, June 1969.
- Wescott E. M., Stolarik J. D., Heppner J. P., Electric fields in the vicinity of auroral forms from motions of barium vapor releases, *J. Geophys. Res.*, **74**, 3469—3487 (1969).

#### *Наблюдения в межпланетной среде*

- Bame S. J., Asbridge J. R., Hundhausen A. J., Strong I. B., Solar wind and magnetosheath observations during the January 13—14, 1967, geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5761—5767 (1968).
- Hirshberg J., Colburn D. S., Interplanetary field and geomagnetic variations — a unified view, *Planet. Space Sci.*, **17**, 1183—1206 (1969).
- Hundhausen A. J., Gentry R. A., Numerical simulations of flare-generated disturbances in the solar wind, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2908—2918 (1969).
- Ogilvie K. W., Burlaga L. F., Wilkenson J. D., Plasma observations on Explorer 34, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6809—6824 (1968).
- Scarf F. L., Crook G. M., Green I. M., Virobik P. F., Initial results of the Pioneer 8 VLF electric field experiment, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6665—6686 (1968).
- Wilcox J. M., Asymmetry in geomagnetic response to the polarity of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, **73**, 6835—6836 (1968).

# Магнитосферная суббурия

## 10. 1. Введение

В предыдущих главах были рассмотрены различные проявления магнитосферных суббурь в верхней атмосфере полярных областей и магнитосфере. В качестве первого шага к пониманию основных процессов, определяющих развитие магнитосферной суббурии, можно попытаться представить эти проявления как результат изменений распределения и напряженности электрических полей и потоков частиц в магнитосфере.

Распределение потоков частиц в полярной верхней атмосфере и в магнитосфере рассмотрено в разд. 10.2 на основе изложенного в предыдущих главах. В разд. 10.3 рассмотрена возможная модель трехмерной токовой системы и соответствующих электрических полей. Основные требования к теории магнитосферных суббурь перечислены в первой части разд. 10.4, после чего дан обзор различных существующих теорий.

## 10. 2. Полярная суббурия и распределение потоков частиц в верхней атмосфере полярных областей и в магнитосфере

### 10. 2. 1. Потоки электронов над полярными областями

В своем обзоре явлений в верхней атмосфере полярных областей Хартц и Брайс [47] предложили модель средней ежедневной картины высыпания электронов в атмосферу полярных областей. Они предложили классификацию высыпаний электронов на два типа. Для первого типа (splash) характерны *дискретные* явления, преобладающие ночью, для второго (drizzle) — *диффузные*, имеющие максимум в поздние утренние часы.

Дискретные явления включают:

- 1) дискретные локализованные яркие и быстро флукутирующие формы полярных сияний, характерные высоты которых более 100 км;
- 2) внезапные увеличения аврорального поглощения регистрируемые риометрами;

3) быстро затухающие очень высокочастотные (VHF) сигналы импульсного типа, рассеиваемые уплотнениями ионизации вдоль силовых линий, лежащими на высотах около 105 км;

4) интенсивные спорадические отражения от области  $E$  (явление, часто называемое авроральным спорадическим слоем  $E$ ) на высотах 100 км и более (по ионограммам);

5) рассеянные отражения от области  $F$  (по ионограммам);

6) всплески ОНЧ-излучений и авроральных шипений на частотах более 4 кгц;

7) импульсные микропульсации ( $P_1$ ) магнитного поля Земли;

8) всплески мягкого тормозного рентгеновского излучения (аэроостатные наблюдения);

9) отрицательные магнитные бухты с быстрым или внезапным началом и довольно медленным возвратом к спокойному состоянию поля;

10) относительно кратковременные, но интенсивные всплески потоков мягких электронов (энергии порядка нескольких килоэлектронвольт).

Диффузные явления, по крайней мере статистически, включают;

1) устойчивые диффузные и слабые полярные сияния типа мантии, вплоть до почти необнаружимых визуально;

2) сильное медленно меняющееся поглощение (по риоетрам);

3) постоянный или медленно меняющийся средний уровень сигналов на очень высоких частотах, обусловленных рассеянными отражениями вперед от изотропных нерегулярностей ионизации на высотах порядка 85 км;

4) спорадические отражения от области  $E$  на высотах 80—90 км;

5) приблизительно постоянное ОНЧ-излучение (полярные хоры) на частотах ниже 2 кгц;

6) устойчивые геомагнитные микропульсации  $P_c$ ;

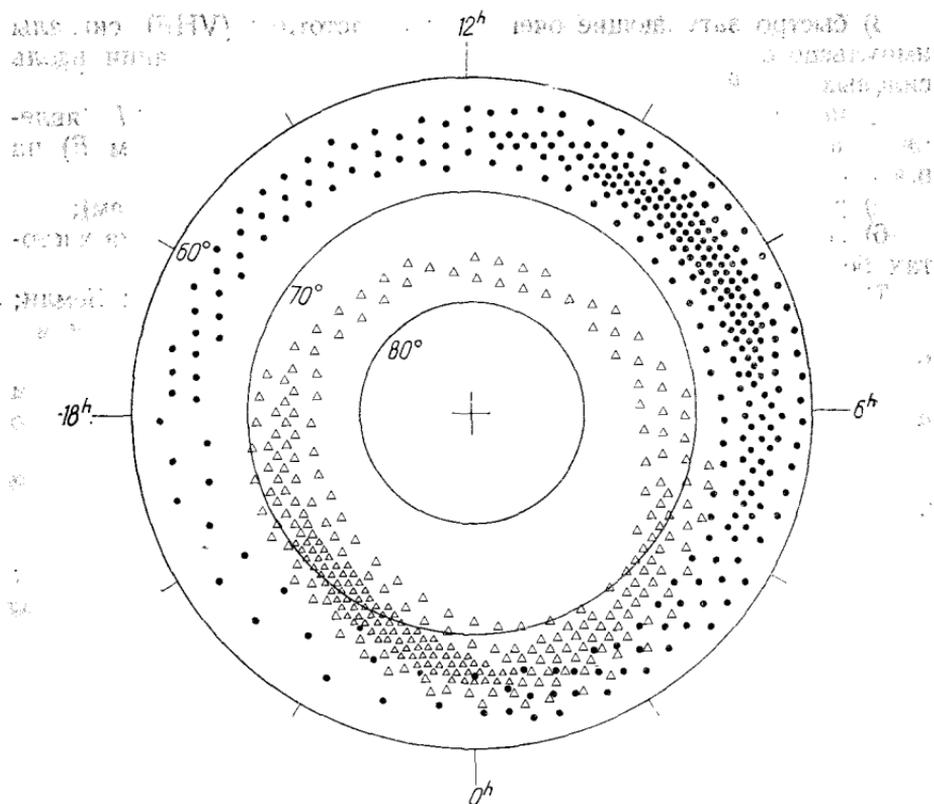
7) длительные, медленно меняющиеся всплески жесткого рентгеновского излучения;

8) постоянно существующие умеренно интенсивные потоки электронов с энергиями по меньшей мере 40 кэв.

На основе перечисленных выше данных Хартц и Брайс [47] предложили среднюю картину высыпания электронов в течение суток для всей полярной области (рис. 156).

В предыдущих главах были детально рассмотрены суточные вариации каждого из проявлений суббури. Мы выяснили, что суточные вариации описывают изменение характеристик каждого явления с течением местного времени, но это не означает, что такая картина в целом сохраняется в течение всего дня (суток). Для описания полярных явлений более правильно использовать представление о чередующихся появлениях такой картины несколько раз в сутки.

На основе изложенного в предыдущих главах нетрудно заключить, что такие же аргументы можно использовать и при рассмот-

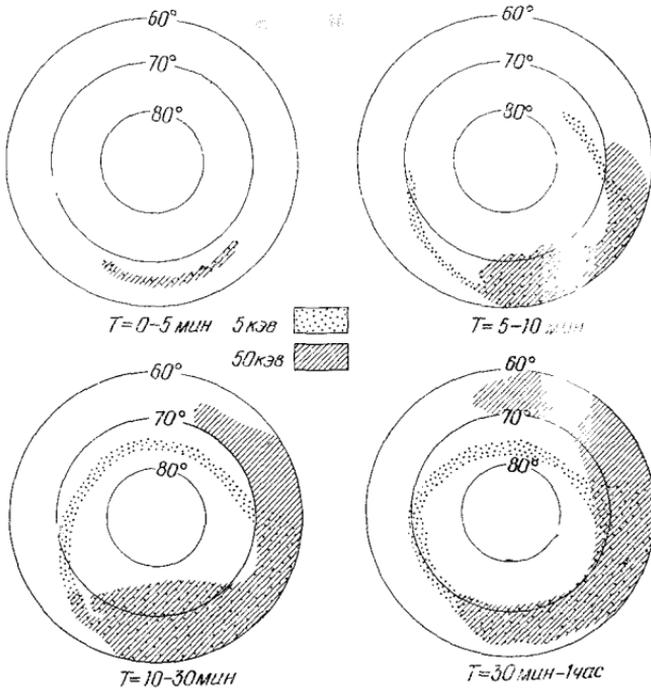


Р и с. 156. Средняя ежедневная картина высыпания электронов для полярной шапки; дискретные явления обозначены треугольниками, диффузные — точками.

рении средней картины высыпания (иначе говоря, представленная на рис. 156 картина высыпания может иметь место несколько раз в сутки с временем жизни порядка 1—3 час). Высыпания двух описанных типов не являются независимыми, а представляют собой просто различные проявления одного и того же события — высыпания во время магнитосферной суббури.

В предыдущих главах довольно детально было рассмотрено развитие различных типов суббурь во всей полярной шапке, что дало важные сведения об изменениях характеристик высыпания электронов и протонов в функции времени от начала суббури и местного времени. На рис. 157 схематически представлено высыпание электронов для четырех моментов в развитии суббури на основе изложенного в разд. 2.1, 4.8, 5.9, 7.7.

Чтобы четко обрисовать высыпание во время суббури, в схематической картине развития не учтено высыпание, имеющее место в



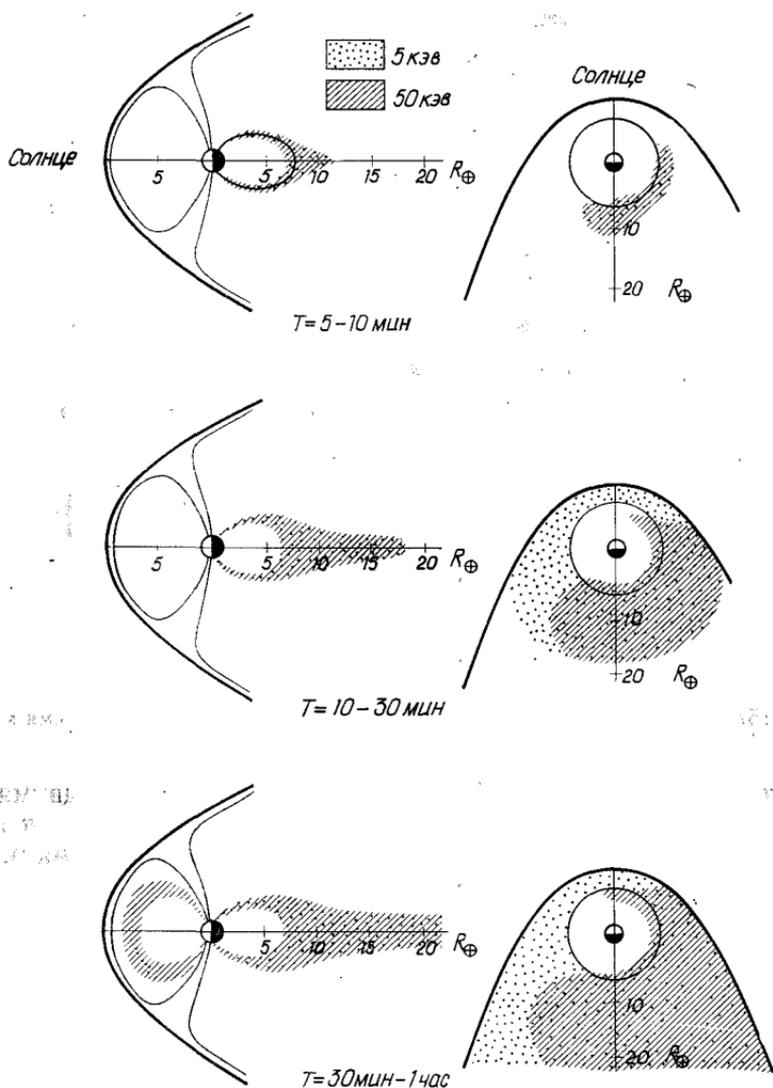
Р и с . 157 Развитие высыпания электронов в полярной области во время магнитной суббури.

момент  $T=0$ , т. е. в спокойный период. В период между двумя суббурями электроны с энергиями порядка 10 кэВ высыпаются вдоль овала полярных сияний. Высыпание электронов с энергиями порядка 50 кэВ имеет место вдоль узкой полосы, примыкающей к овалу со стороны экватора в полуночном и предполуденном секторах (разд. 9.5). Для построения рис. 157 были выбраны два характерных энергетических интервала: 5 и 50 кэВ. Электроны с энергиями порядка 5 кэВ ответственны в первую очередь за возбуждение видимых полярных сияний, а электроны с энергиями около 50 кэВ — за поглощение космического радиоизлучения и всплески рентгеновского излучения.

### 10. 2. 2. Потоки электронов в магнитосфере

Попытаемся составить представление о распределении электронов в три момента развития магнитосферной суббури (рис. 158). При этом по-прежнему не учитывается распределение в спокойный период.

В разд. 9.4 отмечалось, что вне области захвата область, занимаемая электронами, расширяется с увеличением расстояния от Земли. При этом было указано, что расширение вне области зах-



Р и с . 158. Распределение электронов в магнитосфере во время магнитосферной суббури. Слева — сечение в плоскости полуденно-полуночного меридиана, справа — экваториальное сечение. Окружность в экваториальном сечении соответствует приближительной границе между областью захвата и внешней магнитосферой (см. разд. 1. 1).

вата, по-видимому, тесно связано с приближением высыпания к полюсу во время взрывной фазы суббури. К сожалению, в настоящее время неясно, представляет ли это расширение поток электронов от Земли или локальное их ускорение каким-либо механизмом,

например распространением ударной волны, после прохождения которой остаются термализованные электроны, или распространением процесса пересоединения силовых линий, при котором магнитная энергия преобразуется в тепловую энергию плазмы. Эти вопросы будут рассмотрены в следующем разделе. Различие между этими двумя возможностями должно сказаться на конфигурации магнитного поля после магнитной суббури. Ударная волна не приведет к сильным изменениям конфигурации магнитного поля, хотя изменения в каждом случае будут зависеть от природы волны (бесстолкновительная ударная волна). Однако при этом следует ожидать значительного диамагнитного эффекта нагретой плазмы, если она останется после прохождения ударной волны. Пересоединение силовых линий должно привести к существенным изменениям конфигурации поля после суббури (см. п. 9 разд. 10.4.2). Известно, что во время суббури многие силовые линии, относящиеся до начала суббури к хвосту магнитосферы, сжимаются, перемещаясь к Земле. Поскольку данных о конфигурации магнитного поля недостаточно, на рис. 158 силовые линии не показаны.

Расширение границ области, занимаемой электронами с энергиями  $10 \text{ кэВ}$ , внутрь области захвата связано, вероятно, с распространением явлений полярной суббури к экватору. Если такое увеличение вызывается направленным к Земле потоком электронов, то сам поток является, вероятно, результатом дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях, поскольку конфигурация поля внутри области захвата близка к дипольной, и поэтому электроны должны двигаться поперек магнитного поля. Электрическое поле, которое может привести к требуемому движению, должно быть направлено на запад. Разность потенциалов поперек магнитосферы оценивается в  $48 \text{ кВ}$  [92].

Если такое электрическое поле переносится в ионосферу, то следует ожидать там полей порядка  $10 \text{ в/км}$ . Существование такого поля нетрудно обнаружить при ракетных экспериментах с выпуском облаков химических элементов. Наличие электрического поля указанной напряженности должно вызвать дрейф ионизованной составляющей к экватору со скоростями порядка  $E/B \approx 200 \text{ м/сек}$ . Сообщалось [44], что в Кируне наблюдалось дрейфовое движение ионизованного облака бария, причем направленная к экватору составляющая скорости была именно такого порядка.

Область, заселенная электронами с энергиями  $50 \text{ кэВ}$ , увеличивается в утреннем секторе области захвата (см. разд. 4.8, 5.9 и 9.2.2), а также в области хвоста (см. разд. 4.8, 5.9, 9.3.2 и 9.4.1). Расширение в утреннем секторе может быть либо результатом действительного дрейфа электронов из полуночного сектора, либо следствием распространения (перемещения) механизма ускорения электронов. Ключом к решению этого вопроса было бы точное измерение разницы моментов начала усиления поглощения космического

радионизлучения в полуденном и утреннем секторах. В любом случае ясно, что магнитосферная суббура поставляет в область захвата значительную часть электронов с энергиями 50 кэВ.

### 10. 2. 3. Поток протонов в области захвата

Поскольку пока нет прямых измерений потоков протонов с энергиями 1—50 кэВ в период магнитосферной суббуры \*, попытаемся построить картину соответствующих изменений потока протонов на основе наземных измерений магнитного поля в низких широтах (см. разд. 3.4) и измерений поля на синхронном спутнике (см. разд. 9.2.1). Схематическая картина изменений населенности магнитосферы протонами во время магнитной суббуры представлена на рис. 159.

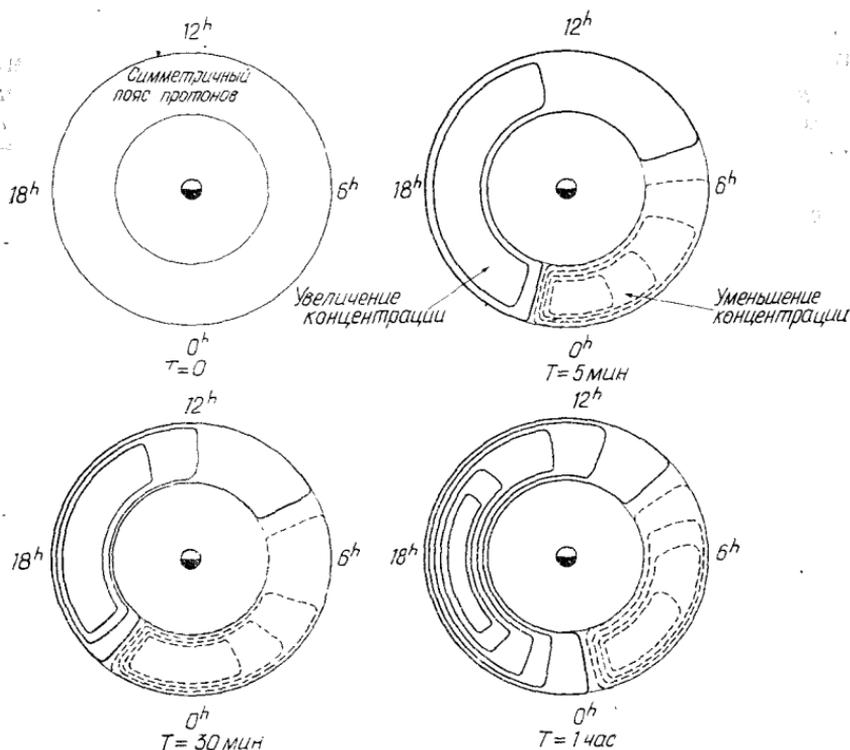


Рис. 159. Изменения распределения протонов кольцевого тока с энергиями 1—50 кэВ в области захвата во время магнитосферной суббуры. Сплошными линиями показаны области увеличения заселенности протонами, пунктиром — области уменьшения заселенности протонами.

Предположим, что в момент  $T=0$  имеется симметричный (по отношению к оси диполя) кольцевой ток. Во время ранней фазы суббури в полуночном и раннем утреннем секторах происходят сильные изменения заселенности протонами. Область уменьшения заселенности расширяется, по-видимому, наружу (от Земли), как отмечалось в разд. 9.3.1, хотя это и не показано на рис. 159.

В секторе  $10^h-21^h$  LT заселенность протонами постепенно и неуклонно возрастает (см. гл. 3 и разд. 9.2.1). В секторе, соответствующем середине вечера (например,  $22^h$  LT), населенность сначала увеличивается, а затем уменьшается (см. разд. 9.1 и 9.2.1). Это уменьшение может быть следствием расширения области пониженной населенности к западу от полуночи. За уменьшением следует увеличение населенности протонами, что можно считать результатом расширения из дневного сектора области увеличения. После момента максимума суббури населенность протонами области, где имело место возрастание, уменьшается. Населенность протонами раннего утреннего сектора меняется мало, поэтому при частом повторении суббурь в утреннем секторе будет мало протонов. Отметим, что указанные вариации могут быть следствием радиальных движений протонов.

Необходимо заметить, что приведенное описание относится к суббурям средней интенсивности. Если же суббуря очень сильная, то во время ранней фазы суббури уменьшение населенности протонами неосвещенной области ( $20^h-6^h$  LT) значительно меньше.

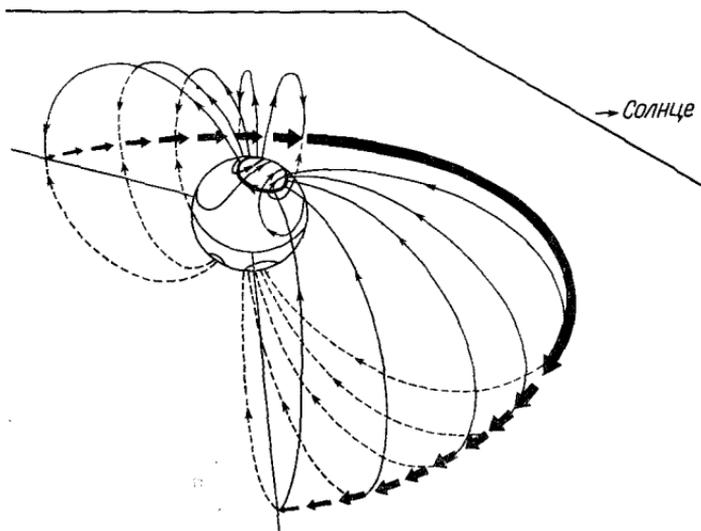
### 10. 3. Полярная суббуря и распределение электрических полей в полярной верхней атмосфере и в магнитосфере. Трехмерная токовая система

В разд. 3.4 было показано, что пересмотренная модель Киркпатрика может достаточно хорошо объяснить распределение возмущений магнитного поля в средних и низких широтах на поверхности Земли. В этой модели подразумевается, что в освещенном Солнцем и вечернем секторах появляются частицы нового кольцевого тока (протоны с энергиями  $1-50$  кэв); см. разд. 10.2.3. С утренней стороны такого асимметричного относительно оси диполя кольцевого тока ток втекает в авроральную ионосферу, течет вдоль овала полярных сияний и выходит обратно к кольцевому току в вечернем секторе.

Как было показано в разд. 9.2 и 10.2.3, записи магнитного поля на синхронном спутнике свидетельствуют об уменьшении числа частиц — носителей кольцевого тока в полуночном и раннем утреннем секторах. Поэтому направленный к востоку экваториальный ток в темной полусфере в модельных расчетах разд. 3.4 должен соответствовать этому уменьшению. На рис. 160 приведена схема возможной трехмерной токовой системы. Предлагаемая модель под-

разумеает, что асимметричное усиление пояса протонов (пояса кольцевого тока) имеет фундаментальное значение среди различных процессов, входящих в магнитосферную бурю.

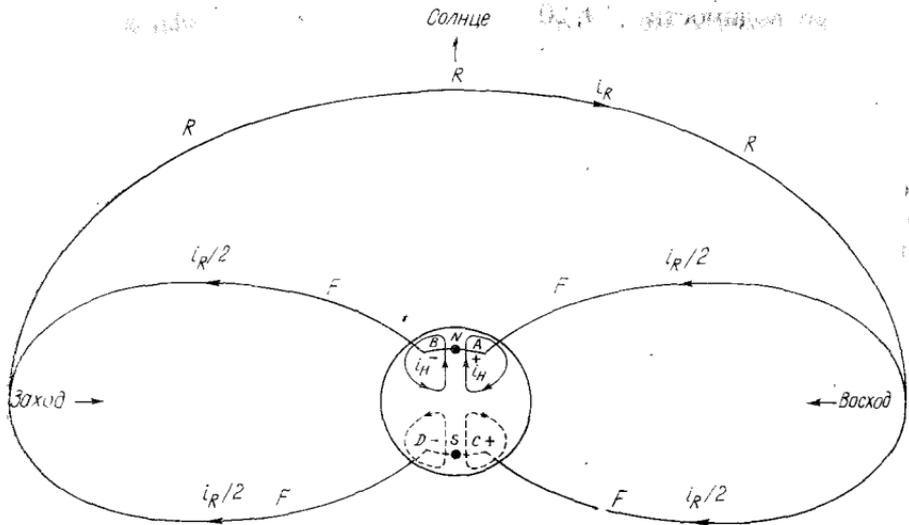
Феджер [36] высказал предположение, что частицы кольцевого тока инжектируются в область захвата в секторе, освещенном Солнцем, и образуемый ими асимметричный кольцевой ток замыкается



Р и с. 160. Модель трехмерной токовой системы, формирующейся во время магнитосферной суббури [3].

за счет генерации токов Холла и Педерсена в ионосфере. Поскольку теперь известно, что частицы — носители кольцевого тока — это протоны с энергиями в несколько килоэлектронвольт и что пояс таких протонов образуется достаточно глубоко внутри области захвата [22, 39; разд. 10.2.3], то ясно, что эти протоны не могут инжектироваться непосредственно извне. Тем не менее имеющиеся данные подсказывают, что частицы нового кольцевого тока появляются в широком секторе, освещенном Солнцем.

На рис. 161 представлена модель токовой системы по Феджеру. Если в дневном секторе развивается асимметричный кольцевой ток, то от меридиана, соответствующего заходу Солнца, к меридиану, соответствующему восходу, течет ток  $i_R$ . Такой незамкнутый контур тока приводит к появлению пространственных зарядов на обоих концах кольцевого тока и, следовательно, к возникновению разности потенциалов поперек магнитосферы. Соответствующее электрическое поле направлено от утреннего сектора к вечернему. При наличии такой системы контур тока может замкнуться посредством тока, текущего вдоль силовых линий и в ионосфере. Таким образом,



Р и с. 161. Модель токовой системы, предложенная Феджером [36].

в ионосфере генерируются токи, текущие от *A* к *B* в северном полушарии и от *C* к *D* в южном.

Картина токов в ионосфере сильно зависит от распределения проводимости. Между точками *A* и *B* (см. рис. 161) ток течет вдоль электрического поля; это ток Педерсена  $\mathbf{J}_P = \sigma_1 \mathbf{E}$ , где  $\sigma_1$  — проводимость Педерсена. Следует иметь в виду, что на рис. 161 показано только прямое протекание тока от *A* к *B* и от *C* к *D*. Поскольку для ионосферы характерна высокая холловская проводимость  $\sigma_2$ , возникает еще одна система токов, перпендикулярных к электрическому полю *E*. Это ток Холла  $\mathbf{J}_H = -\sigma_2 [\mathbf{E} \times \mathbf{B}] / B^2$ , образующий петли вокруг точек *A*, *B*, *C*, *D*; для простоты на рис. 161 показано только по одной такой петле тока.

Картина токовой системы будет сильно отличаться от представленной на рис. 161, если распределение проводимости неоднородно. Так, если в плоскостях меридианов, соответствующих  $6^h$  и  $18^h$  LT, точки *A* и *B* располагаются на овале полярных сияний, то в темной полусфере ток Педерсена будет течь вдоль овала, поскольку овалу соответствует узкая полоса высокой проводимости. Ток Холла, который течет поперек полосы высокой проводимости, приведет к возникновению пространственных зарядов вблизи границ овала по лярных сияний. При этом в северном полушарии на северной границе овала возникает положительный пространственный заряд, а на южной — отрицательный. Электрическое поле, связанное с пространственными зарядами, направлено к экватору и приводит к возникновению в темном секторе дополнительного тока Холла, направленного на запад. Аналитически это явление часто выражается как увели-

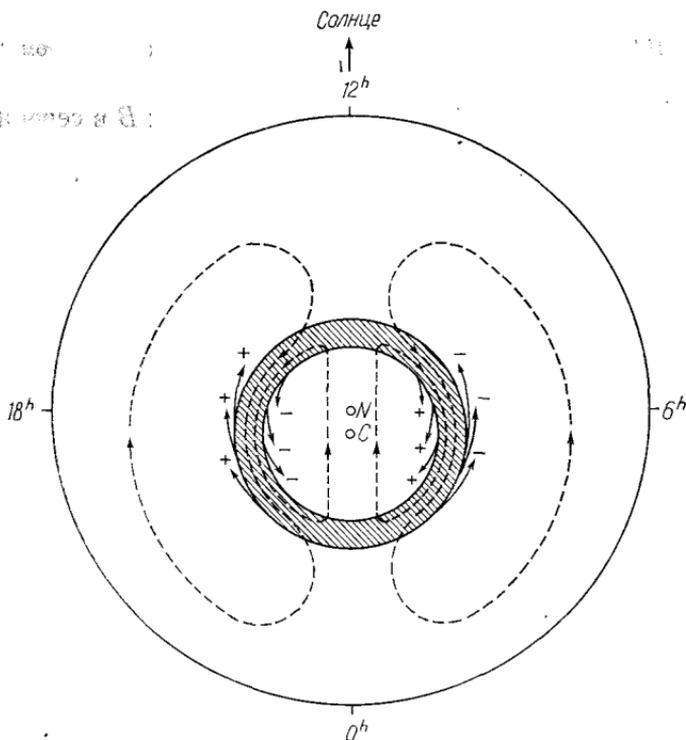
чение проводимости [19, 20]

$$\mathbf{J} = \text{Ток Педерсена} + \text{Ток Холла} = \sigma_3 \mathbf{E},$$

где  $\sigma_3 = \sigma_1 + \sigma_2^2/\sigma_1$  (проводимость Каулинга).

Как отмечалось ранее, асимметричный кольцевой ток приводит к возникновению потенциалов поперек магнитосферы: соответствующее электрическое поле оказывается направленным от утреннего сектора к вечернему. Такое электрическое поле может вызвать крупномасштабный дрейф магнитосферной плазмы и самого пояса тока. В экваториальной плоскости пояс сместится по направлению к Солнцу. Рассмотрим, например, первоначально симметричный пояс энергичных частиц. Линия пересечения границы этого смещенного пояса с ионосферой будет представлять собой окружность, центр которой несколько сдвинут от полюса диполя в сторону темной полусферы (рис. 162).

Рассмотрим движения частиц в смещенном поясе. Предположим при этом, что пояс кольцевого тока не приводит к серьезным изме-



Р и с. 162. Вторичные пространственные заряды, возникающие в представленной на рис. 161 модели токовой системы Феджера, и результирующие токи Холла в ионосфере [36]. ( $N$  — полюс диполя,  $C$  — центр линии пересечения границы смещенного пояса с магнитосферой.)

нениям конфигурации магнитного поля. В этом случае частицы в любой точке смещенного пояса стремятся дрейфовать вдоль окружностей, центры которых совпадают с осью диполя (или вдоль кривых, где  $|B| = \text{const}$ ). (Предполагается, что энергия частиц настолько велика, что они практически не подвержены влиянию электрического поля.) Нас будут интересовать движения частиц, начальные траектории которых находятся на внутренней и внешней поверхностях смещенного пояса. В утреннем секторе положительно заряженные частицы на внешней границе пояса дрейфуют вдоль кривых, где  $|B| = \text{const}$ , к полуночному меридиану. Электроны на внутренней границе дрейфуют к полуденному меридиану. В послеполуденном секторе электроны на внешней границе дрейфуют к полуночному меридиану, а положительные частицы на внешней границе — к полуденному. Проекция всей системы этих движений на верхнюю полярную атмосферу показана на рис. 162. Было высказано предположение [36], что результирующая система токов Холла имеет сходство с  $SD$ -токовой системой (см. разд. 2.1).

В данном разделе рассмотрены электрические поля, обусловленные асимметрией кольцевого тока. Эти поля могут объяснить некоторые важные особенности магнитосферных суббурь; мы вернемся к ним в разд. 10.5. Другие представления о происхождении электрических полей приведены в следующем разделе.

## 10. 4. Обзор теорий магнитосферных суббурь

Большинство предлагавшихся теорий магнитосферных суббурь далеко не полны, так как в них делаются попытки объяснить лишь одно (или самое большее два) из проявлений магнитосферной суббури в полярной верхней атмосфере. Тем не менее обзор этих теорий представляет интерес, поскольку в них содержатся элементы истины, к которым надо отнестись серьезно.

### 10. 4. 1. Основные требования к теориям

*1. Полная энергия, диссипируемая во время отдельной суббури.* Окончательных оценок полной энергии отдельной магнитосферной суббури пока нет. Несомненно, значительная часть энергии, генерируемой в магнитосфере, диссипирует в полярной верхней атмосфере и переносится в основном авроральными электронами с энергиями порядка 5 кэВ. Считают, что при выпадении электронов один из каждых 50 актов ионизации приводит к испусканию фотона на  $\lambda 3914\text{\AA}$ . Предположим, что средняя интенсивность излучения  $\lambda 3914\text{\AA}$  в выпуклости в полярном сиянии составляет 1 килорэлей.

Такая интенсивность требует плотности потока фотонов  $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Соответствующая скорость ионообразования должна тогда составить примерно  $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Энергия, теряемая электронами на ионизацию при ударах, составит

$$35 \text{ эв} \times 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1} = 1,75 \cdot 10^{12} \text{ эв/см}^2 \cdot \text{сек} = 2,8 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}.$$

Если эта энергия переносится электронами с энергиями 5 кэВ, то необходимый поток электронов будет равен  $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ .

Предполагая, что площадь выпуклости в полярном сиянии  $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$  (протяженность в направлении север — юг принимается равной  $15^\circ$ , в направлении восток — запад — примерно  $90^\circ$ ), получаем скорость притока энергии порядка  $2 \cdot 10^{17} \text{ эрг/сек}$ . Если принять время жизни суббури равным 2 час (7200 сек), то энергия, поставляемая в полярную ионосферу двух полушарий высыпавшимися электронами, составит  $2 \cdot 1,4 \cdot 10^{21} \text{ эрг} = 2,8 \cdot 10^{21} \text{ эрг}$ . По наблюдениям поглощения поток электронов в ионосфере существенно больше, чем по одновременным измерениям на спутнике «Вела»; однако возможно, что это различие является следствием различия в конфигурации магнитного поля (сходимость силовых линий по направлению к Земле) [45]. Поэтому не будет слишком безрассудно предположить, что одна половина потока электронов появляется в полярной верхней атмосфере, а другая — в хвосте магнитосферы, так что общая энергия, переносимая авроральными электронами, составляет  $2 \cdot 2,8 \cdot 10^{21} \text{ эрг} = 5,6 \cdot 10^{21} \text{ эрг}$ .

Грубую оценку энергии, переносимой протонами кольцевого тока, можно получить по формуле, выведенной Десслером и Паркером [30]. Принимая величину низкоширотной отрицательной бухты 50γ (см. гл. 3, разд. 9.2), получим  $2 \cdot 10^{22} \text{ эрг}$ . Формула была бы справедлива для симметричного кольцевого тока, так что полученную оценку следует уменьшить вдвое. Конечно, новая оценка несколько занижена, поскольку не учитываются потери протонов во время формирования кольцевого тока. Тогда суммарная энергия, переносимая авроральными электронами и протонами кольцевого тока, равна  $2 \cdot 10^{22} \text{ эрг}$ . Учет энергии, переносимой более энергичными частицами, существенно не изменит эту оценку.

Аксфорд [12] предположил, что в магнитосфере во время магнитных бурь происходит диссипация энергии трех видов:

- 1) образование полярных сияний ( $\sim 10^{18} \text{ эрг/сек}$ );
- 2) нагрев ионосферы электрическими токами, приводящими к магнитным суббурям ( $\sim 10^{18} \text{ эрг/сек}$ );
- 3) разбухание магнитосферы, или появление кольцевого тока ( $\sim 10^{18} - 10^{19} \text{ эрг/сек}$ ).

2. *Начало суббури.* О начале магнитосферной суббури легче всего судить по началу суббури в полярных сияниях, которая дает сведения о высыпании электронов с энергиями в несколько килоэлектронвольт. Высыпание таких электронов вблизи обращенной к

экватору границы овала полярных сияний в полуночном секторе внезапно возрастает на один или даже два порядка за несколько минут. Увеличение высыпания наблюдается либо как внезапное уярчение ближайшей к экватору дуги полярного сияния, либо как внезапное формирование дуги вблизи обращенной к полюсу границы протонного сияния [88].

Таким образом, первым указанием на начало магнитосферной суббури должна быть внезапная активизация процесса, ответственного за генерацию авроральных частиц вблизи границы области захвата в полуночном секторе.

*3. Накопление энергии суббури.* Данные наблюдений говорят о том, что суббуре в полярном сиянии не предшествуют какие-либо движения полярных сияний. Если бы магнитосферная суббуря была следствием прямой инжекции плазмы солнечного ветра через границу магнитосферы, то до начала суббури в полярном сиянии наблюдалось бы свечение в полярной верхней атмосфере. В разд. 9.7.1 отмечалось, что индекс  $K_p$ , являющийся грубой мерой интенсивности полярных суббурь, не связан с потоком энергии или импульса частиц солнечного ветра.

Первое указание на магнитосферную суббурю является следствием процесса вблизи границы области захвата частиц. Увеличение потоков электронов на расстоянии  $17R_{\oplus}$  происходит позднее, в момент максимума магнитосферной суббури ( $T=15-30$  мин; см. разд. 9.4.1). Учитывая эти два обстоятельства, можно сделать вывод, что магнитосферная суббуря является по существу процессом внутри магнитосферы и что энергия суббури ( $2 \cdot 10^{22}$  эрг) сначала должна накопиться довольно глубоко в магнитосфере (возможно, вблизи границы области захвата).

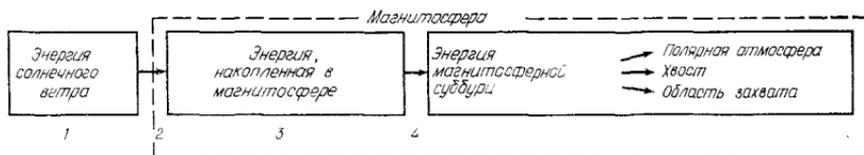
*4. Взрывная фаза и фаза восстановления.* Полярная суббуря имеет две характерные фазы развития: взрывную фазу и фазу восстановления. Лучше всего это проявляется в суббуре в полярных сияниях в полуночном секторе, но и суббури в других явлениях в этом секторе имеют подобные характеристики. Поэтому мы можем заключить, что и магнитосферная суббуря имеет взрывную фазу.

Наличие такой фазы говорит о том, что энергия, накопленная вблизи границы области захвата, должна высвобождаться взрывным путем. Во время взрывной фазы область, занимаемая авроральными электронами, быстро расширяется во всех направлениях.

*5. Асимметричный пояс протонов.* Выше указывалось, что формирование пояса протонов требует столько же или даже больше энергии, чем суммарная энергия авроральных электронов. С учетом этого формирование пояса протонов является одним из основных аспектов магнитосферной суббури. Пояс протонов формируется глубоко внутри области захвата в освещенном Солнцем секторе.

## 10. 4. 2. Обзор теорий магнитосферных суббурь

Теперь можно построить следующую схему потока энергии.



Таким образом, любая теория магнитосферных суббурь должна ответить по крайней мере на следующие вопросы:

- 1) Какова начальная форма энергии солнечного ветра, вызывающей магнитосферную суббурю?
- 2) Как эта начальная форма энергии преобразуется в энергию, которая может накапливаться в магнитосфере?
- 3) Какова форма накапливаемой энергии?
- 4) Как накапливаемая энергия преобразуется в энергию магнитосферной суббури?

Предлагавшиеся до сих пор различные теории суббурь можно разделить на десять групп:

- 1) разряд от внеземного источника [4, 5, 16, 17, 52, 53];
- 2) диамагнетизм [49, 60];
- 3) поляризация радиационных поясов [24, 37, 38, 55, 56, 61, 77];
- 4) динамо-эффект [28, 40, 66, 86];
- 5) конвекция [10, 11, 14, 21, 48, 65, 71—73];
- 6) разряд из нейтральной точки [32—34];
- 7) разряд с нейтральной линии [2];
- 8) ускорение электрическим полем [91];
- 9) неустойчивость хвоста магнитосферы [8, 9, 12, 13, 34, 69, 74, 75, 79—81];
- 10) неустойчивость границы области захвата [86—90].

1. *Разряд от внеземного источника.* Впервые эта идея была выдвинута Биркеландом [16] на основе обширного анализа магнитограмм, полученных во время Первого международного полярного года. Биркеланд правильно выявил одну из основных особенностей полярных геомагнитных возмущений, установив, что они состоят из последовательно появляющихся импульсных возмущений, названных им полярными элементарными бурями. В настоящей книге эти возмущения называются полярными магнитными суббурями.

Биркеланд выдвинул гипотезу, что полярные магнитные суббури вызываются пучками электронов от Солнца, которые инжектируются в верхнюю атмосферу полярных областей Земли, проходят вдоль зоны полярных сияний и уходят затем в межпланетное пространство. Он считал взаимодействие между электронами и верхней атмосферой причиной полярных сияний. Свои идеи Биркеланд

продемонстрировал на первом модельном эксперименте, используя намагниченный железный шар (тереллу) и электронную пушку в вакуумной трубке.

Альвен предположил, что любой пространственный заряд, возникающий на границе так называемой запрещенной области, будет сразу же приводить к разряду вдоль силовых линий поля в зоне полярных сияний. Этот разряд обуславливает ток от дневной границы запрещенной области к ночной границе вдоль магнитных силовых линий, затем вдоль утреннего и вечернего секторов зоны полярных сияний и опять вдоль силовых линий. Альвен выдвинул гипотезу, что эти токи и являются авроральными электроструями. Маловероятно, что электроструя является результатом прямой инжекции частиц солнечного ветра. Тем не менее существование сходства альвеновской токовой системы с моделью, рассмотренной в разд. 10.3, подсказывает, что плазма в н у т р и магнитосферы может участвовать в крупномасштабном дрейфовом движении в скрещенных электрическом и магнитном полях (в предположении, что во время магнитосферных суббурь соответствующее электрическое поле существует). Эта проблема рассмотрена в работе [54]. О движении плазмы к Земле на неосвещенной стороне говорилось в разд. 9.3.2 и 10.2.

2. *Диамагнетизм.* Марис и Халберт [60] выдвинули предположение, что в авроральной ионосфере может появляться плазменный слой высокой концентрации, приводящий к диамагнитному искажению поля Земли. Такое искажение имело бы такие же характеристики, как и полярная магнитная суббуря. Поскольку каждая частица плазмы обладает магнитным моментом  $\mu = W_{\perp} / B$ , то магнитный момент всего слоя плазмы будет  $An\mu = AnkT/B$  [4], и таким образом напряженность поля на полюсе  $AnkT/4\pi B$ , где  $A$  — нижнее поперечное сечение слоя.

По этой теории горизонтальная компонента поля возмущения  $H$  должна менять знак как раз под проходящей в направлении восток — запад центральной линией нижней части слоя плазмы, причем она отрицательна к полюсу от этой линии и положительна к экватору. Однако наблюдения показывают, что во всей области, соответствующей выпуклости в полярном сиянии, имеет место отрицательная бухта.

3. *Поляризация радиационных поясов.* Возможная поляризация радиационных поясов и ее последствия изучались рядом исследователей. Мартин [61] предположил, что радиальное поле электрической поляризации, связанное с кольцевым током, предложенным Чепменом и Ферраро [26], должно направлять некоторую часть заряженных частиц в зону полярных сияний. Эти частицы переносили бы с собой поле поляризации в авроральную ионосферу, что и обуславливало бы появление авроральной электроструи. Мартин предположил, что разность потенциалов между внутренним и внеш-

ним; краями предполагаемого кольцевого тока должна быть порядка  $10^{18}$  в. Поскольку две силовые линии поля, идущие от внешнего и внутреннего краев кольцевого тока, сходятся, эта разность потенциалов должна приводить к появлению в полярной ионосфере направленного к полюсу электрического поля напряженностью более  $10^{-3}$  в/см. Мартин предположил также, что положительные ионы дрейфуют быстрее отрицательных (ток Холла), так что в утреннем секторе ток должен течь на запад, а в вечернем — на восток. Однако теперь мы знаем, что в области  $E$  ионосферы ток Холла в основном переносится электронами, так что направление системы токов по Мартину следовало бы изменить на обратное.

После открытия внешнего радиационного пояса его осевая асимметрия и являющееся следствием этой асимметрии поле электрической поляризации детально исследовались. Чемберлен [24] и Керн [55] предположили, что за счет неоднородного распределения плазмы и сжатия магнитосферы будет возникать градиент магнитного поля  $\nabla B$ , направленный как в вечернем, так и в утреннем секторе к полуночному меридиану. Направления дрейфа, связанного с этим градиентом магнитного поля, противоположны для разноименных зарядов, что должно приводить к появлению тонких слоев пространственного заряда и, следовательно, к появлению электрического поля поляризации, направленного в вечернем секторе от Земли, а в утреннем секторе — к Земле. Возникающее таким образом электрическое поле будет переноситься в полярную ионосферу, вызывая появление тока, направленного в вечернем секторе на восток, а в утреннем — на запад.

В гл. 6 отмечалось, что в вечернем секторе полярные сияния, вызываемые в основном электронами, пространственно отделены от диффузных светящихся полос, вызываемых вторжением протонов. Именно это разделение привлекало внимание многих исследователей, искавших электрическое поле, которое могло бы привести к появлению авроральной электроструи. Имеет смысл попытаться проверить существование такого электрического поля путем выпускаания с ракеты ионизируемых облаков некоторых химических элементов и другими методами.

Поляризация радиационного пояса и ее последствия наиболее полно изучены Феджером [38]. Его основное допущение сводится к тому, что пояс энергичных протонов (положительный пространственный заряд) погружен в малоэнергичную плазму магнитосферы. Если пренебречь инерциальным членом  $m\mathbf{v}d\mathbf{v}/dt$ , то скорость дрейфа заряженных частиц в магнитосфере

$$\mathbf{v}_G = \left( \mathbf{E} - \frac{\mu \nabla B}{e} \right) \times \mathbf{B} / B^2.$$

Для малоэнергичной плазмы это выражение упрощается, поскольку в этом случае дрейф, обусловленный градиентом  $\nabla B$ , пре-

небрежимо мал по сравнению с дрейфом, связанным с суточным вращением Земли:

$$\mathbf{v}_G = [\mathbf{E} \times \mathbf{V}] / B^2,$$

где  $\mathbf{E} = \Omega \times \mathbf{r} \times \mathbf{V}$ ,  $\Omega$  — скорость вращения,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор, измеряемый от оси вращения (ср. [48]).

Для энергичных частиц влияние вращения Земли сводится к пренебрежимо малой величине, так что

$$\mathbf{v}_G \approx -\frac{\mu}{e} \frac{\nabla B \times \mathbf{V}}{B^2}.$$

Таким образом, в поле, не обладающем осевой симметрией (например, в магнитосфере, сжатой солнечным ветром), траектории дрейфа энергичных протонов и малоэнергичной плазмы различны, что вызывает сильное пространственное разделение зарядов. Нейтральность среды в целом при этом может почти не нарушаться, поддерживаясь токами вдоль силовых линий геомагнитного поля и токами в ионосфере.

Рассмотрим силовую трубку, поперечное сечение которой при прохождении через ионосферу имеет площадь  $1 \text{ см}^2$ . Ионосфера при этом считается сферической оболочкой. Любое электростатическое поле  $\mathbf{E}$  вызовет движение силовой трубки вместе с заполняющей ее плазмой. Проходящая через ионосферу часть силовой трубки при этом перемещается со скоростью  $\mathbf{v}_D$  по отношению к вращающейся Земле. Если  $Q$  — половина пространственного заряда малоэнергичной плазмы, то плотность тока, связываемого с движением проходящей через ионосферу части силовой трубки, будет равна  $Q \mathbf{v}_D$ . Пространственный заряд энергичных частиц —  $Q$  (для земного наблюдателя) даст ток

$$(-Q) \cdot (-\mathbf{v}_R) = Q \mathbf{v}_R,$$

где  $\mathbf{v}_R$  — скорость вращения Земли.

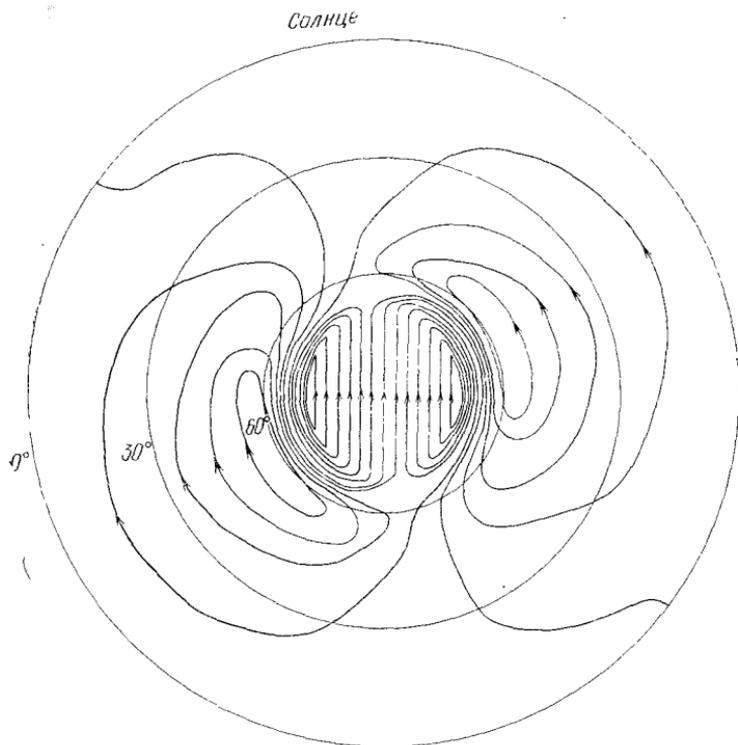
Вспоминая, что уравнения теории динамо по [25] эквивалентны уравнению

$$\nabla J = \nabla[-(\int \sigma dz) \nabla \phi + \int \sigma(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) dz] = 0,$$

где  $\phi$  — электростатический потенциал, можем для нашего случая записать

$$\nabla(J + Q \mathbf{v}_R + Q \mathbf{v}_D) = 0.$$

Это уравнение можно переписать как дифференциальное уравнение для  $\phi$ . Далее, поскольку  $\mathbf{E} = -\nabla \phi$ , можно получить ток  $J$ . Пример расчетов Феджера приведен на рис. 163. Согласно этим расчетам, напряженность магнитного поля, обусловленного описанным механизмом, составляет примерно  $80\gamma$ . Если во время геомагнитных бурь имеют место заметное усиление пояса протонов и значительное



Р и с. 163. Система токов в ионосфере за счет поляризации радиационного пояса. Интегральная проводимость Холла ( $\int \sigma_2 dh$ ) всюду вдоль зоны полярных сияний принята равной  $45 \cdot 10^{-8}$  эл.-магн. ед., что вдвое больше проводимости в средних широтах в полуденное время. Разность потенциалов 290 в [38].

увеличение проводимости вдоль зоны полярных сияний, то напряженность может быть несколько выше.

Теория Феджера представляет собой основу для дальнейшего изучения последствий асимметрии радиационных поясов и связи поясов с ионосферой.

4. *Теория динамо.* Успех теории динамо в объяснении спокойных солнечно-суточных вариаций привел некоторых исследователей к предположению, что механизм динамо ( $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ) в ионосфере ответствен и за формирование авроральных электроструй\*.

Теория динамо полярных магнитных суббурь предполагает наличие поясов высокой проводимости вдоль зон полярных сияний (по одному в каждом полушарии). В итоге, помимо обычной системы

\* В несколько измененном виде эта идея проводится советским ученым М. И. Пудовкиным (см. его докторскую диссертацию, Ленинградский университет, 1968 г.). — Прим. ред.

токов  $S_q$ , механизм динамо должен приводить к появлению еще одной токовой системы.

Качественные расчеты для ионосферы с анизотропной проводимостью выполнены в работах [40, 66]. Дифференциальное уравнение для плотности тока  $J$  имеет такой же вид, как в теории динамо  $S_q$ , т. е.

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{\partial J}{\partial \lambda} \frac{1}{\sin \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial J}{\partial \theta} \right) = 2G \Sigma_3 \left[ \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \cos \theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) \right].$$

Здесь  $J = J_q + J_a$ , где  $J_q$  — плотность тока для  $S_q$ -вариаций, а  $J_a$  — плотность тока из-за увеличения проводимости,  $\Sigma_3 = \int \sigma_3 dh$  — интегральная проводимость Каулинга вдоль зон полярных сияний,  $\Psi$  — потенциал скорости ветра:

$$\Psi = k_1 P_1^1(\cos \theta) \sin(n\lambda + \pi/2).$$

Проводимость вдоль зон полярных сияний, ширина каждой из которых  $5^\circ$ , считалась примерно в 10 раз больше, чем в остальной ионосфере.

Было обнаружено [40], что система ветров, ответственных за  $S_q$ -вариацию, не может объяснить ориентацию системы токовых электроструй относительно Солнца. К тому же расчетная плотность тока оказывается меньше наблюдаемой. Чтобы преодолеть эти трудности, необходимо допустить, что движение воздуха в высоких широтах сдвинуто по фазе примерно на  $100$ — $150^\circ$  по отношению к системе ветров, объясняющих  $S_q$ , а также что скорость ветра или величина проводимости вдоль зоны полярных сияний больше принятых в качественных расчетах. На эти трудности указывал также Маеда [59].

Наибольшая трудность для теории состоит в том, что вариации  $S_q$  абсолютно различны в геомагнитносопряженных точках. Это может свидетельствовать о сильном различии систем ветров в северном и южном полушариях. В то же время полярные магнитные суббури в сопряженных точках удивительно сходны (см. разд. 3.5).

В несколько ином виде теория динамо разрабатывалась в работах [27, 85]. В предположении о существовании узкого слоя высокой проводимости исследовалось воздействие однородного ветра, дующего поперек него. При этом оказалось, что положительные ионы переносятся таким ветром более направленно, чем электроны, а это приводит к появлению электрического поля поляризации поперек высокопроводящего слоя и, следовательно, к интенсивному току Холла вдоль слоя. Этот механизм тоже сильно зависит от направления ветра в ионосфере, что позволяет повторить приведенные выше критические замечания. К тому же предлагаемая модель не является независимой от высоты и применима лишь в области  $E$ , где

частота соударений положительных ионов с нейтральными частицами достаточно высока. Поэтому предполагаемый эффект будет значительно ослаблен, если пространственный заряд имеет возможность уходить вдоль силовых линий поля.

5. *Конвекция.* Как указывалось в [14, 48, 70, 71], «трение», или «вязкообразное» взаимодействие, между солнечным ветром и магнитосферой может привести к крупномасштабному «конвективному движению» в магнитосфере. Конвекция при этом ограничивается движениями со скоростью  $v$ , которые удовлетворяют уравнению

$$\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] = 0, \quad (1)$$

где электрическое поле  $E$  определяется как градиент скалярной функции  $\varphi$

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad (2)$$

так что

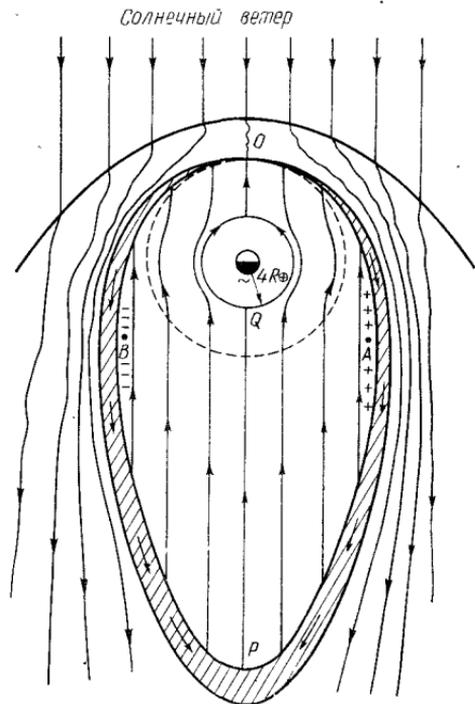
$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \nabla\varphi. \quad (3)$$

Этот тип движений Голд [43] назвал перестановкой (interchange) магнитных силовых трубок; плазма, занимающая в данный момент времени одну из силовых трубок, мигрирует в дальнейшем вместе с этой трубкой. Поскольку скорость  $\mathbf{v}$  и поле  $\mathbf{B}$  перпендикулярны градиенту  $\nabla\varphi$ , они должны располагаться на эквипотенциальных поверхностях  $\varphi = \text{const}$ . Рассмотрим экваториальное сечение эквипотенциальных поверхностей в дипольном поле. Линии пересечения должны быть эквипотенциальными и совпадать с линиями движения плазмы (иначе говоря, с линиями движения точек пересечения бесконечно тонких силовых трубок с экваториальной плоскостью).

Вместо того чтобы строить систему конвекции по взаимодействию потока плазмы с магнитосферой, в работах [14, 70, 71] была предложена картина ad hoc, состоящая из двух замкнутых систем (рис. 164). Проекция этих замкнутых систем вдоль силовых линий в ионосферу совпадает с линиями движения проходящих через ионосферу частей силовых линий геомагнитного поля, участвующих в конвекции (рис. 165). Однако в области  $E$  ионосферы положительные ионы не могут более мигрировать вместе с силовыми линиями (из-за частых соударений с нейтральными частицами во время закручивания вокруг силовых линий). В результате вдоль линий конвекции перемещаются вместе с силовыми линиями только электроны, вследствие чего возникает ток Холла, направление которого противоположно движению электронов. Эта модель послужила основанием для предположения, что конвекция и приводит к формированию  $SD$ -токовой системы (см. разд. 2.1).

Если  $SD$ -токовая система возникает в результате предполагаемой конвекции, то линии тока должны совпадать с эквипотенциальными

Р и с. 164. Схема экваториального сечения магнитосферы Земли (вид с Северного полюса). Показано движение солнечного ветра и конвекция внутри магнитосферы. Линии конвекции в то же время являются эквипотенциальными линиями соответствующего электрического поля, которое можно рассматривать как результат накопления положительных и отрицательных зарядов в областях *A* и *B* [11].



линиями; в центре токового вихря в утреннем секторе должен накапливаться положительный пространственный заряд, а в центре вихря в вечернем секторе — отрицательный. Согласно [14, 70, 71], разность потенциалов между двумя центрами должна составить около 20 кВ.

Конвективное движение магнитосферной плазмы рассматривалось также в работах Нишиды [65], Брайса [21] и Уолбриджа [93]. Первые два автора учли наличие открытого хвоста магнитосферы и четкое ограничение тепловой плазмы областью плазмосферы (см. [23]). На рис. 166 показаны линии движения магнитосферной плазмы в экваториальной плоскости с учетом конвекции и суточного вращения Земли [21]. Самая внешняя по отношению к Земле замкнутая линия соответствует плазмопаузе (или так называемому «колелу»).

Теория должна объяснить такие важные особенности магнитосферных суббурь, как взрывная фаза и формирование пояса протонов. Любая теория не должна также базироваться на удачном построении эквивалентных токовых систем до тех пор, пока не будет доказана реальность их существования в ионосфере.

6. Разряд из нейтральной точки. Согласно теории Данжи [33, 34], должна существовать крупномасштабная конвекция магнитосферной плазмы, подобная рассмотренной в п.5. Различие сос-

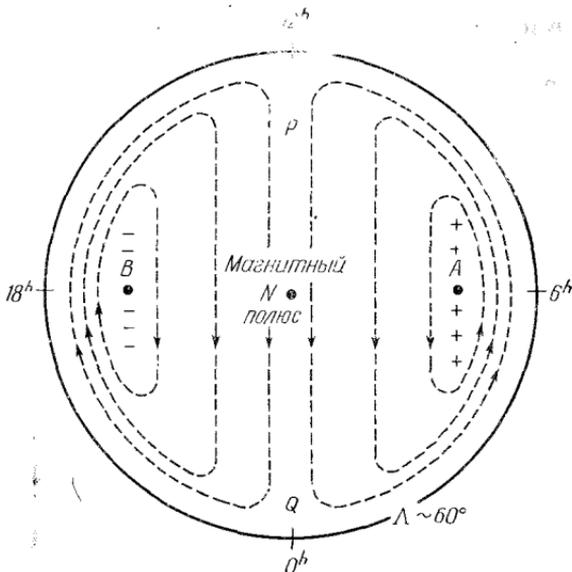
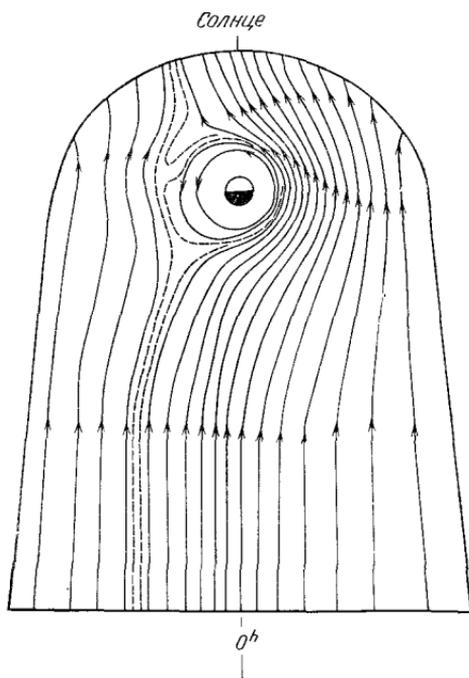
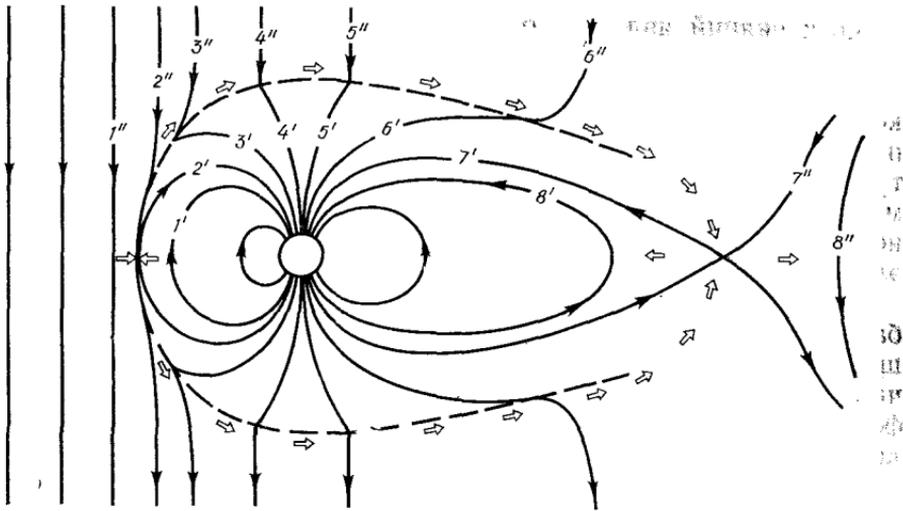


Рис. 165. Схема циркуляции в ионосфере северной полярной шапки, соответствующая конвекции внутри магнитосферы (см. рис. 164) [11].



Р и с. 166. Конвекция магнитосферной плазмы [21].



Р и с. 167. Взаимодействие межпланетного и геомагнитного полей и результирующее движение плазмы (светлые стрелки) по модели Данжи. Цифры соответствуют последовательности положений одной пары силовых линий межпланетного (два штриха) и земного (один штрих) магнитных полей, участвующих в пересоединении силовых линий и последующей конвекции [58].

тоит в механизме, вызывающем конвекцию. В качестве такого механизма вместо трения, или вязкообразного взаимодействия, Данжи предлагает взаимодействие между направленным к югу от плоскости эклиптики межпланетным магнитным полем и дипольным геомагнитным полем. В результате такого взаимодействия в точке пересечения границы магнитосферы с линией Солнце — Земля и в хвосте магнитосферы возникают нейтральные точки типа X. В результате совместного воздействия солнечного ветра и движения плазмы в окрестностях нейтральной точки типа X [31] возникает конвективное движение силовых линий геомагнитного поля (см. также [58]). Проекция картины конвекции в ионосферу напоминает SD-вариацию. На рис. 167 показано последовательное движение одной из силовых линий геомагнитного поля, участвующих в конвекции. Движение, соответствующее последовательности положений 1—8, должно приводить к соответствующему движению силовой линии в ионосфере поперек полярной шапки в плоскости полуденно-полуночного меридиана. В полуплоскости полуночного меридиана северные и южные части силовых линий, перешедших в результате конвекции с дневной стороны на ночную, могут вновь соединиться, что обеспечит выделение энергии, достаточной для магнитосферной суббури (см. п. 9 разд. 10.4.2).

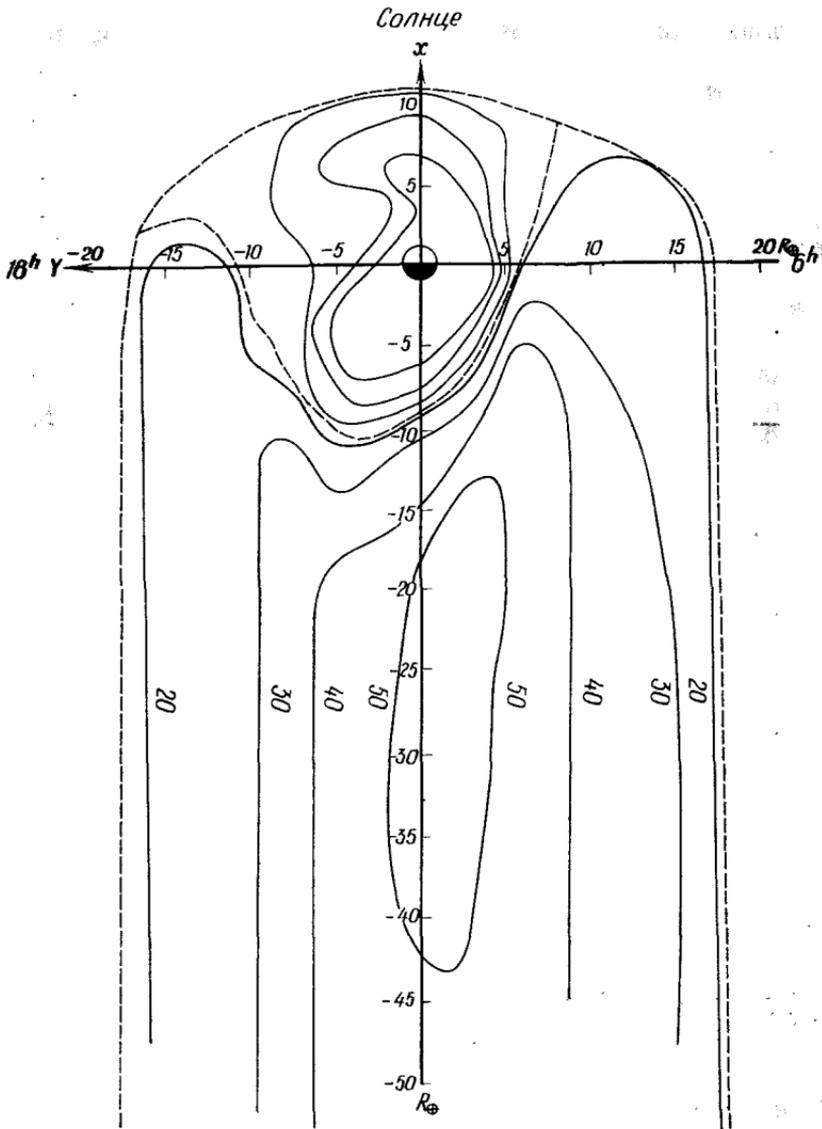
7. Разряд с нейтральной линии. Акасофу и Чепмен [2] считали, что объяснение ленточной структуры некоторых по-

лярных сияний является одним из наиболее важных вопросов в любой теории полярных сияний. В связи с этим они предположили, что магнитосфера должна обладать структурными особенностями, которые могли бы приводить к генерации тонких, но протяженных пучков (листочков) энергичных авроральных электронов. Эти структурные особенности должны быть тесно связаны с деформацией геомагнитного поля, поскольку в недеформированном дипольном поле нет каких-либо особых областей, способных модулировать потоки электронов указанным образом.

Поскольку ленточная структура полярных сияний имеет глобальный характер, деформации поля должны быть крупномасштабными. Акасофу и Чепмен пришли к выводу, что одной из причин, способных вызвать удовлетворяющую таким требованиям деформацию поля, может быть кольцевой ток. Диамагнитный эффект кольцевого тока приводит к уменьшению напряженности дипольного поля в определенной области магнитосферы, вследствие чего при достаточно интенсивном кольцевом токе может образоваться такая линия, где напряженность поля становится нулевой ( $\mathbf{V}=0$ ) или очень низкой. Конечно, для этого необходимо, чтобы отношение плотности кинетической энергии частиц к плотности энергии магнитного поля  $nkT/(B^2/8\pi)$  было очень велико. Дальнейшее усиление пояса кольцевого тока может привести к обращению исходного магнитного поля и таким образом к появлению нейтральных линий типа  $X$  и  $O$ . Однако эта точка зрения была подвергнута критике со стороны многих исследователей. Согласно Паркеру [68], нет оснований полагать, что чрезмерное разбухание магнитосферы может привести к появлению новых силовых линий поля с обратным направлением (по отношению к начальному).

8. *Ускорение электрическим полем.* Тейлор и Онес [91] предположили, что взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой поддерживает на постоянном уровне электростатическое поле, вызывающее появление тока в ионосфере при увеличении ее проводимости за счет вторжения частиц, и что именно это электростатическое поле ускоряет авроральные частицы. Они выполнили расчеты распределения электрического поля и соответствующих эквипотенциальных контуров по эквивалентным системам токов в ионосфере (см. рис. 31а), приняв определенную модель распределения проводимости. Затем, используя конкретную модель магнитосферы, они спроецировали это распределение электрических полей и эквипотенциальные линии из ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля в экваториальную плоскость рис. 168. Движения заряженных частиц в этой сложной системе геомагнитного и геоэлектрического полей можно исследовать в предположении об их адиабатичности. Такие адиабатические движения связаны с тремя постоянными величинами:

- 1) полная энергия  $K=W+eV$ ;
- 2) магнитный момент  $\mu=W_{\perp}/B$ ;



Р и с. 168. Эквипотенциальные линии в экваториальной плоскости магнитосферы, построенные по эквивалентной токовой системе (см. рис. 31а). Значения потенциала указаны в киловольтах [91].

3) интегральный инвариант  $J = \sqrt{2m\mu} \oint \sqrt{B_m - B} ds$ , или  $J' = J / \sqrt{2m\mu} = \oint \sqrt{B_m - B} ds = f(B)$ , где  $W$  — полная кинетическая энергия  $W_{\perp}$  — кинетическая энергия, соответствующая закручиванию частиц вокруг силовых линий,  $B_m = W/\mu$ ,  $ds$  — элемент силовой линии.

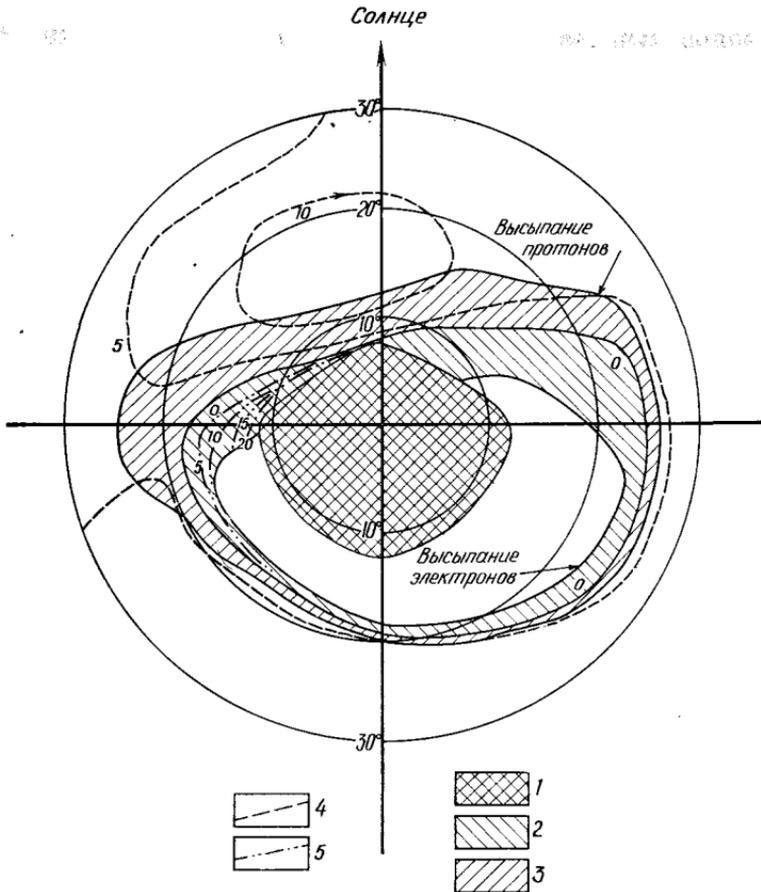


Рис. 169. Пересечение поверхностей постоянного  $J'$  с поверхностью Земли для частиц солнечного ветра с  $K = \pm 18$  кэв и  $\mu = 20$  кэв/гс. Энергия высыпавшихся частиц равна 10 кэв [91]. 1 — область разомкнутых силовых линий, 2 — область высыпания электронов, 3 — область высыпания протонов, 4 — изолинии, соответствующие различным значениям  $J'$  для протонов, 5 — значениям  $J'$  для электронов.

Таким образом, если известно  $\mathbf{B}(r, \theta, \varphi)$ , определение  $K$ ,  $\mu$  и  $J'$  дает поверхность, на которой должна находиться частица.

Тейлор и Онес рассчитали траектории электронов и протонов солнечного ветра с энергиями менее  $W = 1$  кэв для заданного набора значений  $K = \pm 18$  кэв и  $\mu$  посредством нахождения поверхностей постоянного  $J'$ . На рис. 169 приведены результаты их расчетов. Их модель позволяет дать следующее описание авроральных процессов:

1. Авроральные частицы приходят из солнечного ветра с энергиями менее 1 кэв.

2. Авроральные частицы захватываются вблизи поверхности магнитосферы при  $0,5 \leq J' \leq 5,0$  (в единицах  $R_{\oplus} \cdot c^{1/2}$ ) и по мере дрейфа вдоль поверхностей  $J'$  ускоряются электростатическим полем от 1 до 35 кэв. Частицы не остаются на орбитах захвата, они либо высыпаются в верхнюю атмосферу Земли и там поглощаются, либо уходят из магнитосферы.

3. Имеется четкая граница между областями, где находятся электроны и протоны солнечного ветра, причем область протонов располагается к экватору от области электронов.

4. Энергетические спектры электронов должны быть жестче в направлении от границы к экватору.

5. Высыпание электронов происходит в основном в узком интервале широт на ночной стороне Земли; протоны высыпаются в широкой области в послеполуденном секторе и в узкой области к экватору от области высыпания электронов в ночном секторе.

Важным, но нерешенным вопросом в теории Тейлора и Онеса является вопрос о происхождении электрического поля в магнитосфере. В теории подразумевается (по крайней мере в первом приближении), что механизм образования электрического поля не зависит от появления магнитосферных суббурь. В настоящее время имеются некоторые основания полагать, что напряженность электрического поля сильно увеличивается и меняется во время полярных магнитных суббурь [44].

9. *Неустойчивость хвоста магнитосферы.* В течение последних нескольких лет внимание многих исследователей приковано к процессам в хвосте магнитосферы, поскольку магнитное поле хвоста является возможным источником энергии магнитосферных суббурь. В соответствии с этими представлениями было выдвинуто несколько теорий, которые, однако, значительно различаются в деталях, в особенности в отношении механизма преобразования энергии хвоста магнитосферы [12, 13, 34, 75]. Воспользуемся предложенной в начале разд. 10.4.2 схемой потока энергии, конкретизировав ее в соответствии с рассмотренными теориями.



1. Кинетическая энергия частиц солнечного ветра
2. Разряд с нейтральной линии типа X [31]. «Трение» [14, 70, 71]
3. Магнитная энергия в хвосте магнитосферы. Разрывная неустойчивость [29]
4. Турбулентность (Аксфорд). Дрейф электронов, усиленный магнитогидродинамическими волнами (Пиддингтон)

Аналогичная проблема для подобной конфигурации магнитного поля широко обсуждалась в связи с поиском источников энергии солнечных вспышек [31, 67, 69, 83]. Поэтому при рассмотрении преобразования магнитной энергии в хвосте магнитосферы в энергию суббури можно использовать те же или сходные аргументы, что и при изучении происхождения солнечных вспышек [12, 15].

В частности, в соответствии с теорией Петчека [69], силовые линии магнитного поля в области хвоста дрейфуют к токовому слою, находящемуся в экваториальной плоскости, со скоростью, составляющей примерно одну десятую альвеновской скорости  $v_A = v/V\sqrt{4\pi\rho}$ . Эта скорость дрейфа должна быть такой же, как и локальная скорость дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях, т. е.  $E/B=0,1V/\sqrt{4\pi\rho}$ . В работе [15] было показано, что для  $L=2 \cdot 10^5$  км разность потенциалов  $\phi=30$  кВ (при  $\rho=2 \cdot 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup> и  $B \approx 10\gamma$ ).

Как указывалось в [82], механизм Петчека, как и механизмы Свита и Данжи, соответствует стационарной динамике плазмы и конкретной конфигурации магнитного поля вблизи токового слоя. Поэтому проведенное выше рассмотрение, по-видимому, неприменимо к авроральным суббурям.

Токовый слой может иметь три вида неустойчивости: рифленую (rippling), разрывную (tearing) и гравитационную. Эти виды неустойчивости, известной под названием «конечной резистивной» и обусловленной конечной величиной сопротивления среды, широко исследовались в работах [41, 42, 51, 63]. Для нас особый интерес представляет разрывная неустойчивость, представляющая собой по существу разрыв токового слоя на ряд волокон под воздействием пинч-эффекта. Поскольку сопротивление среды конечно, происходит отрыв силовых линий от плазмы (нарушается вмороженность. — *Ред.*), и энергию поля можно преобразовать в тепловую за счет омического нагрева. Существование неустойчивости этого типа было экспериментально доказано в работах [18, 35]. Исследовалось также нарастание разрывной неустойчивости в бесстолкновительной плазме [41], где эффекты соударений, определяющих сопротивление среды, можно заменить эффектами инерции электронов. При этом исследовалась устойчивость конфигурации нейтрального слоя [46] по отношению к возмущениям типа  $\exp(\omega t + ikz)$ . Оказалось, что условие устойчивости можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{2} A n_0 r_c \left( \frac{v_s}{v} \right)^2 > 1,$$

где  $A=8\pi/k(h+k)$ ,  $r_c=e^2 mc^2$ ,  $h^2=2\pi n_0 r_c (v_s/v)^2$ , что примерно равно квадрату толщины слоя, в котором возникает пинч-эффект,  $v_s$  — направленная скорость частицы,  $v$  — среднеквадратичная тепловая

скорость. Указанное условие аналогично условию Беннета, определяющему возникновение пинча:

$$I^2 > 2A_s n m v^2 \quad \left[ \text{или} \frac{1}{2} A_s n r_c \left( \frac{v_s}{v} \right)^2 > 1 \right],$$

где  $I$  — ток цилиндрического потока частиц,  $A_s$  — площадь потока. Таким образом, предполагается, что площадь  $A_s$  каждого пинча первого порядка отождествляется с величиной  $A$ , в грубом приближении представляющей собой произведение толщины слоя  $2/h$ , в котором возникает пинч, и длины волны неустойчивости  $2/k$ . Следовательно,  $k=h$  представляет собой граничное условие неустойчивости, и при  $k < h$  возникает неустойчивость. Относительно скорости нарастания неустойчивости отмечалось [41], что в особом случае магнитогиродинамический и кинетический (при помощи уравнения Власова) подходы дают по существу один и тот же результат.

Более детальное исследование скорости нарастания [67] было проведено по уравнению Власова на основе решения задачи о конфигурации плазмы и магнитного поля вблизи нейтрального слоя. Применение этих результатов к авроральным явлениям рассмотрено в работе [29]. Время нарастания неустойчивости определяется следующим выражением:

$$\tau = 2 \left( \frac{2\lambda}{R_e} \right)^{3/2} \frac{\lambda}{v_T} \frac{\theta_e}{\theta_e + \theta_i},$$

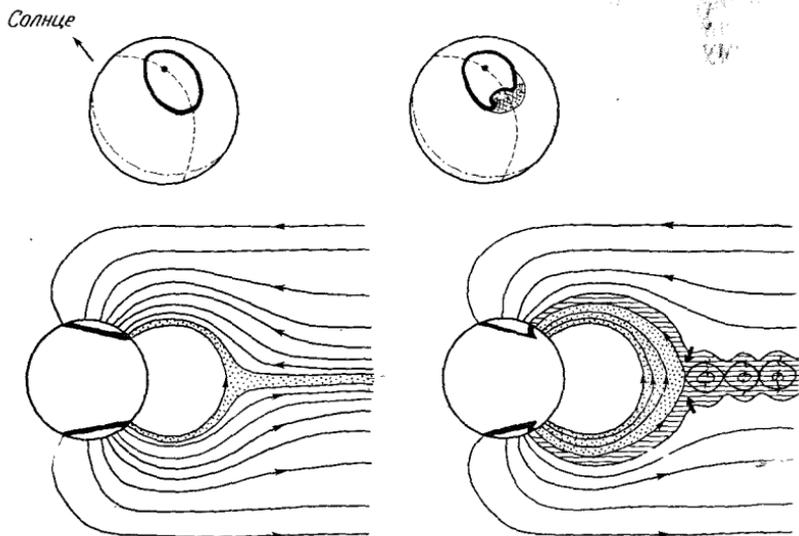
где  $\lambda$  — толщина слоя,  $R_e$  — гирорадиус электронов,  $v_T$  — тепловая скорость электронов,  $\theta_e = kT_e$ ,  $\theta_i = kT_i$ ,  $T_e$  и  $T_i$  — температуры электронов и ионов. Принимая  $2\lambda \approx 600$  км,  $B \approx 1,6 \cdot 10^{-4}$  эс,  $\theta_i \approx 1$  кэв, получаем

$$\tau \approx 15 \text{ сек, если } \theta_e \approx 10 \text{ кэв,}$$

$$\tau \approx 5 \text{ сек, если } \theta_e \approx 1 \text{ кэв.}$$

Как отмечалось выше, разрывная неустойчивость — это по существу сжатие токового слоя, приводящее к разрыву на ряд волокон тока. Каждое волокно создает свое собственное магнитное поле. На рис. 170 представлены схематические картины, имеющие место при возникновении неустойчивости и во время ее развития.

Аксфорд [13] указывал, что предложенный в [29] механизм не может объяснить множественность одновременно появляющихся дуг полярных сияний, и предположил, что вся полоса высыпания частиц в овале полярных сияний соответствует области между границей



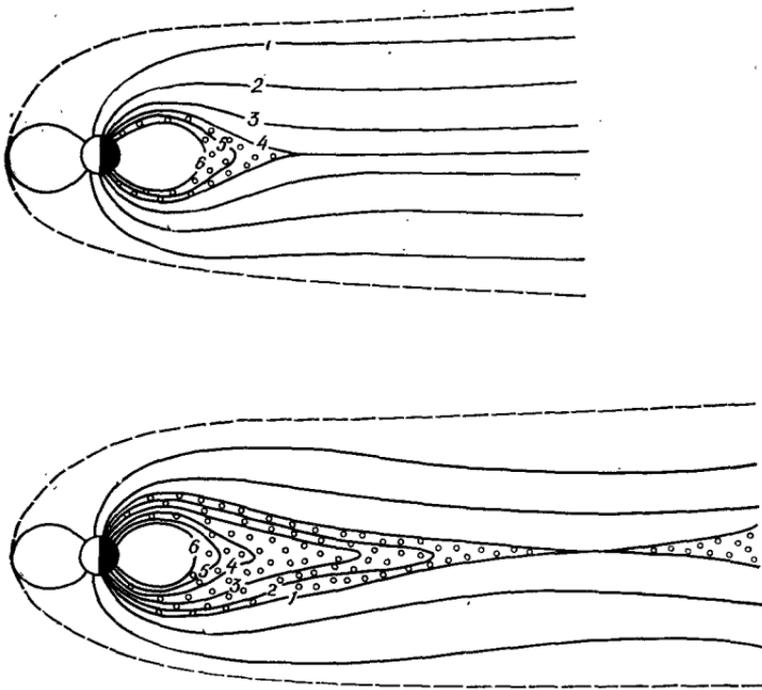
Р и с. 170. Разрывная неустойчивость и соответствующее изменение конфигурации магнитного поля (слева—спокойные условия, справа — суббурия в полярном сиянии, соответствующая развитию неустойчивости).

захвата частиц и границей замкнутых силовых линий\*. Если это так, то авроральные электроны должны генерироваться каким-то механизмом, действующим в области захвата, а не в области хвоста. Аксфорд [13] предположил также, что пересоединение силовых линий хвоста магнитосферы должно сказываться на изменениях конфигурации магнитного поля так, как это показано схематически на рис. 171.

Пиддингтон [75] показал, что пересоединение силовых линий не может происходить через посредство электронно-ионных соударений, и высказал предположение, что процесс пересоединения осуществляется за счет электронов, примыкающих к токовому слою снизу или сверху от него и что этот поток может значительно усиливаться магнитогидродинамическими волнами (рис. 172).

Предположим временно, что какой-то механизм приводит к воссоединению силовых линий в хвосте магнитосферы. Силовая трубка, образованная вновь соединившимися частями силовых линий геомагнитного поля, добавляется к другим трубкам, входящим в состав области захвата. В результате с ночной стороны области захвата возникает большая выпуклость. Рассмотрим последствия воссое-

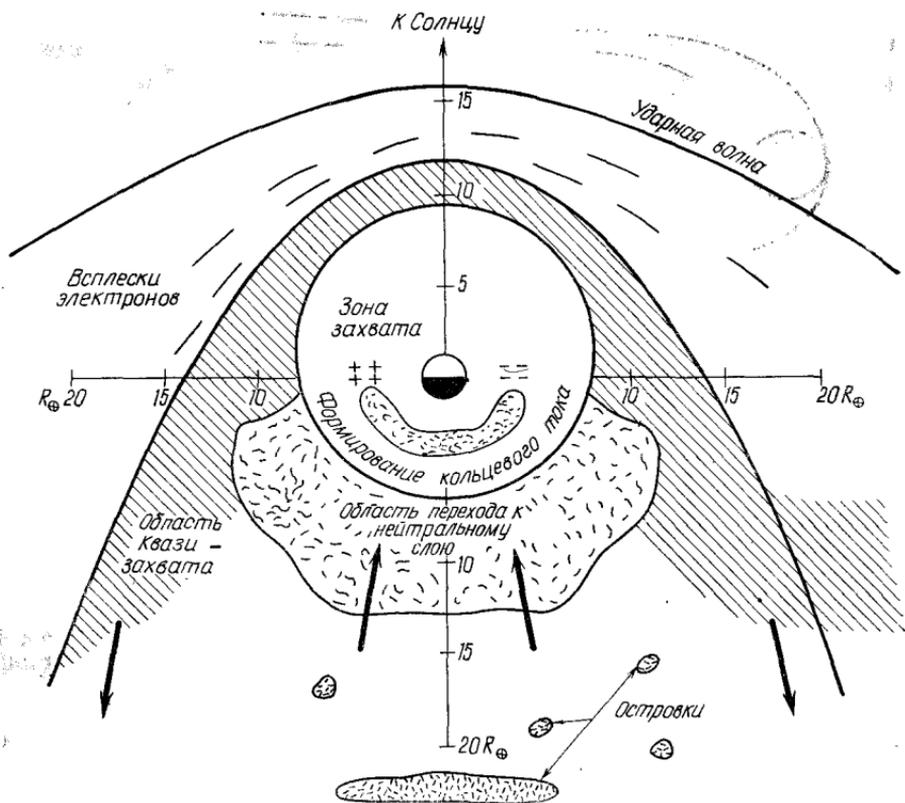
\* Точнее, мысообразной области замкнутых силовых линий при переходе на ночной стороне магнитосферы от области устойчивого захвата частиц к нейтральному слою. — *Прим. ред.*



Р и с. 171. Неустойчивость в хвосте магнитосферы и соответствующее изменение конфигурации магнитного поля [13].

динения [8]. Предположим, что напряженность магнитного поля в хвосте составляет  $B=30\gamma$  и что концентрация частиц  $2\text{ см}^{-3}$ . Магнитный поток в трубке постоянен, поэтому площадь в хвосте проецируется вдоль силовых линий в полярную область с уменьшением в 1600 раз. Длины и скорости проецируются с уменьшением в 40 раз. Если воссоединение силовых линий происходит со скоростью  $0,1v_A \approx 10^7\text{ см/сек}$ , то в зоне полярных сияний скорость соответствующего движения составит  $2,5 \cdot 10^5\text{ см/сек} = 2,5\text{ км/сек}$ . Полная энергия, запасенная в выпуклости полярного сияния, составляет около  $3 \cdot 10^{20}\text{ эрг}$ . Объем части хвоста, где магнитное поле должно стать равным нулю, обеспечивая выделение указанного количества энергии, должен иметь линейный размер  $l = 4 \cdot 10^9\text{ см} \approx 6R_{\oplus}$  [ $(B^2/8\pi)l^3 = 3 \cdot 10^{20}\text{ эрг}$ ]. В этом случае проекция длины  $l$  в ионосферу равна примерно  $1000\text{ км}$  ( $\approx 10^\circ$  по долготе) и согласуется с меридиональной протяженностью выпуклости в полярном сиянии.

Как упоминалось в разд. 10.4.1, маловероятно, что в ранней фазе магнитосферной суббури участвует большая часть хвоста магнитосферы. Поскольку первое свидетельство о суббуре обнаруживается по процессам вблизи границы области захвата, приведенная



Р и с. 172. Магнитогидродинамическое движение плазмы (стрелки) и формирование кольцевого тока [74].

выше оценка предполагает исчезновение магнитного поля в довольно большом объеме сразу же вне границы области захвата.

Как неизбежное следствие воссоединения, происходит сильное сокращение вновь образовавшихся замкнутых силовых линий по длине и приближение к границе области захвата. Сокращение силовых линий по длине будет связано с движением плазмы к Земле [74]. Определяющей в таком течении является сила Лоренца ( $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ), поскольку в точке соединения  $\nabla \times \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{J}$  очень велико. Все теории, относящиеся к рассматриваемой категории, показывают, что сокращение силовых линий по длине приводит к ускорению плазмы, в которую вморожено поле, за счет бетатронного процесса. Это связано с тем, что по мере сокращения силовых линий напряженность магнитного поля в точке пересечения экваториальной плоскости возрастает, а величина  $W_{\perp} / B$  должна сохраняться постоянной. Таким образом, если за счет сокращения силовых линий по длине

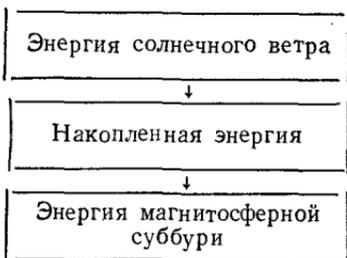
напряженность поля  $V$  возрастает, скажем, в 10 раз, то протон с энергией 1  $kэв$  может быть ускорен до энергии 10  $kэв$  (в конце процесса сокращения силовых линий по длине). Этот механизм может быть источником появления протонов кольцевого тока в полуночном секторе (или в секторе, соответствующем позднему вечеру, если допустим дрейф протонов на запад).

Однако следует иметь в виду, что протоны кольцевого тока появляются в большом количестве в секторе, освещенном Солнцем (см. разд. 10.2.3). К тому же в раннюю фазу интенсивной суббури обилие частиц кольцевого тока в широком интервале долгот около полуночного меридиана (20<sup>h</sup>—6<sup>h</sup> LT) сильно уменьшается. Обе эти особенности поведения протонов кольцевого тока довольно трудно объяснить сокращением силовых линий по длине.

Основную проблему, связанную с преобразованием магнитной энергии в энергию суббури, можно сформулировать следующим образом. Крупномасштабная конфигурация магнитного поля в хвосте магнитосферы является результатом крупномасштабной системы локальных  $(\nabla \times \mathbf{B}) \neq 0$  электрических токов и, следовательно, результатом крупномасштабного упорядоченного движения электронов и ионов ( $\mathbf{J} = \sum en\mathbf{v}$ ). Аннигиляция магнитной энергии эквивалентна нарушению этого упорядоченного движения электронов и протонов. Энергия упорядоченного движения  $\Sigma^{1/2}(m\mathbf{v}^2)$  может быть преобразована в энергию теплового хаотического движения  $\Sigma^{1/2}(m\mathbf{v}_i^2)$ , так что  $\mathbf{v} = 0$ ,  $\mathbf{J} = 0$ ,  $\mathbf{B} = 0$  и поэтому  $B^2/8\pi = 0$ . (Если при этом преобразовании основным процессом являются соударения частиц, то этот процесс не что иное, как омический нагрев.) Теории, относящиеся к рассмотренной категории, не дали убедительных доказательств, что указанный процесс может иметь место в объеме с линейным размером по крайней мере  $6R_{\oplus}$  за довольно ограниченный период времени (взрывная фаза длится около 30 мин).

10. *Обменная неустойчивость.* Свифт [87] предположил, что суббуря в полярном сиянии является результатом неустойчивости внешней границы пояса кольцевого тока. Таким образом, необходимая энергия сначала аккумулируется в поясе кольцевого тока как собственная энергия этого пояса, а затем преобразуется в динамическую (процесс аналогичен преобразованию тепловой энергии в кинетическую энергию движения при проколе автомобильной шины). Используя схему потока энергии, можно проиллюстрировать последовательность процессов следующим образом.

Свифт полагает, что электростатическое поле, связанное с асимметричным усилением кольцевого тока, приводит к более крутому градиенту распределения частиц кольцевого тока в полуночном секторе (концентрация  $n \sim R_{\oplus}^{-p}$ ). В этом аспекте суббуря в полярном сиянии представляет собой процесс релаксации такого напряжения. Возможно, это объясняет, почему суббури, как правило, появляются,



1. Кинетическая энергия нейтральной составляющей солнечного ветра(?)
2. Прямая (и с асимметрией) инжекция
3. Энергия частиц кольцевого тока
4. Поверхностная неустойчивость обменного типа

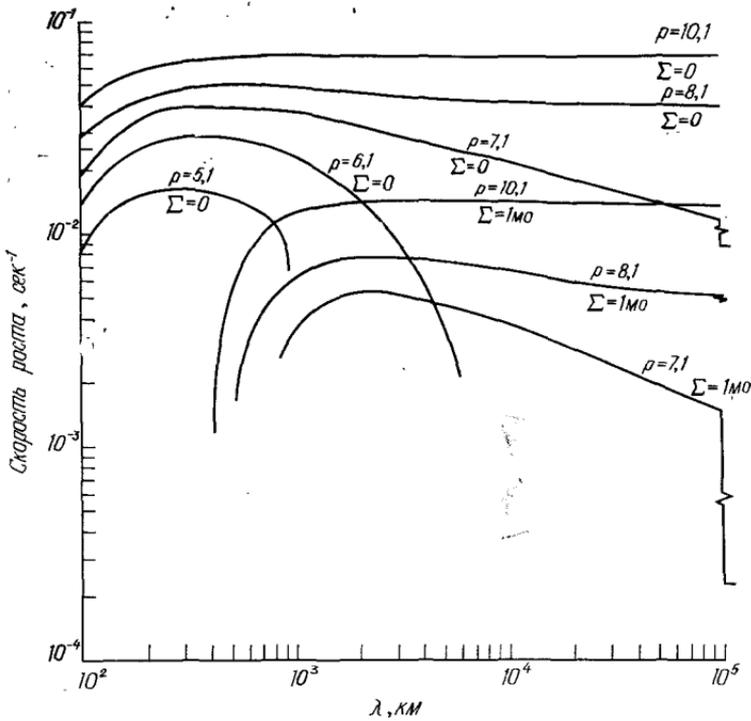
когда происходит быстрый рост кольцевого тока. Спокойная однородная дуга полярного сияния, по-видимому, является следствием разряда с тонкого поверхностного слоя пояса кольцевого тока. Если же градиент распределения частиц превосходит некоторое определенное значение, то появляется тенденция к развитию поверхностной обменной неустойчивости, которая удерживается от дальнейшего развития замыканием через находящуюся внизу ионосферу [28]. Свифт указал, что если ток замыкания, протекающий вдоль силовых линий, становится достаточно интенсивным, то могут развиваться ионно-звуковые волны, взаимодействие которых с частицами — носителями тока вызовет внезапное увеличение продольного сопротивления.

С ростом сопротивления магнитосферная плазма все менее жестко связана с ионосферой, что приводит к быстрому росту неустойчивости. В то же время ионно-звуковые волны передают часть энергии электронам. По оценке Свифта неустойчивость в этом случае может развиваться за время порядка нескольких секунд. Вероятно, внезапное усиление ОНЧ-излучений в момент начала суббури является свидетельством роста ионно-звуковых волн.

На рис. 173 приведена зависимость скорости нарастания предполагаемой обменной неустойчивости от длины волны, измеряемой в экваториальной плоскости.

Свифт [89] предположил, что ранней фазе суббури в полярном сиянии может соответствовать скорость нарастания неустойчивости, представленная на рис. 173 кривой  $p=7,1$ ,  $\Sigma=1$  мс. В этот период нарастание неустойчивости ограничено деполяризующим влиянием ионосферы. Во время быстрой фазы развития суббури в полярном сиянии неустойчивость быстро нарастает, что возможно при сильном увеличении сопротивления среды вдоль магнитных силовых линий за счет роста ионно-звуковых волн.

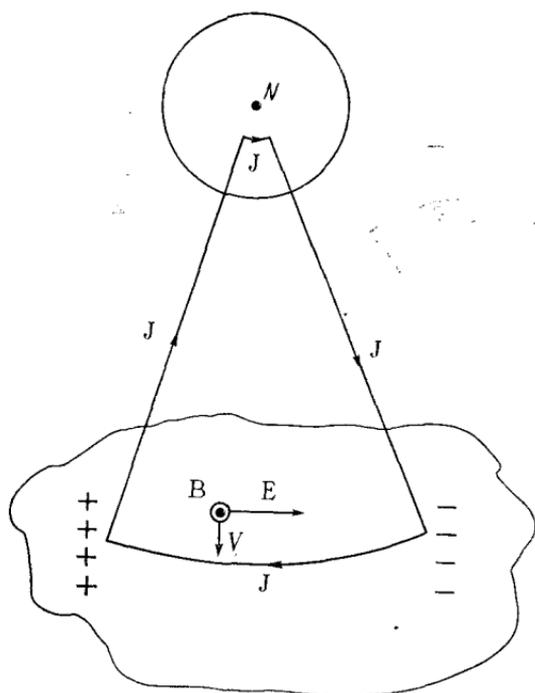
То, что магнитосферные частицы могут зависеть от ионосферной плазмы, видно из следующего примера. Предположим, что в экваториальной плоскости магнитосферы появилась группа протонов и электронов. Это «облако» частиц будет поляризоваться, поскольку протоны имеют тенденцию дрейфовать на запад, а электроны — на восток. В результате возникает электрическое поле, направленное



Р и с. 173. Скорость нарастания обменной неустойчивости в функции длины волны  $\lambda$  вблизи внешней границы пояса кольцевого тока [89]. Предполагается, что концентрация протонов со средней энергией 3,2 кэв уменьшается с геоцентрическим расстоянием как  $R_{\oplus}^{-\rho}$  (в экваториальной плоскости).

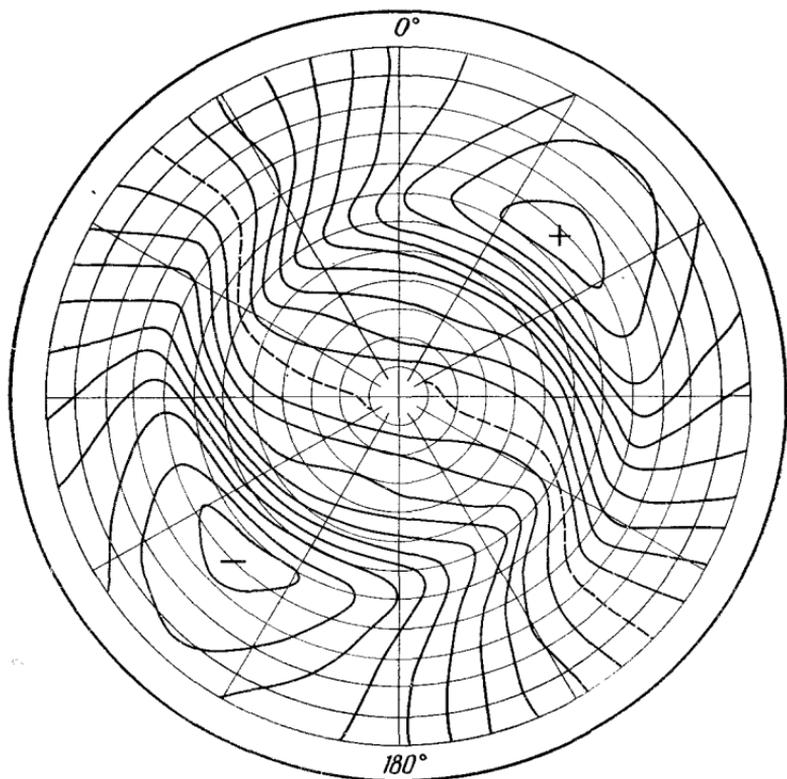
на восток; его взаимодействие с магнитным полем приведет к дрейфу облака от Земли. Если силовые линии магнитного поля и ионосфера обладают проводимостью, то движение облака можно обнаружить, так как поле поляризации приведет к образованию замкнутого контура тока вдоль силовых линий и в ионосфере (рис. 174). Этот ток направлен на запад, в связи с чем сила Лоренца ( $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ ) будет направлена к Земле.

Свифт провел самосогласованный расчет последствий асимметричной инжекции частиц кольцевого тока [90], следуя идеям, предложенным ранее Феджером [36] (см. разд. 10.3). Ему удалось показать, что объединенный эффект электрического поля, возникающего в результате асимметричной инжекции и дифференциальных движений заряженных частиц, приведет к формированию новой системы пространственных зарядов вблизи граничного слоя кольцевого тока. Обусловленное этой системой зарядов электростатическое поле приведет к появлению системы электрических токов,



Р и с. 174. Схема связи магнитосферной плазмы с ионосферой.

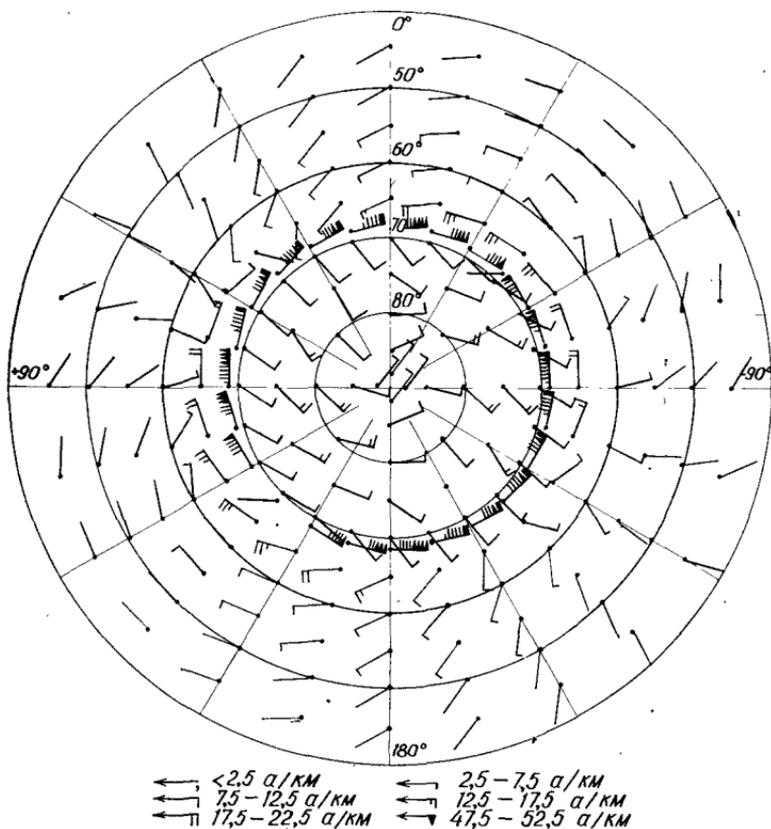
подобной рассмотренной в разд. 10.3. На рис. 175 приведено распределение поля потенциалов, возникающего в экваториальной плоскости магнитосферы при асимметричной инжекции протонов. Ионосферный ток, обусловленный представленным на рис. 175 полем потенциала, показан на рис. 176. Сопоставляя рис. 175 и 176, можно сделать вывод о продольных токах, текущих от положительного центра поля потенциала в сектор  $9^{\text{h}}$  LT зоны полярных сияний. Там этот ток разделяется на два протекающих вдоль зоны тока, один из которых в дневном секторе направлен на восток, а другой в ночном секторе — на запад. В секторе, соответствующем  $21^{\text{h}}$  LT, ток вытекает вдоль силовых линий из ионосферы к отрицательному центру поля потенциала в экваториальной плоскости. Кроме описанной системы токов протекают токи Холла вокруг проходящих через ионосферу силовых линий, вдоль которых текут токи основной системы. В гл. 3 и разд. 10.3 было показано, что такая система может объяснить наблюдаемое распределение поля магнитного возмущения на гм. широтах ниже  $55^{\circ}$ .



Р и с. 175. Поле электрического потенциала, возникающее в плоскости геомагнитного экватора при асимметричной инжекции частиц — носителей кольцевого тока. Средняя энергия частиц 7,6 кэв. Зависимость интенсивности инжекции от долготы по отношению к полуденному меридиану принята равной  $(1 + \cos \lambda)$  для  $-\frac{\pi}{2} < \lambda < \frac{\pi}{2}$ . Предполагается, что вдоль зоны полярных сияний имеется полоса высокой проводимости [90].

## 10. 5. Заключительные замечания

Суммируем вкратце вопросы, рассмотренные в монографии. Для каждого явления, наблюдаемого в верхней атмосфере полярных областей, сначала изучалась картина суточной вариации на различных широтах по типичным суточным записям. Это позволяло в каждом случае понять смысл статистической картины суточных вариаций, которая в свою очередь давала возможность выявить в координатах гм. широта — время, как меняются характеристики активных особенностей каждого явления. При этом отмечалось, что суточная вариация не является следствием вращения Земли под фиксированной в пространстве относительно линии Солнце — Земля картиной

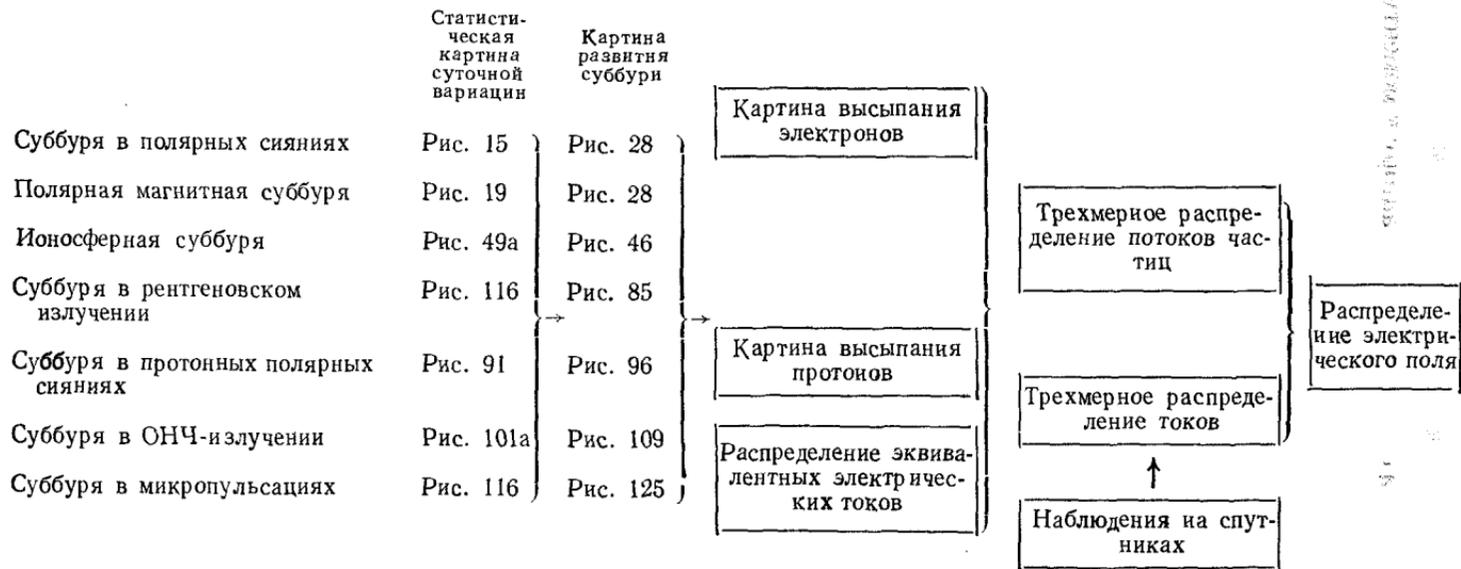


Р и с . 176. Распределение ионосферной составляющей тока, обусловленного представленным на рис. 175 полем потенциала. Стрелки показывают направление тока. Сила тока в амперах на 1 км обозначена различным количеством штрихов на конце стрелки [90].

Правильнее сказать, что такая картина появляется несколько раз в сутки со временем жизни порядка 1—3 час (при достаточной активности Солнца).

За время жизни суббури ситуация заметно меняется. Поэтому были построены картины развития суббури для каждого явления, причем в качестве опорной была использована наиболее изученная к настоящему времени картина развития суббури в полярных сияниях (или полярной магнитной суббури).

Если причина каждой суббури известна (высыпание энергичных частиц, возникновение электрического поля), то картина ее развития позволяет понять, как меняется высыпание частиц во всей полярной шапке во время суббури. Попытка построить такую картину была предпринята в разд. 10.2.



С. В. КОЗЛОВ, А. В. КУЗНЕЦОВ

В гл. 9 была дана сводка известных автору к моменту завершения книги спутниковых данных о частицах и магнитных полях во время магнитосферных суббурь.

На основе этих спутниковых наблюдений *in situ* и на основе картины высыпания частиц в полярной области была предпринята попытка построить трехмерное распределение потоков электронов в три различных момента развития магнитосферной суббури (разд. 10.3). В целом последовательность этапов нашего исследования представлена на схеме (стр. 305).

В разд. 10.2 был сделан вывод, что магнитосферная суббуря — это процесс внутри магнитосферы. Основанием для такого утверждения является тот факт, что на геоцентрическом расстоянии примерно в  $10R_{\oplus}$  момент начала магнитосферной суббури на 2—3 мин запаздывает по отношению к моменту начала полярной суббури. К тому же это запаздывание увеличивается с ростом геоцентрического расстояния. Поэтому большая часть хвоста магнитосферы вряд ли играет основную роль в развитии магнитосферной суббури; известно, что длина хвоста не меньше  $\sim 1000 R_{\oplus}$ .

Отмечалось, что первым указанием на начало суббури в полярных сияниях ( $T=0$ ) является внезапное уярчение дуги, составляющей обращенную к экватору границу овала полярных сияний. В связи с этим крайне важно определить точную связь этой границы с соответствующей структурой магнитосферы. Поскольку эта граница располагается очень близко к протонному полярному сиянию, важно изучить также их взаимосвязь незадолго до суббури в полярных сияниях и во время нее.

Стоило бы попытаться найти указание на начало полярной суббури до того момента, который в этой монографии определен как начало суббури (т. е. до  $T=0$ ). Недавно Ростокер [76] привел сведения, позволяющие предположить, что полярная магнитная суббуря развивается в два этапа. Во многих случаях основной отрицательной бухте предшествует небольшое отклонение (триггерная бухта), длительность которого часто менее 20 мин. Обе бухты — триггерная и основная — связаны с микропульсациями  $P_2$  (см. гл. 8).

В разд. 10.2 было высказано предположение, что основную роль в развитии магнитосферной суббури играет асимметричный рост кольцевого тока. Поэтому изучение механизма формирования асимметричного кольцевого тока может сыграть важную роль в понимании магнитосферной суббури. Одна из наиболее важных особенностей асимметричного кольцевого тока — его появление в секторе, освещенном Солнцем.

Целесообразно отметить значительное феноменологическое сходство между суббурями и солнечными вспышками. Вспышки связаны с сильными электрическими токами [62] и ускорением энергичных частиц в нижней короне или в верхней хромосфере. Некоторые из

ускоренных при этом энергичных электронов инжектируются вниз в более плотные слои солнечной атмосферы, порождая тормозное рентгеновское излучение, а также ионизируя и возбуждая газ хромосферы. Поскольку основная составляющая хромосферы — водород, основным видимым излучением является эмиссия в линии  $H\alpha$ . Сильное излучение в линии  $H\alpha$  появляется в узких областях хромосферы. Для большинства вспышек характерно взрывное увеличение интенсивности излучения в линии  $H\alpha$  (с постоянной времени порядка  $10^3$  сек) и медленный спад ( $\sim 1$  час).

Магнитосферная суббуря также связана с внезапным ростом интенсивности электрических токов (кольцевой ток и авроральная электроструя) и генерацией энергичных частиц. Некоторые энергичные частицы инжектируются в верхнюю атмосферу полярных областей, порождая тормозное рентгеновское излучение и различные виды атмосферного излучения (от  $N_2^+$ , O и т. д.), наблюдающиеся вдоль узких полос (полярные сияния).

Внимание ученых привлекло существование критического значения силы тока при разряде в трубках с малым давлением [7, 50]. Если сила тока превышает это критическое значение, то магнитная энергия  $\epsilon_m$  контура, в котором происходит разряд ( $\epsilon_m = LJ^2/2$ , где  $L$  — индуктивность контура, а  $J$  — полная сила тока), может бурно диссипировать. В обычных условиях при наличии градиента концентрации плазмы вдоль магнитной силовой трубки, по которой течет ток, плазма стремится вести себя так, чтобы сила тока через любое поперечное сечение трубки была постоянной.

Однако если плотность тока превосходит критическое значение, равное  $en \sqrt{kT_e/m_e}$ , то плазма перемещается в область более высокой плотности тока, приводя, таким образом, к разрыву контура тока. Перепад напряжения в таком промежутке может достигнуть значения  $V = L(dJ/dt)$ . Тогда накопленная в контуре магнитная энергия  $\epsilon_m$  выделяется в области разрыва, приводя к ускорению ионов и электронов до энергий порядка  $V$  эв.

Система электрических токов, ассоциируемая с магнитосферной суббурей, состоит из асимметричного кольцевого тока в дневном и вечернем секторах, тока вдоль магнитных силовых линий от утреннего конца кольцевого тока к ионосфере северного и южного полушарий, тока в ионосфере вдоль овала полярных сияний в неосвещенном секторе (авроральная электроструя в каждом полушарии) и тока вдоль магнитных силовых линий от западных концов авроральных электроструй к кольцевому току (см. рис. 160).

Как показал автор [1], магнитная энергия индуктивного контура кольцевого тока

$$\epsilon_m = \frac{LJ^2}{2} = 0,5 \times (1,01 \cdot 10^9 \text{ эВ}) \times (2 \cdot 10^6 \text{ а})^2 = 2,02 \cdot 10^{14} \text{ Дж} = 2,02 \cdot 10^{21} \text{ эрг}$$

и может диссипировать за время порядка

$$\tau = \frac{L}{R} = 1,01 \cdot 10^2 \text{ гн} / 0,05 \text{ ом} = 2,02 \cdot 10^3 \text{ сек} \approx 34 \text{ мин.}$$

Здесь индуктивность контура  $L$  принята равной  $1,01 \cdot 10^2 \text{ гн}$ . Основной вклад в сопротивление контура вносит ионосфера. Сопротивление ионосферы северного полушария можно оценить как

$$R_N = \frac{V}{J_N} = \frac{10^6 \text{ в}}{10^6 \text{ а}} = 0,1 \text{ ом.}$$

Неустойчивый разряд появляется только тогда, когда толщина токового слоя в меридиональном направлении становится порядка 1,2 км или меньше (это толщина полярного сияния). В слое протоны и электроны могут быть ускорены до энергий, соответствующих напряжению

$$V = L \frac{d}{dt} \left( \frac{J}{2} \right) = \frac{LJ}{2\tau} = 1,01 \cdot 10^2 \text{ гн} \times \frac{10^6 \text{ а}}{2,02 \cdot 10^3 \text{ сек}} = 50 \text{ кВ};$$

поток может достигать  $3,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ . В вечернем секторе электроны ускоряются вниз, протоны — вверх, а в утреннем — наоборот. Эта картина может послужить основой для объяснения восточно-западной асимметрии магнитосферной суббури, хотя последующие процессы меняют основную картину. Так, например, ускоренные электроны в экваториальной области в утреннем секторе могут высыпаться вследствие различных типов неустойчивости. Действительно, высыпание электронов в утреннем секторе подвержено значительным флуктуациям во времени и пространстве. В экваториальной плоскости плотность энергии ускоренных частиц могла бы значительно превышать локальную плотность магнитной энергии  $B^2/8\pi = 9 \cdot 10^{-8} \text{ эрг/см}^3$ . Поэтому можно ожидать крупномасштабного движения магнитосферной плазмы от Земли. Проявлениями такого динамического эффекта являются, по-видимому, движение активных форм сияний к полюсу и движение плазмы от Земли в области хвоста.

Как следует из приведенной схемы, наша цель состоит в определении электрических полей в магнитосфере, ответственных за магнитосферную суббурю, и в определении причин появления таких полей. На основе обзора теорий магнитосферных суббурь (см. разд. 10.4) можно сказать, что имеются два объяснения причин появления электрических полей, связанных с магнитосферными суббурами.

1. Электрическое поле связано с конвективным движением плазмы в скрещенных полях в магнитосфере (см. п. 5, 6 и 9 разд. 10.4.2), хотя большинство теорий, относящихся к этой категории, не обязательно четко выявляет причины появления электрического поля (см. [6, 54]).

2. Основную роль в развитии магнитосферной суббури играет асимметричный рост кольцевого тока и соответствующее электричес-

кое поле (см. п. 10 разд. 10.4.2). Разряд от кольцевого тока имеет форму тонкого токового листа, расположенного вдоль поверхности, образуемой вращением магнитной силовой линии вокруг оси диполя. Ток в этом листе направлен от утреннего конца кольцевого тока в ионосферу и от ионосферы к вечернему концу кольцевого тока. Авроральные электроструи (по одной в каждом полушарии) составляют ионосферную часть контура разряда.

Эти два возможных объяснения природы электрического поля, вызывающего магнитосферную суббурю, существенно расходятся в интерпретации ряда явлений, связываемых с магнитосферной суббурей. Так, в конвективной модели кольцевой ток представляет собой просто «побочный продукт» конвекции, тогда как в модели с асимметричным кольцевым током он является определяющим в процессах магнитосферной суббури. Обе модели сталкиваются с непреодолимым пока препятствием, так как не в состоянии объяснить способ введения энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли.

Объяснение магнитосферной суббури представляет собой трудную, но интересную задачу. Именно магнитосферная суббуря порождает множество явлений в верхней атмосфере полярных областей. Одно из таких явлений — суббуря в полярных сияниях — самое загадочное и прекрасное явление природы в полярном небе.

#### ЛИТЕРАТУРА

##### *Общая*

Hess W. N., The radiation belt and magnetosphere, Blaisdell Publ. Co., Waltham, Mass., 1968.

##### *Цитированная в тексте*

1. Akasofu S.-I., Magnetospheric substorm as a discharge process, 1968 (готовится к печати).
2. Akasofu S.-I., Chapman S., A neutral line discharge theory of the auroral polaris, Phil. Trans. Roy. Soc., **253**, 359—406 (1961).
3. Akasofu S.-I., Meng C.-I., J. Geophys. Res., **74** (в печати), 1969.
4. Alfven H., Cosmical electrodynamics. Clarendon Press Oxford, England, 1950. (Русский перевод 2-го изд.: Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар, Космическая электродинамика, 2-е изд., изд-во «Мир», М., 1967.)
5. Alfven H., On the electric field theory of magnetic storms and aurorae, Tellus, **7**, 50—64 (1955).
6. Alfven H., Some properties of magnetospheric neutral surfaces, J. Geophys. Res., **73**, 4379—4381 (1968).
7. Alfven H., Carlqvist P., Currents in the solar atmosphere and a theory of solar flares, Solar Phys., **1**, 220—228 (1967).
8. Atkinson G., A theory of polar substorms, J. Geophys. Res., **71**, 5157—5164 (1966).
9. Atkinson G., Polar magnetic substorms, J. Geophys. Res., **72**, 1491—1494 (1967).
- 10.xford W. I., The interaction between the solar wind and the earth's magnetosphere, J. Geophys. Res., **67**, 3791—3796 (1962).

11. A x f o r d W. I., Viscous interaction between the solar wind and the earth's magnetosphere, *Planet. Space Sci.*, **12**, 45—54 (1964).
12. A x f o r d W. I., Magnetic storm effects associated with the tail of the magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, 149—157, (1967).
13. A x f o r d W. I., The interaction between the solar wind and the magnetosphere, *Aurora and Airglow*, ed. B. M. McCormac, Reinhold Publ. Co., New York, 1967, p. 499—509.
14. A x f o r d W. I., H i n e s C. O., A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms, *Canadian J. Phys.*, **39**, 1433—1464 (1961).
15. A x f o r d W. I., P e t s c h e k H. E., S i s c o e G. L., Tail of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **70**, 1231—1236 (1965).
16. B i r k e l a n d K., The Norwegian aurora polaris expedition 1902—1903, Vol. 1, Section 2, H. Aschehoug Co., Christiania, 1913.
17. B l o c k L. P., On the distribution of electric fields in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **71**, 858—864 (1966).
18. B o d i n H. A. B., Observations of resistive instabilities in a Theta pinch, *Nuclear Fusion*, **3**, 215—217 (1963).
19. B o s t r ö m R., Desirable magnetic-field measurements in the high-latitude magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, **7**, 191—197 (1967).
20. B o s t r ö m R., Auroral electric fields, *Aurora and airglow*, ed. B. M. McCormac, Reinhold Publ. Co., New York, 1967, p. 293—303.
21. B r i c e N. M., Bulk motion of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5193—5211 (1967).
22. C a h i l l L. J., Inflation of the inner magnetosphere during a magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **71**, 4505—4519 (1966).
23. C a r p e n t e r D. L., Whistler studies of the plasmopause in the magnetosphere, 1. Temporal variations in the position of the knee and some evidence on plasma motions near the knee, *J. Geophys. Res.*, **71**, 693—709 (1966).
24. C h a m b e r l a i n J. W., Theory of auroral bombardment, *Astrophys. J.*, **134**, 401—424 (1961).
25. C h a p m a n S., B a r t e l s J., *Geomagnetism*, The Clarendon Press, London, 1940.
26. C h a p m a n S., F e r r a r o V. C. A., A new theory of magnetic storms Part II. The main phase, *Terrest. Magn. Atmospheric Electr.*, **38**, 79—96 (1933).
27. C o l e K. D., A dynamo theory of the aurora and magnetic disturbance, *Austral. J. Phys.*, **13**, 484—497 (1960).
28. C o l e K. D., Damping of magnetospheric motions by the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **68**, 3231—3235 (1963).
29. C o p p i B., L a v a l G., P e l l a t R., A model for the influence of the earth magnetic tail on geomagnetic phenomena, Intern. Center for Theor. Phys. Publ. (1965).
30. D e s s l e r A. J., P a r k e r E. N., Hydromagnetic theory of geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **64**, 2239—2252 (1959).
31. D u n g e y J. W., *Cosmic electrodynamics*, Cambridge Univ. Press, England, 1958. (Русский перевод: Дж. Данжи, Космическая электродинамика, М., Атомиздат, 1961.)
32. D u n g e y J. W., Interplanetary magnetic field and the auroral zones, *Phys. Rev. Letters*, **6**, 47—48 (1961).
33. D u n g e y J. W., The structure of the exosphere or adventures in velocity space, *Geophysics, the earth's environment*, eds. C. DeWitt, J. Hieblot, A. Lebeau, Gordon and Breach, New York, 1963, p. 503—550. (Русский перевод: Геофизика, Околосземное космическое пространство, изд-во «Мир», М., 1964.)
34. D u n g e y J. W., The reconnection model of the magnetosphere, *Earth's particles and fields* ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York, 1968, p. 385—392.

35. Eberhagen A., Glaser H., Studies on macroinstabilities in a Theta pinch with antiparallel magnetic field, *Nuclear Fusion*, **4**, 296—299 (1964).
36. Fejer J. A., The effects of energetic trapped particles on magnetospheric motions and ionospheric currents, *Canadian J. Phys.*, **39**, 1409—1417 (1961).
37. Fejer J. A., Theory of auroral electrojets, *J. Geophys. Res.*, **68**, 2147—2157 (1963).
38. Fejer J. A., Theory of the geomagnetic daily disturbance variations, *J. Geophys. Res.*, **69**, 123—137 (1964).
39. Frank L. A., On the extraterrestrial ring current during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3753—3767 (1967).
40. Fukushima N., Oguti T., Polar magnetic storms and geomagnetic bays, Appendix I. A theory of  $S_D$ -field. Rep. Ionosph. Space Res. Japan, **7**, 137—146 (1953).
41. Furth H. P., Prevalent instability of nonthermal plasmas, *Phys. Fluids*, **6**, 48—57 (1963); Instabilities due to finite resistivity of finite current-carrier mass, *Advanced plasma theory*, Proc. Intern. School of Phys. Course XXV, Acad. Press, 1964.
42. Furth H. P., Killeen J., Rosenbluth M. N., Finite-resistivity instabilities of a sheet pinch, *Phys. Fluids*, **6**, 459—484 (1963).
43. Gold T., Plasma and magnetic fields in the solar system, *J. Geophys. Res.*, **64**, 1665—1674 (1959).
44. Haerendel G., Lüst R., Electric fields in the upper atmosphere, Earth's particles and fields, eds. B. M. McCormac, Reinhold Book Co., New York, 1968, pp. 271—285.
45. Hargreaves J. K., Hones E. W., Jr., Singer S., Relations between bursts of energetic electrons at 17 earth — radii in the magnetotail and radio absorption events in the ionospheric D—region, *Planet. Space Sci.*, **16**, 567—580 (1968).
46. Harris E. G., On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field, *Nuovo Cimento*, **23**, 115—121 (1962).
47. Hartz T. R., Brice N. M., The general pattern of auroral particle precipitation, *Planet. Space Sci.*, **15**, 301—329 (1967).
48. Hines C. O., Hydromagnetic motions in the magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, **3**, 342—379 (1964).
49. Hulburt E. O., Terrestrial magnetic variations and aurorae, *Rev. Mod. Phys.*, **9**, 44—68 (1937).
50. Jacobsen C., Carlqvist P., Solar flares caused by circuit interruptions, *Icarus*, **3**, 270—272 (1964).
51. Johnson J. L., Greene J. M., Copp B., Effect of resistivity on hydromagnetic instabilities in multipolar systems, *Phys. Fluids*, **6**, 1169—1183 (1963).
52. Karlson E. T., Motion of charges particles in an inhomogeneous magnetic field, *Phys. Fluids*, **5**, 476—486 (1962).
53. Karlson E. T., Streaming of a plasma through a magnetic dipole field, *Phys. Fluids*, **6**, 708—722 (1963).
54. Kavanagh L. D., Jr., Freeman J. W., Jr., Chen A. J., Plasma flow in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5511—5519 (1968).
55. Kern J. W., A charge separation mechanism for the production of polar auroras and electrojets, *J. Geophys. Res.*, **67**, 2649—2665 (1962).
56. Kern J. W., Vestine E. H., Theory of auroral morphology, *J. Geophys. Res.*, **66**, 713—723 (1961).
57. Laval G., Pellat R., Méthode d'étude de la stabilité de certaines solutions de l'équation de Vlasov, *Comp. Rend.*, **259**, 1706—1709 (1964).
58. Levy R. H., Petschek H. E., Siscoe G. L., Aerodynamic aspects of the magnetospheric flow, *AIAA Journal*, **2**, 2065—2076 (1964).
59. Maeda H., Wind systems for the geomagnetic  $S_D$  field, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **9**, 119—121 (1957).

60. Maris H. B., Hulburt E. O., A theory of auroras and magnetic storms, *Phys. Rev.*, **33**, 412—431 (1929).
61. Martyn D. F., The theory of magnetic storms and auroras, *Nature*, **167**, 92—94 (1951).
62. Moreton G. E., Северный А. В., Magnetic fields and flares in the CMP, 20 September 1963, *Solar Phys.*, **3**, 715—719 (1968).
63. Murty G. S., Instability of a conducting field slab carrying uniform current in the presence of a homogeneous magnetic field, *Arkiv Fysik*, **19**, 499—510 (1961).
64. Nagata T., Kokubun S., Polar magnetic storms, with special reference to relation between geomagnetic disturbances in the northern and southern auroral zones, *Rep. Ionosph. Space Res. Japan*, **14**, 273—290 (1960).
65. Nishida A., Formation of plasmopause, or magnetospheric plasma knee, by the combined action of magnetospheric convection and plasma escape from the tail, *J. Geophys. Res.*, **71**, 5669—5679 (1966).
66. Obayashi T., Jacobs J. A., Sudden commencements of magnetic storms and atmospheric dynamo action, *J. Geophys. Res.*, **62**, 589—616 (1957).
67. Parker E. N., Sweet's mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids, *J. Geophys. Res.*, **62**, 509—520 (1957).
68. Parker E. N., Dynamics of the geomagnetic storm, *Space Sci. Rev.*, **1**, 62—99 (1962).
69. Petschek H. E., Magnetic field annihilation, AAS—NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, ed. W. N. Ness, NASA SP-50, 1964, p. 425—439.
70. Piddington J. H., Geomagnetic storm theory, *J. Geophys. Res.*, **65**, 93—106 (1960).
71. Piddington J. H., A hydromagnetic theory of geomagnetic storms, *Geophys. J.*, **7**, 183—193 (1962).
72. Piddington J. H., A hydromagnetic theory of geomagnetic storms and auroras, *Planet. Space Sci.*, **9**, 947—957 (1962).
73. Piddington J. H., Connexions between geomagnetic and auroral activity and trapped ions, *Planet. Space Sci.*, **11**, 451—462 (1963).
74. Piddington J. H., A theory of auroras and the ring current, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 87—105 (1967).
75. Piddington J. H., The growth and decay of the geomagnetic tail, *Earth's particles and fields*, ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York 1968, p. 417—427.
76. Rostoker G., Macrostructure of geomagnetic bays, *J. Geophys. Res.*, **73**, 4217—4229 (1968).
77. Shaw J. E., Outline of a theory of magnetic separation of auroral particles and the origin of the  $S_D$  field, *Planet. Space Sci.*, **2**, 49—55 (1959).
78. Speiser T. W., Particle trajectories in model current sheets, 1. Analytical solutions, *J. Geophys. Res.*, **70**, 4219—4226 (1965).
79. Speiser T. W., Plasma density and acceleration in the tail from the reconnection model, *Earth's particles and fields*, ed. B. M. McCormac, Reinhold, New York 1967, p. 393—402.
80. Speiser T. W., Particle trajectories in model current sheets, 2. Applications to auroras using a geomagnetic tail model, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3919—3932 (1967).
81. Speiser T. W., On the uncoupling of parallel and perpendicular particle motion in a neutral sheet, *J. Geophys. Res.*, **73**, 1112—1113 (1968).
82. Sturrock P. A., Coppi B., A new model of solar flares, *Astrophys. J.*, **143**, 3—22 (1966).
83. Sweet P. A., The neutral point theory of solar flares, I.A.U. Symposium № 6, Stockholm, 1956, ed. B. Lennert, Cambridge Univ. Press, 1956, p. 123—234.
84. Sweet P. A., Instability problems in the origin of solar flares, AAS—NASA Symposium on the physics of solar flares, ed. W. N. Hess, NASA-SP-50, 1963, p. 409—413.

85. Swift D. W., The generation and effect of electrostatic fields during an auroral disturbance, *J. Geophys. Res.*, **68**, 2131—2140 (1963).
86. Swift D. W., The connection between the ring current belt and the auroral substorm, *Planet. Space Sci.*, **12**, 945—960 (1964).
87. Swift D. W., A mechanism for energizing electrons in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3061—3073 (1965).
88. Swift D. W., Possible consequences of the asymmetric development of the ring current belt, *Planet. Space Sci.*, **15**, 835—862 (1967).
89. Swift D. W., The possible relationship between the auroral breakup and the interchange instability of the ring current, *Planet. Space Sci.*, **15**, 1225—1237 (1967).
90. Swift D. W., Further possible consequences of the asymmetric development of the ring current belt — effect of variations in ionospheric conductivity, *Planet. Space Sci.*, **16**, 329—342 (1968).
91. Taylor H. E., Hones E. W., Jr., Adiabatic motion of auroral particles in a model of the electric and magnetic fields surrounding the earth, *J. Geophys. Res.*, **70**, 3605—3628 (1965).
92. Vasyliunas V. M., A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with OGO—1 and OGO—3, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2839—2884 (1968).
93. Walbridge E., The limiting of magnetospheric convection by dissipation in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5213—5230 (1967).

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Akasofu S.-I., *Magnetospheric substorms, Atmospheric Emissions*, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969.
- Akasofu S.-I., *Auroral substorm and magnetospheric substorm*, *Space Res.*, **8**, 213—242, 1968, eds. A. P. Mitra, L. C. Jacchia, W. S. Newman, North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- Akasofu S.-I., *Magnetosphere and magnetospheric substorm*, *Birkeland Symposium on Aurora and Magnetic Storms*, Sandefjord, Norway, Sept. 1967, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1968, p. 33—38.
- Alfven H., *The second approach to cosmical electrodynamics*, *Birkeland Symposium on Aurora and Magnetic Storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 439—444.
- Axford W. I., *Magnetospheric convection*, *Rev. Geophys.*, **7**, 421—459 (1969).
- Davis T. N., Parthasarathy R., *The relationship between polar magnetic activity DP and growth of the geomagnetic ring current*, *J. Geophys. Res.*, **72**, 5825—5836 (1967).
- Dessler A. J., *Solar wind interactions*, *Birkeland Symposium on Aurora and magnetic storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 423—430.
- Dessler A. J., *Solar wind interactions and the magnetosphere*, *Physics of the Magnetosphere*, eds. R. L. Carovillano, J. F. McClay, and R. Radoski, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht — Holland, 1968, p. 65—105.
- Dungey J. W., *Magnetohydrodynamics in the magnetosphere*, *Birkeland Symposium on Aurora and Magnetic Storms*, eds. A. Egeland, J. Holtet, 1967, p. 431—438.
- Dungey J. W., *Polar substorms — Theoretical reviews*, *Space Res.*, **8**, 243—252, 1968, Ed. by A. P. Mitra, L. C. Jacchia and W. S. Newman, North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- Фельдштейн Я. И., *Polar auroras, polar substorms, and their relationships with the dynamics of the magnetosphere*, *Rev. Geophys.*, **7**, 179—218 (1969).
- Фельдштейн Я. И., Старков Г. В., *The auroral oval and the boundary of closed field lines of geomagnetic field*, *Planet. Space Sci.* (в печати), 1969.

- Фельдштейн Я. И., Шевнин А. Д., Старков Г. В., Auroral oval and magnetic field in the tail of the magnetosphere, Birkeland Symposium on Aurora and Magnetic Storms, Sandefjord, Norway, Sept. 1967, eds. A. Ege-land, and J. Holtet. p. 43—45.
- Наугвиз М. В., Auroral substorm activity in relation on storm sudden commencements ring current effects and energetic solar protons, *J. Geophys. Res.* **74**, 2348—2355 (1969).
- Нерпнер J. P., Magnetospheric convection patterns inferred from high latitude activity, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 251—266.
- Грушка А. Two—dimensional model of the neutral sheet in the earth's magnetotail, *Planet. Space Sci.*, **17**, 665—673 (1969).
- Нултквист В., Auroras and polar substorms: Observations and theory, *Rev. Geophys.*, **7**, 129—177 (1969).
- Кендалл P. C., Виндл D. W., Акасофу S.-I., Чарман S., A model midnight meridian magnetospheric field, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **17**, 185—194 (1969).
- Иванов К. Г., Микерина Н. В., Геомагнитная буря 12.IV.64 г. на поверхности Земли и в хвосте магнитосферы. Неустойчивость нейтрального слоя, Геомагнетизм и аэрономия, **7**, № 6, 1036—1040 (1967).
- Красовский В. И., Aurorae, *Planet. Space Sci.*, **16**, 47—59 (1968).
- Красовский В. И., The upper atmosphere as a regulator of geomagnetic storms, substorms and auroras, *Ann. de Geophys.*, **24**, 1053—1067 (1968).
- Мишин В. М., Попов Г. В., Основные зоны магнитной активности, электроджеты и строение магнитосферы, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАГА, Мадрид, сентябрь 1969 г.
- Мишин В. М., Базаржанов А. Д., Мишина Н. А., Попов Г. В., Сильное влияние главного геомагнитного поля на токи в возмущенной магнитосфере, Доклад на XIV Генеральной Ассамблее МАГА, Мадрид, сентябрь 1969.
- Пудовкин М. И., Шумилов П. И., Зайцева С. А., Polar storms and development of the DR-currents, *Planet. Space Sci.*, **16**, 891—898 (1968).
- Schild M. A., The configuration of geomagnetic field lines above the auroral zones, *Rice Univ. Rep.*, May 1968.
- Шабанский В. П., Magnetospheric processes and related geophysical phenomena, *Space Sci. Rev.*, **8**, 366—454 (1968).
- Шевнин А. Д., Фельдштейн Я. И., Старков Г. В., Овал полярных сияний и кольцевой ток в магнитосфере Земли, Космические исследования, **6**, № 4, 598—603 (1968).
- Скуридин Г. А., Плетнев В. Д., Жулин И. А., Some aspects of auroral substorms in connection with the problem of particle injection into the earth's magnetosphere (Theoretical treatment), *Space Res.*, **8**, 253—265, 1968, eds. A. P. Mitra, L. G. Jacchia and W. S. Newman, North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- Speiser T. W., Some recent results using the Dungey model, Atmospheric Emissions, eds. B. M. McCormac, A. Omholt, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1969, p. 337—349.
- Unti T., Atkinson G., Two-dimensional Chapman—Ferraro problem with neutral sheet. I. The boundary, *J. Geophys. Res.*, **73**, 7319—7327 (1968).
- Ерошенко Е. Г., К топологии высокоширотной ночной магнитосферы, Геомагнетизм и аэрономия, **8**, № 2, 201—207 (1968).

1981.08.28  
 1981.08.28  
 1981.08.28

1981.08.28  
 1981.08.28  
 1981.08.28

**ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ**

Авроральная электроструя (см. полярная электроструя)

Блэкаут 29, 31, 32, 127

Водородная эмиссия 18, 29, 32, 58, 163, 165—167, 168, 169—175

Выпуклость в полярном сиянии 48, 59, 94, 112, 126, 152, 187, 191, 194, 215, 223, 278, 281, 297

Высыпание электронов 21, 32, 97, 121, 134, 145, 159, 175, 204, 223, 252, 269, 278, 293

Геомагнитная буря 22, 37, 38, 128, 149  
 — — главная фаза 22, 56, 90  
 — — начальная фаза 22, 56

Геомагнитносопряженные области 70, 95, 125, 137, 159, 285

Движущийся к востоку изгиб 68, 159  
 — — западу изгиб 45, 46, 48, 52, 66, 67, 113, 126, 152, 175, 187—189, 192, 221, 223

Зона полярных сияний 18, 20, 24, 25, 29, 32, 50, 54, 56, 90, 93, 124, 127, 137, 159, 184, 202, 221, 285

Индекс AE 220, 258

Инфразвуковая волна 20, 21, 135—137

Кольцевой ток 22, 35, 37, 168, 176, 274, 278, 282, 290, 301, 306

Конвекция магнитосферной плазмы 286—289

Магнитная бухта отрицательная 38, 54, 56, 67, 87, 90, 96, 97, 121, 124, 125, 147, 183, 203, 207, 212, 223, 224, 267, 281, 306  
 — — положительная 56, 66, 67, 89, 90, 96, 97, 120, 121, 188, 203, 207, 209, 214, 221, 223, 224

Магнитосферная буря 18, 19, 22—23

Микровсплески 148, 149, 158, 160, 161, 191, 204, 213

Микропульсации, жемчужины 197, 204  
 — КУП (*IPDP*) 198, 204, 208, 214  
 — нерегулярные 197, 202, 214, 267  
 — устойчивые 197, 200, 214, 267  
 — *IPDP* (см. КУП)  
 — *SIP* 198, 207

Неустойчивость Фарли 134

Овал полярных сияний 5, 18, 19, 24—34, 36—38, 43, 45, 46, 58, 67, 82, 93, 120, 127, 131, 160, 185, 192, 194, 252

ОНЧ-излучение 179, 208, 267, 300

Плазмопауза 35, 36, 287

Поглощение в полярной шапке 28  
 — космического радиоизлучения 103, 145, 149, 170, 182, 190, 206, 214, 229, 236  
 — — — типа E 103, 107, 113—121, 153  
 — — — — M 104, 107, 121—125, 147, 183, 215, 223, 252  
 — — — — N 103, 107, 109—113, 120, 121, 125, 146, 155, 206, 223  
 — медленно меняющееся 104, 267

Полярная электроструя 19, 73, 83, 85, 87, 96, 124, 134, 147, 152, 155, 281, 284, 307, 309

- Полярные сияния 18, 29, 36, 42—48,  
124, 131, 183, 224, 267  
— — водородные (см. протонные)  
— — протонные 18, 34, 36, 163,  
166, 169, 255, 279  
— — с красным нижним краем (ти-  
па В) 114, 126, 152, 153, 160  
— — типа мантии 70, 267  
Проводимость Каулинга 94, 276, 285,  
— Педерсена 275  
— Холла 275  
Протонный пояс (см также кольцевой  
ток) 19, 23, 35, 274, 279, 282  
Протоны 19, 20, 22, 23, 28, 165, 170,  
209, 222, 246, 249, 255, 272, 308
- Радиосияния 101, 132—134
- Спираль Штёрмера 58  
Спиральный анализ 56—58, 74  
Среднеширотный желоб 35, 36  
Суббурия в атмосферной волне 20, 21,  
134  
— — микропульсациях 21, 179—215  
— — ОНЧ-излучении 20, 21, 179—  
194  
— — полярном сиянии 13, 19, 21,  
29, 42—70, 147, 165, 278, 279, 299  
— — протонном полярном сиянии 20,  
21, 162—176  
— — рентгеновском излучении 20,  
21, 101, 144—161  
— — ионосферная 20, 21, 101—137, 183  
— — магнитосферная 6, 13, 19, 20, 21,  
22—23, 35, 133, 146, 165, 197  
— — полярная 21, 124, 128, 133, 137,  
155, 179, 206, 235, 246, 266—277  
— — магнитная 11, 13, 19, 21, 38,  
73, 128, 247, 256, 306  
Субвизуальная среднеширотная крас-  
ная дуга 36
- Теория динамо 284  
Ток Каулинга 94
- Педерсена 275  
— Холла 94, 282, 285, 286  
Трехмерная токовая система 53, 89—95,  
273
- Ударная волна 19, 22, 137, 271
- Хоры 20, 161, 179, 183, 185, 194, 267
- Цикл развития полярных сияний 43,  
44
- Шипения 20, 179, 184, 185, 189, 192,  
267
- Эквивалентная токовая система 53,  
73, 89  
Электроны 24, 97, 101, 113, 128, 133,  
144, 221, 222, 229—231, 235, 242—  
246, 249, 252—255, 267, 269—272,  
277, 293, 308
- $D_i$ -вариация 54  
 $DS$ -вариация 53, 54  
 $D_{st}$ -вариация 38  
 $DS$ -компонента 53
- М-спираль 29, 30, 32, 33, 34, 58, 132
- N-спираль 29, 32, 34, 132
- $SD$ -анализ 53—57  
 $SD$ -вариация 11, 53, 56, 90  
 $SD$ -токовая система 54, 56, 73,  
133, 256, 286

## О Г Л А В Л Е Н И Е

<i>Предисловие редакторов перевода</i> . . . . .	5
<i>Предисловие к русскому изданию</i> . . . . .	9
<i>Предисловие</i> . . . . .	13
<i>Список часто используемых обозначений</i> . . . . .	15
<b>Глава 1. Введение</b> . . . . .	17
<b>Глава 2. Суббуря в полярных сияниях и связанные с ней магнитные возмущения</b> . . . . .	42
<b>Глава 3. Полярная магнитная суббуря</b> . . . . .	73
<b>Глава 4. Ионосферная суббуря</b> . . . . .	101
<b>Глава 5. Суббуря в рентгеновском излучении</b> . . . . .	144
<b>Глава 6. Суббуря в протонном полярном сиянии</b> . . . . .	163
<b>Глава 7. Суббуря в ОНЧ-излучении</b> . . . . .	179
<b>Глава 8. Суббуря в геомагнитных микропульсациях</b> . . . . .	197
<b>Глава 9. Наблюдения на спутниках во время полярных суббурь</b> . . . . .	219
<b>Глава 10. Магнитосферная суббуря</b> . . . . .	266
<i>Предметный указатель</i> . . . . .	315

С. Акасофу

**ПОЛЯРНЫЕ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ СУББУРИ**

Редактор *М. Рутковская*  
Художник *Г. Мануйлов*  
Художественный редактор *В. Варлашин*  
Технический редактор *А. Резоухова*  
Корректор *А. Рыбальченко*

Сдано в производство 15/V 1970 г.  
Подписано к печати 23/X 1970 г.  
Бумага № 2 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub> = 10 бум. л.  
Усл. печ. л. 20  
Уч.-изд. л. 19,57. Изд. № 27/5548  
Цена 1 р. 96 к. Зак. 821

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Чеховский полиграфкомбинат Главполи-  
графпрома комитета по печати при Совете  
Министров СССР, г. Чехов, Моск. обл.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

*выпускает в 1970 г. книгу*

**Ш. МИШО**

**Планета Юпитер. Физические свойства**

*Перевод с английского*

В небольшой книге, написанной автором по заказу Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США, собраны наиболее важные справочные сведения о Юпитере — крупнейшей планете солнечной системы: размеры, масса, физическое строение и средний химический состав, состав и свойства атмосферы, системы спутников, радиоизлучение, магнитное поле, детали на поверхности, особенности вращения. Книга снабжена библиографией важнейших работ по Юпитеру. Она рассчитана на широкие круги читателей, интересующихся исследованиями планет, в том числе на любителей астрономии.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

*выпускает в 1971 г. книгу*

**ФИЗИКА МАГНИТОСФЕРЫ**

под редакцией Вильямса и Мида

*Перевод с английского*

Магнитосфера — область околоземного космического пространства, на границе которой земное магнитное поле переходит в межпланетное. Магнитосфера служит своеобразным «щитом», прикрывающим Землю от солнечного ветра — потока быстрых частиц от Солнца. Усиление этого ветра во время возмущений на Солнце приводит к сложным и пока мало изученным изменениям магнитосферы, сопровождающимся магнитными бурями, полярными сияниями, нарушениями радиосвязи и т. п.

В предлагаемой коллективной монографии собраны обзорные работы крупнейших специалистов мира, в которых подведены итоги более чем десятилетних исследований магнитосферы при помощи ракет, искусственных спутников и космических кораблей. Большое внимание уделено строению магнитосферы, сопоставлению происходящих в ней процессов и влиянию Солнца на Землю, захвату заряженных частиц геомагнитным полем и образованию радиационных поясов Земли.

Книга представит большой интерес для геофизиков, астрономов, специалистов по физике плазмы, дальней и космической радиосвязи, радиолокации, физике верхней атмосферы.