

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ И ПОЛЯРНЫЕ
СИЯНИЯ ¹⁾)*Е. О. Хальберт, Вашингтон*

Содержание

Введение

А. Метеорология, электричество и магнетизм верхних слоев атмосферы

Метеорология верхних слоев атмосферы. Ионизация высших слоев атмосферы. Области длинных и коротких свободных пробегов. Проводимость. Движение ионов в противодействующих полях, гравитационно-магнитный дрейф. Динамо-эффект. Диамагнетизм.

Б. Солнечные суточные вариации магнитного поля земли.

Данные наблюдений за солнечными суточными вариациями. Теория атмосферной динамо. Диамагнитная теория. Теория токов дрейфа.

В. Лунные вариации магнитного поля земли

Данные наблюдений. Теория атмосферной динамо.

Г. Магнитные бури и полярные сияния

Данные наблюдений за магнитными бурями. Магнитные возмущения, радиосвязь, ионосфера и солнце. Данные наблюдений за полярными сияниями. Корпускулярная теория магнитных бурь. Корпускулярная теория полярных сияний. Теория ультрафиолетового излучения, общие соображения. Теория ультрафиолетового излучения в применении к полярным сияниям. Теория ультрафиолетового излучения в применении к магнитным бурям. Теория „узкого пучка“ и „широкого ненаправленного излучения“ при солнечных извержениях.

Заключение.

Введение

Как показывают наблюдения, магнитное поле земли подвержено медленным и быстрым изменениям, причем первые измеряются в годах, а последние — в днях, часах или минутах. Величина магнитных изменений, рассматриваемая с точки зрения всего земного шара, всегда невелика, ибо она редко превосходит несколько процентов от полного магнитного поля земли. Еще Гаусс, пользуясь гармоническим анализом, показал, что медленные вариации обусловлены особым рода изменениями в земной коре или во вну-

¹⁾ Е. О. Hulburt, Rev. Mod. Phys., 9, No. 1, Jan., 1937. Перевод М. П. Долуханова.

тренних частях земли, тогда как более быстрые изменения возникают под действием влияний, которые, по крайней мере частично, являются внешними по отношению к поверхности земли. Источники этих влияний не могут быть расположены в нижних слоях атмосферы, и если они вовсе не находятся в земном шаре, то их местоположением могут быть только верхние слои атмосферы.

Различают два вида быстрых изменений: периодические и неправильные. Периодические изменения, связанные с солнечными и лунными сутками, известны под названием солнечных и лунных вариаций магнитного поля земли. Неправильные изменения, получившие название магнитных возмущений или бурь, как полагают, связаны, главным образом, с солнечной деятельностью, а именно: с пятнами, факелами и протуберанцами; некоторые из неправильных изменений, возможно, вызываются причинами, не связанными с солнцем, как то: метеорами и другими материальными телами, которые „оседают“ на земле, при ее движении в пространстве.

Несмотря на непрекращающийся интерес к этим вопросам, в начале этого столетия нельзя было отметить сколько-нибудь заметных успехов в деле их изучения. И только несколько лет назад началось новое интенсивное изучение этих вопросов, которое не прекращается и по настоящее время. Этот толчок в большой степени обусловлен, во-первых, открытиями в области электрических и магнитных явлений, старых с точки зрения физики, но новых в приложении к верхним слоям атмосферы; во-вторых, предложением, на первый взгляд новым, но уже частично подтвержденным экспериментами, согласно которому магнитные бури и полярные сияния обусловлены вспышками ультрафиолетового излучения на солнце; и, в-третьих, недавно начавшимися экспериментальными исследованиями ионосферы с помощью радиоволн.

Нижеследующие параграфы представляют собой сводку наиболее важных фактов из области магнитных вариаций и изложение некоторых теорий, которые были выдвинуты для их объяснения. Вследствие того, что полярные сияния и магнитные возмущения между собой тесно связаны, ниже обсуждаются также факты и теории из области полярных сияний. По тем же причинам, казалось, следовало бы затронуть вопросы о свете ночного неба, о зодиакальном свете и о солнечной короне; это, однако, в настоящей статье не сделано, и тем самым представлена возможность желающим продолжить линию исследования.

Все теории вариаций магнитного поля исходят из предположения, что магнитные изменения обусловлены особым воздействием электрических зарядов и отличаются одна от другой в выборе механизма этого воздействия и в местоположении зарядов.

Известны три рода воздействия: динамо-эффект, диамагнетизм и гравитационно-магнитные токи дрейфа. Наиболее важные теории оперируют с заряженными частицами, находящимися в верхних слоях атмосферы. Другие теории, большей частью вновь выдвигают

нутые или уже отвергнутые, помещают заряженные частицы на расстоянии нескольких земных радиусов от земного шара; такие частицы, строго говоря, уже находятся за пределами верхних слоев атмосферы.

А. Метеорология, электричество и магнетизм верхних слоев атмосферы

Метеорология верхних слоев атмосферы

Вычисления Мэриса ¹ скорости диффузии газов, входящих в состав атмосферы, показали, что вследствие воздушных течений атмосфера равномерно перемешана вплоть до высоты 150 км. Следовательно, за исключением водяных паров и озона, газовый состав земной атмосферы до высоты около 150 км такой же, как и на уровне моря. Отклонения и неправильности наблюдаемых траекторий метеоров ² дают прямые указания о ветрах и течениях воздуха на высотах до 110 км. Выше 150 км можно предположить состояние равновесия газов в поле тяготения земли, при котором содержание легких газов с высотой увеличивается. Наблюдения, сделанные во время последних полетов стратостатов ^{2а}, подтверждают правильность результатов, полученных при вычислении диффузии. Взятые на разных высотах пробы воздуха позволили определить количество кислорода на высотах до 29 км, гелия—до 21 км и азота—до 21,5 км. При этом было обнаружено, что объемное содержание соответствующих газов на разных высотах не отличается больше чем на несколько процентов от содержания на земле. Наблюдались лишь небольшие и неправильные отклонения от постоянного состава. Это обстоятельство еще ждет своего объяснения и, повидимому, может быть приписано неоднородностям в нижних слоях атмосферы, возникающим, например, под влиянием погоды.

Наблюдения за шарами-зондами ³, достигавших высоты 33 км, показали, что температура атмосферы возрастает с 219° К на высоте 20 км до 226° К на высоте 33 км. Все предположения о температуре на высотах, превышающих 33 км, являются теоретическими. Результаты вычислений Мэриса, Гауэна ⁴ и др. ⁵ о возможности нагревания верхних слоев при поглощении солнечного и земного излучения могут быть сформулированы следующим образом: вычисления, основанные на разумных гипотезах, показывают, что верхние слои атмосферы нагреты, но эти вычисления не позволяют определить, насколько именно нагрета атмосфера, а также решить вопрос о том, остаются ли слои нагретыми ночью или они подвергаются охлаждению.

Исходя из дневной температуры на высотах, превышающих 80 км в 360° К, предполагая полное перемешивание газов от уровня моря до высоты 130 км и тепловое равновесие на высотах свыше 130 км, Мэрис составил таблицу молекулярных плотностей газов,

входящих в состав атмосферы на больших высотах, которая по общему мнению является наиболее обоснованной. Часть этих вычислений приведена в табл. 1, где n — число молекул в 1 см^3 , а z — высота над уровнем моря. При этом предполагается, что кислород и азот находятся в молекулярном состоянии. Если эти газы находятся в атомном состоянии, то величины n для значений z , превышающих 200 км, должны быть увеличены вдвое или в еще большее число раз⁶. Выше $z = 400 \text{ км}$ столкновения происходят крайне редко, и обычные газовые законы оказываются неприменимыми; эта область составляет наружную оболочку атмосферы.

Таблица 1

Вычисленные значения числа молекул в 1 см^3 (n) и длины пути свободного пробега (γ) в верхних слоях атмосферы

z в км	n	γ в см
60	$9,9 \cdot 10^{15}$	0,03
80	$1,0 \cdot 10^{15}$	0,25
100	$1,6 \cdot 10^{14}$	1,5
120	$2,6 \cdot 10^{13}$	9,6
140	$4,4 \cdot 10^{12}$	57
160	$7,7 \cdot 10^{11}$	320
180	$1,4 \cdot 10^{11}$	1800
200	$2,5 \cdot 10^{10}$	10^4
250	$2,5 \cdot 10^8$	10^6
300	$7,7 \cdot 10^6$	10^7
350	$7,3 \cdot 10^5$	10^8
400	$4,1 \cdot 10^5$	10^9

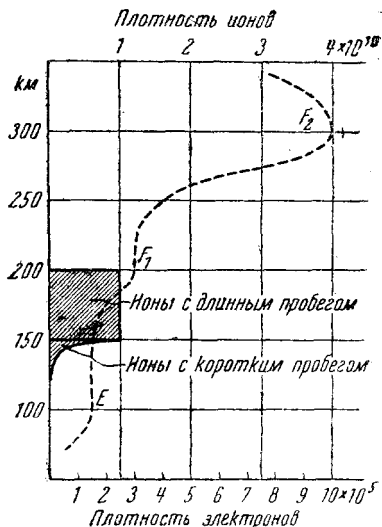


Рис. 1. Пунктирная линия показывает распределение ионизации в верхних слоях атмосферы в экваториальный полдень в 1933—1934 г. по данным измерений⁷; заштрихованные площадки показывают распределение ионизации, принимаемое в теориях⁸ земного магнетизма

Температура в 360°K , с которой оперировал Мэрис, может показаться преувеличенной; однако имеются дальнейшие указания о том, что временами температура может достигать еще более высоких значений. Вычисления показывают⁶, что поглощение солнечных лучей молекулярным кислородом в полосе от 1850 до $1250 \text{ \AA}$ на высоте примерно от 180 до 300 км может увеличивать температуру на 50°K в час. Существование ионизированного слоя F_2 на высоте больше 300 км является достаточно определенным доказательством того, что значения n в табл. 1 для высот z больше 250 км преуменьшены. Наблюдения за радиоволнами могут быть истолкованы в том смысле, что нагретая атмосфера на высотах свыше 150 км ночью охлаждается.

Ионизация высших слоев атмосферы

Весьма полные измерения ионосферы⁷ с помощью наблюдений за отражениями радиоволн по методу Брейта и Тьюа⁸ производились в Нью-Йорке, Вашингтоне и Гуанкайо (Перу) в течение лет минимума солнечных пятен (1933 и 1934 гг.). Результаты наблюдений были обобщены и подвергнуты анализу⁶; в настоящем разделе мы приведем наиболее существенные выводы. Наблюдения за ионосферой показывают, что при зенитном положении солнца эквивалентная электронная концентрация¹⁾ u в слоях E , F_1 , и F_2 имеет значения порядка $1,5 \cdot 10^5$, $3 \cdot 10^5$ и $10 \cdot 10^5$, соответственно на высотах 100, 200 и 300 км; при этом почти нет сведений о концентрации в промежутках между этими значениями и известно только, что эти значения не превосходятся. Эти данные иллюстрируются рис. 1.

Согласно известному и пока не вызывающему сомнений воззрению, что верхние слои атмосферы являются электрически нейтральными или почти нейтральными, величина u представляет собой также число положительных ионов в 1 см^3 .

Исследование ионизированного слоя с помощью наблюдений за отражением радиоволн позволяет определить наиболее низкую частоту f_c , которая только проникает сквозь слой. Соотношение между f_c и числом заряженных частиц в 1 см^3 устанавливается путем приравнивания нулю показателя преломления среды для частоты f_c и имеет вид:

$$f_c^2 = \frac{e^2 c^2 u}{\pi m}, \quad (1)$$

где m и e — масса и заряд в единицах CGSM заряженных частиц, а c — скорость света. Частицы предполагаются заряженными единичным зарядом, так как e представляет собой заряд электронов. Если ионы несут более одного заряда, то правая часть выражения (1) заменяется соответствующей суммой. Выражение (1) справедливо в отсутствии магнитного поля; при наличии магнитного поля формула приобретает более сложный вид и здесь не приводится. Таким образом, определяя экспериментально f_c по формуле (1) может быть вычислено отношение $\frac{u}{m}$ и даже величина u , в слу-

чаях, когда масса m известна. Например, если измеренное значение f_c составляет 5000 kHz, из (1) следует, что u принимает значение $3,1 \cdot 10^5$ для электронов и $1,24 \cdot 10^{10}$ для ионов с массой $3,6 \cdot 10^{-23}$ г, т. е. в 40 000 раз превышающих массу электронов.

На оси абсцисс рис. 1 нанесены две шкалы: нижняя для электронной концентрации, верхняя для плотности ионов, в предположении, что масса атмосферного иона составляет, в среднем, $3,6 \cdot 10^{-23}$ г.

1) Под электронной концентрацией здесь и в дальнейшем понимается число электронов в 1 см^3 . Прим. переводчика.

Наблюдаемое⁷ магнитное расщепление отраженных от ионосферы радиоволн указывает на то, что на высотах больше 200 км, т. е. в слоях F_1 и F_2 , ионизация обусловлена, главным образом, электронами. Вследствие этого участку пунктирной линии рис. 1, соответствующему высотам больше 200 км, отвечает нижняя шкала. Эксперименты еще не позволили установить определенно, обусловлена ли ионизация области E электронами или ионами; большая часть опытов указывает на присутствие ионов, а меньшая — электронов. В соответствии с этим, для участка кривой ниже 200 км можно пользоваться одной из двух шкал или особой шкалой, составленной в предположении известной смеси ионов и электронов. Как будет показано ниже, этот вопрос имеет существенное значение для теорий вариаций магнитного поля, и если будущие опыты покажут, что ионизация ниже 200 км обусловлена, главным образом, электронами, то все эти теории окажутся несостоятельными или потребуют коренных переделок.

Было показано⁶, что наблюдавшиеся значения u в точке максимума кривой $u = f(z)$ у слоя E в течение 1933 и 1934 гг. удовлетворяли соотношению, которое вытекало из гипотезы, согласно которой ионизация обусловлена ультрафиолетовым излучением солнца

$$v = y_0 (\cos \beta)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где β — зенитное расстояние солнца, y_0 — значение u при зенитном расположении солнца, т. е. при $\beta = 0$. Выражение (2) справедливо для значений β от нуля до, приблизительно, 85° . Для слоев F_1 и F_2 наблюдаемые значения u существенно отличаются от значений, вытекающих из формулы (2); однако для объяснения этих отклонений были предложены вполне удовлетворительные теории. Таким образом в настоящее время пригодность формулы (2) для приближенного определения ионизации над освещенной половиной земного шара не встречает возражений. Среднее значение ионизации в ночное время составляет примерно 0,1 от полуденного значения.

Сравнивая экспериментально определенную электронную концентрацию в 10^6 в слое F_2 с числом молекул в 1 см^3 на высотах больше 300 км (табл. 1), легко видеть, что обе величины одного порядка. Из этого мы заключаем, что наружная оболочка ионосферы практически полностью ионизирована. К этому заключению легко прийти и на основании теоретических соображений, ибо солнце представляет собой весьма мощный источник ионизации; однако очень трудно надеяться, что это удастся продемонстрировать прямыми экспериментами.

Области длинных и коротких свободных пробегов

В верхних слоях атмосферы следует различать две области: область коротких и длинных свободных пробегов. В первой области

радиус завихрения r электронов или ионов в магнитном поле велик по сравнению со средней длиной пробега γ ; во второй области, наоборот, γ мало по сравнению с r . Радиус r определяется по формуле

$$r = \frac{mv}{He}, \quad (3)$$

где v , m и e — соответственно скорости теплового движения, масса и заряд заряженной частицы, а H — составляющая магнитного поля земли, перпендикулярная скорости v . Длина свободного пробега γ ионов и электронов выражается формулой:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{2\pi n} a^2} \gamma = \frac{4}{\pi n a^2}, \quad (4)$$

где n — число молекул в 1 см^3 , а $a = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ — определяемый из кинетической теории средний диаметр атмосферных молекул или атомов.

Величины γ для ионов приведены в последнем столбце табл. 1. Из формулы (3) следует, что радиус r для ионов и электронов у экватора ($H = 0,3$ гаусса) принимает значение 20 см и соответственно $1,3 \text{ см}$. В случае ионов отношение $\frac{\gamma}{r}$ делается большим на высотах, превышающих 150 км , а в случае электронов — на высотах больше 100 км . В соответствии с этим у экватора область коротких пробегов переходит в область длинных пробегов на высоте около 150 км для ионов и на высоте 100 км для электронов. В умеренных широтах, где $H = 0,5$ гаусса, при температуре 360° К соответствующие области расположены примерно на 10 км ниже. Если кислород и азот в верхних слоях атмосферы находятся в атомном состоянии, то величина n принимает значения, большие, чем те, которые приведены в табл. 1, вследствие чего границы между областями поднимаются на $10\text{—}30 \text{ км}$.

Проводимость

Проводимость σ единицы объема ионизированного газа выражается в системе CGSM следующей формулой:

$$\sigma = \Sigma u e^2 \frac{\gamma}{2mv}, \quad (5)$$

где u — число заряженных частиц в 1 см^3 ; суммирование распространяется на все виды заряженных частиц. Если ионизированный газ находится в магнитном поле, то проводимость в направлении H магнитным полем не нарушается, и σ попрежнему определяется формулой (5). Проводимость σ' в направлении, перпендикулярном магнитному полю, выражается приближенной формулой¹⁰

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1 + \frac{\gamma^2}{r^2}}, \quad (6)$$

Более точные вычисления Пэйджа¹¹ приводят к формуле

$$\sigma' = \frac{\sigma \left(1 + \frac{2\gamma^2}{r^2}\right)}{\left(1 + \frac{\gamma^2}{r^2}\right)^2}. \quad (7)$$

Уравнение (6) выведено путем усреднения влияния столкновений, укорачивающих спиральный путь ионов в магнитном поле, а уравнение (7) — путем тех же усреднений, но при дополнительном учете поступательного движения ионов в направлении магнитного поля. Эти уравнения между собой различаются лишь незначительно и оба приводят к $\sigma' = 0$ в области длинных свободных пробегов и к $\sigma' = \sigma$ в области коротких пробегов.

Движение ионов в противодействующих полях, гравитационно-магнитный дрейф

Пусть на ион с зарядом e и массой m , помещенный в магнитном поле H , действует постоянная сила X . Направление сил H и X совпадает с положительными направлениями оси x и соответственно y . Уравнения движения иона в единицах CGSM представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= X + He\dot{y}, \\ m\ddot{y} &= -He\dot{x}, \\ m\ddot{z} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим $-\frac{He}{m} = \omega$ и положим при $t = 0$, $\dot{x} = \dot{x}_0$, $\dot{y} = \dot{y}_0$ и $\dot{z} = \dot{z}_0$. Решение уравнений (8) выражается формулами

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x_0 \cos \omega t + \left(\dot{y}_0 + \frac{X}{He}\right) \sin \omega t, \\ \dot{y} &= -\frac{X}{He} + \left(\dot{y}_0 + \frac{X}{He}\right) \cos \omega t - \dot{x}_0 \sin \omega t, \\ \dot{z} &= \dot{z}_0. \end{aligned} \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что ионы движутся по циклоидальной траектории, перемещаясь в то же время в направлении, перпендикулярном X и H . Если начальные значения $\dot{x}_0$, $\dot{y}_0$, $\dot{z}_0$ равны нулю, то усредненные по времени скорости $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ вследствие того, что периодические составляющие исчезают, принимают значения

$$0, \quad -\frac{X}{He}, \quad 0. \quad (10)$$

Таким образом ионы перемещаются (дрейфуют — drift¹²⁻¹⁴) вдоль оси u с постоянной скоростью $\frac{X}{He}$. При усреднении сглаживаются петли циклоидального пути.

У экватора, где магнитная сила горизонтальна и направлена на север, действием земного тяготения, ионы притягиваются вниз и, следовательно, согласно формуле (10) перемещаются (дрейфуют) в горизонтальном направлении со скоростью v , определяемой из выражения

$$v = \frac{mg}{He} \quad (11)$$

При этом положительные ионы движутся на восток, а отрицательные частицы — на запад, создавая электрический ток в направлении с запада на восток, называемый током „магнитно-гравитационного дрейфа“.

На высоте 200 км, у экватора, $g = 920$ см/сек, $H = 0,29$ гаусса, и скорость получает значения 11,8; 5,3 и 1,3 см/сек, соответственно, для молекул азота, кислорода и атомов гелия.

Под действием электрического поля E , перпендикулярного H , как это следует из того же уравнения (10), ионы обоих знаков приходят в движение в направлении, перпендикулярном E и H , с общей скоростью.

$$v = -\frac{E}{H} \quad (12)$$

Если поле E направлено на восток, то ионы у экватора перемещаются вверх; при западном направлении поля ионы движутся вниз. Это перемещение (дрейф) не представляет собой электрического тока, ибо ионы обоих знаков движутся в одном и том же направлении, притом с одинаковой скоростью.

Магнитно-гравитационный дрейф (11) и магнитно-электрический дрейф (12) могут проявиться достаточно интенсивно только в области длинных свободных пробегов; в области коротких пробегов дрейф отсутствует. Следуя Педерсену¹⁰, можно полагать, что величина дрейфа в обоих случаях связана с длиной свободного пробега приблизительно следующим соотношением:

$$\frac{1}{1 + \frac{r^2}{\gamma^2}} \quad (13)$$

Динамо-эффект

Под динамо-эффектом понимают наведение э. д. с. u в проводнике,двигающемся со скоростью v , поперек магнитного поля H . Выражая все величины в единицах CGSM, имеем

$$u = -vH, \quad (14)$$

где u , v и H направлены соответственно вдоль положительных направлений осей x , y и z . Это непосредственно следует из закона электромагнитной индукции Фарадея. Область коротких свободных пробегов в верхних слоях атмосферы является проводником, и если под действием ветров, теплового расширения или приливных сил эта область начинает двигаться в магнитном поле земли H , то в ней в соответствии с уравнением (14) наводится э. д. с. Но при существовании проводимости, э. д. с. неизбежно вызывает токи, которые в свою очередь создают магнитное поле.

Движение области длинных свободных пробегов в магнитном поле также сопровождается появлением э. д. с. в согласно уравнению (14), так как силы, приводящие эту область в движение, вызывают в соответствии с формулой (10) дрейф положительных и отрицательных зарядов, эквивалентный движению зарядов, необходимому для создания u согласно уравнению (14).

Диамagnetизм

Область длинных свободных пробегов в верхней атмосфере является диамагнитной¹⁵. Интенсивность намагничивания i свободных зарядов, какими являются ионы и электроны, выражается формулой:

$$i = -\frac{ykt}{H}, \quad (15)$$

где t — температура в градусах Кельвина, y — число зарядов в 1 см^3 , а $k = 1,372 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/град } K^\circ$. Так же, как и в случае тока дрейфа, величина i изменяется в зависимости от длины свободного пробега, в соответствии с выражением (13), обращаясь в нуль в области коротких пробегов.

Б. Солнечные суточные вариации магнитного поля земли

Данные наблюдений за солнечными суточными вариациями

Усредненные суточные вариации магнитного поля земли, обозначаемые нами через S на различных географических широтах, приведены на рис. 2, где показано изменение величин N , V и W , которые представляют собой соответственно северную горизонтальную, вертикальную и западную горизонтальную составляющие величины S , в функции местного времени¹⁶. Для широт ниже 40° , N в течение дневных часов стремится к максимуму, а для широт выше 40° — к минимуму. Дневной максимум или минимум величины N наступает за 1 или 2 часа до полудня, т. е. между 10 и 11 часами. Амплитуда S увеличивается при возрастании числа солнечных пятен, делаясь в периоды максимума солнечных пятен примерно в два раза большей, чем в период минимума. Изменения S состав-

ляют в годы максимума и минимума соответственно 30γ ($1 \gamma = 10^{-5}$ гаусса) и 15γ . Гармонический анализ показывает, что примерно три четверти величины S обусловлены внешними по отно-

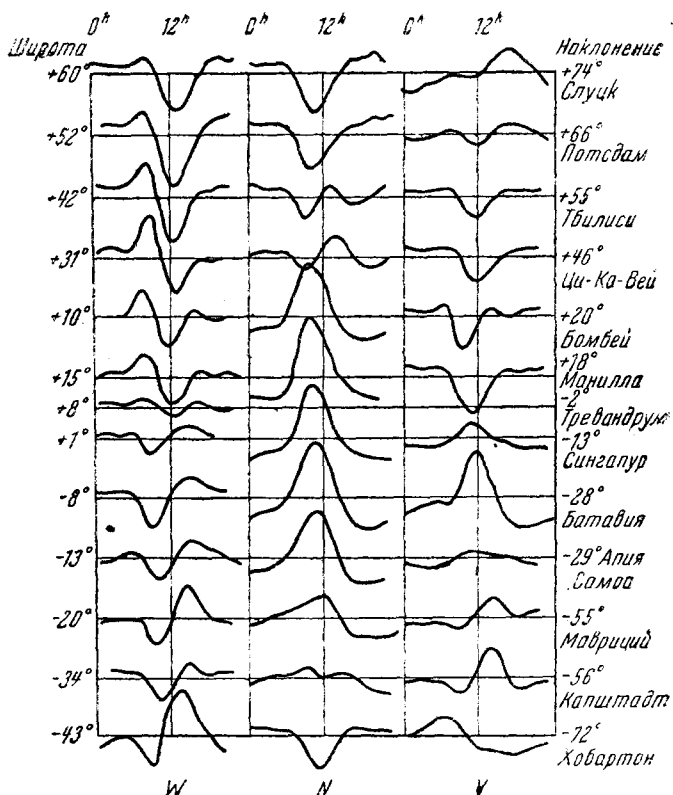


Рис. 2. Суточные вариации элементов магнитного поля земли в равноденствие¹⁶. Наклонение характеризует магнитную широту

шению к земле причинами, а одна четверть вызвана индуцированными в земле токами¹⁷.

Теория атмосферной динамо

Теория атмосферной динамо в приложении к суточным вариациям S первоначально была предложена Бальфуром Стюартом, а затем уже в деталях разработана Шустером¹⁷. Согласно этой теории вариации S обусловлены горизонтальным перемещением проводящих верхних слоев атмосферы в вертикальных составляющих магнитного поля земли. Наводимые при движении согласно уравнению (14) э. д. с. создают электрические токи, а следовательно, и изменения магнитного поля, показанные на рис. 2. Характер электри-

ческих токов в атмосфере, необходимый для создания наблюдаемой картины суточных вариаций S , вычислен Бартельсом¹⁸ и приведен на рис. 3; цифры у линий выражают силу тока в тысячах ампер. Как следует из рисунка, общий дневной ток в северном полушарии достигает 62 000 А; линии тока образуют замкнутые пути в направлении против движения часовой стрелки с центром у 40° широты и 11⁰⁰ час. В ночное время ток меняет направление на обратное, а общая сила тока составляет 32 000 А. Таким образом дневной ток превышает ночной на 94 000 А. Приведенные цифры относятся к году, занимающему среднее положение в развитии цикла солнечных пятен. Наибольшая плотность тока наступает в 11 час.

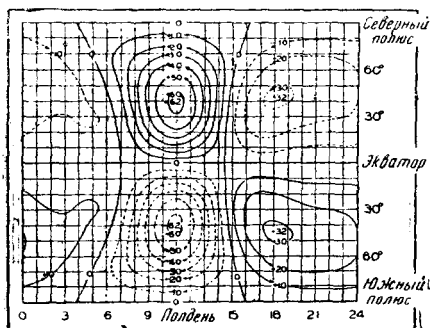


Рис. 3. Вычисленная система электрических токов в верхних слоях атмосферы, необходимая для создания наблюдаемых суточных вариаций¹⁸, составлена по данным магнитного поля земли в 1902 г. (год минимума солнечных пятен)

и расположена у экватора, где дневное значение на $3 \cdot 10^{-5}$ единицы $CGSM$ превышает ночное значение.

Горизонтальное перемещение верхних слоев атмосферы вычислялось на основании наблюдений за суточными колебаниями атмосферного давления. При этом были обнаружены две составляющие барометрических колебаний: периодическая составляющая, с периодом в 12 час. и амплитудой колебаний в 1 мм ртутного столба у экватора, и менее регулярная, неправильная составляющая с амплитудой около 0,3 мм. Вопрос о возможной причине барометрических колебаний, в качестве которых можно

было предположить тепловые или приливные силы, подвергался длительному обсуждению¹⁹. Если полусуточная солнечная составляющая обусловлена приливными силами, то необходимо выдвинуть новую гипотезу для объяснения резонанса в свободной атмосфере, так как солнечные полусуточные колебания в 15 раз превышают лунные полусуточные колебания с амплитудой 0,063 мм, в то время как приливное притяжение солнца составляет всего $\frac{2}{5}$ такого же притяжения луны. Можно удовлетворительно объяснить суточную составляющую, предположив, что она обусловлена тепловым эффектом и происходит от перераспределения воздушных масс, возникающего в расширяющихся, нагретых солнцем областях.

В качественном отношении воздушные потоки, расходящиеся от областей с высоким давлением, расположенные в полдень у экватора, создают токи такого же характера, как и на рис. 3. В дневное время, на широтах выше 40° , потоки воздуха, движущиеся на север в вертикальном поле H , создают э. д. с., направленные на запад, которые при естественном предположении, что проводимость

с увеличением зенитного расстояния уменьшается до малых ночных значений, приводят к образованию замкнутых токов согласно рис. 3. Такого же характера токи возникают под действием 12-часовых приливных движений атмосферы с 12- и 24-часовыми составляющими, амплитуды которых определяются зависимостью проводимости высоких слоев атмосферы от зенитного расстояния.

В результате кропотливого математического анализа Шустер установил, что хотя отвечающие наблюдаемым изменениям атмосферного давления электрические токи по характеру соответствуют вычисленным токам, однако по фазе они заметно отличаются от изображенных на рис. 3. В действительности, фазы этих токов почти противоположны; по вычислениям величина N должна получить максимальное значение от 14 до 16 час., тогда как фактически максимум наблюдается от 10 до 11. Имеет место также расхождение между наблюдаемым и теоретическим отношением амплитуд 24- и 12-часового периодических составляющих, определяемых гармоническим анализом; наблюдаемое отношение близко к 9, а вычисленное — к 3. Вывод, надо сказать, не неожиданный, к которому мы приходим, сводится к тому, что если считать гипотезу атмосферной динамо правильной, то надо полагать, что движение воздуха в верхних слоях атмосферы не связано простым образом с показаниями барометра у поверхности земли. Анализ более поздних магнитных и метеорологических наблюдений, проведенный Уокером²¹, Чэпманом²² и другими, подтвердил точку зрения Шустера. Теория осталась „висеть в воздухе“.

Проводимость σ верхних слоев атмосферы вычислялась в том мало вероятном предположении, что 12-часовые колебания давления обусловлены явлениями приливов простейшего характера, при котором приливное движение равномерно охватывает вертикальный столб атмосферы. При этом амплитуда колебаний в 1 мм означает, что $\frac{1}{2.760}$ часть атмосферы остается как бы неподвижной по отношению к солнцу, вследствие чего возникают горизонтальные приливные и отливные движения в атмосфере со средней скоростью $\frac{1}{1520}$ от окружной скорости вращения земли. На экваторе эта скорость составляет 30 м/сек, или 1 км/час.

Из уравнения (14) следует, что $\sigma = \frac{i}{vH}$, и полагая $i = 3 \cdot 10^{-5}$, $H = 0,3$ гаусса и $v = 30$, находим: $\sigma = 3 \cdot 10^{-6}$ единиц CGSM для экваториального полдня, какая величина и была получена Шустером. Не следует думать, что эти короткие вычисления воспроизводят гораздо более полные рассуждения Шустера; они дают только представления о физической картине явлений и приводят к численному значению правильного порядка.

Если предположить существование атмосферного резонанса, то движение воздуха будет отличаться от вычисленного выше движения (в предположении простейшего приливного воздействия на резонирующую атмосферу), и полученное значение σ потеряет смысл.

Если барометрические колебания отнести за счет нагревания атмосферы солнцем, то атмосферные потоки и электрическая проводимость, требуемые теорией атмосферного динамо, не могут быть определены до тех пор, пока не будет известен или пока не будет задан тепловой режим на всех высотах атмосферы.

Теория атмосферной динамо может быть заново пересмотрена в свете полученных при измерениях ионосферы результатов. Из трехдневных слоев ионосферы только слой E может обеспечить необходимую проводимость в поле H , так как слои F_1 и F_2 расположены в области длинных свободных пробегов. Обращаясь к рис. 1, предполагаем, что ионизация слоя E , имеющая постоянное значение в пределах от 100 до 150 км, обусловлена одинаковым числом электронов и положительных ионов, число которых в 1 см^3 определяется формулой (2); измерения ионосферы показывают, что наибольшее число электронов в 1 см^3 y_0 , вычисленное по формуле (1), не превышает $y_0 = 1,5 \cdot 10^5$.

Располагая этими данными, можно вычислить проводимость области E над освещенной половиной земного шара. Электроны не могут двигаться перпендикулярно магнитному полю H , и проводимость вертикального столба воздуха поперечного сечения в 1 см^2 от 100 до 150 км высоты определится по формулам (2), (5), (6) на основании данных табл. 1

$$\sigma = 7,2 \cdot 10^{-10} (\cos \zeta)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Среднее значение дневной проводимости σ для широт от 0 до 40° составляет около $5 \cdot 10^{-10}$, что примерно в четыре раза меньше величины, найденной Шустером.

Полный ток в направлении на запад (рис. 3), протекающий в дневное время в широтах от 0 до 40° , превышает ночное значение на 94 000 А, что соответствует средней плотности тока $2 \cdot 10^{-5}$ единицы CGSM в вертикальном столбе сечением 1 см^2 в области E . Для создания такого тока за счет динамо-эффекта, необходимо предположить существование ветров на освещенной половине, на широтах выше 40° , со скоростью, определяемой из уравнения (14)

$$\frac{2 \cdot 10^{-10}}{5 \cdot 10^{-10} \cdot 0,5} = 8 \cdot 10^4 \text{ м/сек, или } 2900 \text{ км/час.}$$

При вычислении положено $H = 0,5$ гаусса.

Существование таких высоких скоростей движений воздуха весьма невероятно, и мы приходим к заключению, что теория атмосферной динамо не удовлетворяет исходным предположениям.

Приемлемая теория должна оперировать с потоками воздуха умеренных скоростей, не превышающих 100 км/час. Тогда проводимость E должна была бы по крайней мере в 30 раз превышать величину $5 \cdot 10^{-10}$. Но проводимость слоя E нельзя считать возросшей вследствие увеличения числа электронов сверх значения, которое показывают измерения ионосферы.

Выход из положения может быть найден в том, что измерения ионосферы не мешают предположить, что ионизация слоя E обусловлена ионами, число которых в 1 см^3 определяется из уравнения (2) при $y_0 = 6 \cdot 10^9$. Если такая концентрация действительно существует на высотах от 100 до 150 км, то σ составляет $4 \cdot 10^{-5}$, и создание тока в 94 000 А может быть осуществлено „бризом“ со скоростью всего в 35 м/час, т. е. весьма умеренным „бризом“. Таким образом имеется некоторая свобода в пределах, которые допускают измерения ионизации слоя E в выборе характера ионизации (электроны или ионы), необходимой для приведения теории атмосферного динамо в соответствие с наблюдаемыми фактами. Это было уже со всей ясностью обнаружено при ранних обсуждениях вопроса о ионосфере⁹, когда был сделан, в допустимых пределах, произвольный выбор между электронами и ионами.

Сделанные замечания относятся в равной степени ко всем излагаемым ниже теориям магнитных вариаций, в тех частях их, которые трактуют о токах в верхних проводящих слоях атмосферы; причина существования этих токов не может быть признана убедительной в том случае, когда область коротких свободных пробегов предполагается состоящей, главным образом, из электронов.

Дальнейшее изучение теории динамо сводится к исследованию вторичных явлений с целью выяснить, дают ли они удовлетворительное объяснение наблюдаемым фактам и не вступают ли в противоречие с наблюдениями. Так например, поток воздуха, движущийся в дневное время к северу в широтах выше 40° , индуцирует э. д. с., направленную на запад, которая вместе с H , согласно формуле (12) вызывает в дневное время в областях F_1 и F_2 ионосферы (области длинных пробегов) движение вниз, а в ночное время — вверх. Скорость этого дрейфа — того же порядка, что и северного бриза. Следовательно, динамо-теория, предполагающая скорость бриза в 40 км/час, должна быть готова принять существование дрейфа в слоях F_1 и F_2 со скоростью 20—40 км/час вниз в дневное время и дрейфа с такой же скоростью, направленного вверх, в области ночного слоя F .

Мы покидаем теорию атмосферного динамо, сделав замечание, что эта теория не доказана и не опровергнута. Теория динамо является одной из возможных; однако для ее убедительности, ионизация слоя E должна быть в основном обусловлена ионами.

Диамангнитная теория

Обратив внимание на то обстоятельство, что ионизация области длинных свободных пробегов делает эту область в соответствии с уравнением (15) диамангнитной, Гунн¹⁵ разработал диамангнитную теорию суточных изменений S . Интенсивность намагничивания i вертикального столба атмосферы сечением 1 см^2 в области длинных пробегов, на освещенной половине земного шара, содержащего у'

заряженных частиц, выражается уравнением

$$i = i_0 \cos \zeta, \quad (17)$$

причем в ночное время i составляет менее чем $1/10$ полуденного значения. Диамагнетизм этой среды создает ¹⁵ магнитное поле, вполне отвечающее наблюдаемым суточным вариациям (рис. 2). Повторные вычисления, проделанные Чэпманом, привели к тем же результатам.

Подставляя выражение (15) в уравнение (17), имеем

$$y't = y'_0 t_0 \cos \zeta, \quad (18)$$

где y'_0 и t_0 относятся к $\beta = 0$.

Наблюдения за ионосферой ⁷, проводившиеся после разработки теории, показали, что $y' \cong (\cos \beta)^{\frac{1}{2}}$, т. е. они подтверждают взгляд, согласно которому t достигает максимума в полдень и, следовательно, находятся в хорошем качественном соответствии с уравнением (17).

Для количественного соответствия теории с наблюдаемыми изменениями S (горизонтальная составляющая H внешнего происхождения в экваториальный полдень, в равноденствие при среднем числе солнечных пятен, составляет около 15γ) необходимо, чтобы $y'_0 = 5 \cdot 10^{10}$ при полуденной $t^\circ = 360^\circ$ К. Из уравнения (15) следует, что y'_0 может иметь и меньшее значение, но при соответственно более высокой температуре слоя.

В предположении равного числа электронов и положительных ионов, по пунктирной кривой рис. 1, пользуясь нижней шкалой на оси абсцисс, определяем значение y в области F_2 , постоянное на высотах от 300 до 400 км и равное $10 \cdot 10^5$. Этому отвечает $y'_0 = 3 \cdot 10^{18}$ заряженных частиц, т. е. $1/1700$ от $5 \cdot 10^{16}$ частей, требуемых диамагнитной теорией. Если, однако, на участке кривой от 150 до 200 км большую часть заряженных частиц составляют ионы, то по верхней шкале рис. 1 найдем, что в этом случае число заряженных частиц достигает $5 \cdot 10^{16}$.

Диамагнитная теория не в силах дать удовлетворительного объяснения наблюдаемому минимуму величины N у экватора около 10 час. (рис. 2); простое выражение (17) объясняет лишь полуденный минимум. Увеличение средней высоты ионизации в течение дня на 30 км, с максимумом в 14, как было показано ²³, смещает фазу диамагнитного эффекта в дополуденные часы. Измерения высоты ионосферы показывают максимальную высоту в полдень; однако не исключена возможность, что в действительности все же имеет место смещение максимума на 2 часа после полудня. Это обусловлено не столько неточностью измерений, сколько тем обстоятельством, что при измерении определялась не действительная, а только эквивалентная высота слоя.

При обсуждении вопроса о диамагнетизме, Каулинг ²⁴ пришел к заключению, что на границе диамагнитной области возникают электрические токи, уничтожающие диамагнитный эффект вне этой

области. Это мнение повторяло более старые взгляды Бора и Ван Лиувена²⁵, относящиеся к диамагнитной теории металлов. Каулинг пришел к этому заключению, полагая что столкновения ионов являются идеально упругими. Если, однако, допустить (а надо сказать, что для этого имеются веские основания), что после столкновения ион и электрон обладают большей вероятностью продолжать движение в произвольном направлении, то токи на границе области исчезают и остается диамагнитный эффект в чистом виде. Таким образом анализ Каулинга показывает, в какой степени явление диамагнетизма зависит от механизма столкновений.

Диамагнитная теория находится примерно в таком же положении, как и теория атмосферной динамо, ибо она требует большего числа заряженных частиц в верхних слоях атмосферы, чем то, которое с первого взгляда отвечает измерениям ионосферы, но с другой стороны, было бы неправильно утверждать, что измерения ионосферы, безусловно, исключают такую возможность. Эта теория проще динамо-теории, так как она не требует постулирования системы атмосферных потоков, охватывающих весь земной шар.

Теория токов дрейфа

Чэпманом¹³ была разработана количественная теория вариаций, основанная на токах гравитационно-магнитного дрейфа в области длинных свободных пробегов. В наиболее общем случае, когда H и g составляют между собой угол Φ , выражение (11) принимает вид

$$v = mg \sin \frac{\Phi}{He}. \quad (19)$$

Для однородно намагниченной сферы, к которой достаточно близко приближается земной шар, величина H на широте θ определяется из выражения

$$H = H_0 (1 + 3 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

где $\cos \theta = 2 \operatorname{tg} \Phi$, $H_0 = 0,32$ гаусса (у экватора, на уровне моря). Из (19) и (20) следует

$$v = \frac{mg \cos \theta}{He (1 + 3 \sin^2 \theta)}, \quad (21)$$

откуда $v = 0$ у магнитных полюсов и $v = 8,5$ см/сек у экватора.

Если полное число ионов y' в области длинных пробегов в вертикальном столбе с сечением 1 см^2 составлено из равного числа положительных и отрицательных ионов одинаковых зарядов и масс, то ток гравитационно-магнитного дрейфа, направленный на восток, представится формулой

$$i = vey'. \quad (22)$$

Восточный дрейф положительных ионов вызывает накапливание положительных зарядов на вечерней стороне земли; точно так же

западный дрейф отрицательных ионов приводит к скоплению отрицательных зарядов на утренней стороне. Вследствие этого в области длинных пробегов возникает электрическое поле, направленное на запад. Эта область, однако, электрически соединена с нижней областью коротких пробегов, ибо заряды смогут свободно проникать в нижнюю область, двигаясь вдоль H , особенно в высоких широтах, где H составляет значительный угол с вертикалью. Вследствие этого под действием э.д.с., направленной на запад, в области коротких пробегов возникают электрические токи, которые при соответствующем распределении проводимости (в той же области) создают систему токов, аналогичную рис. 3.

Подставляя в формулу (22) полуденный экваториальный ток $i = 3 \cdot 10^{-5}$ (рис. 3), найдем $y' = 2 \cdot 10^{14}$, каковая величина меньше значения, требуемого диамагнитной теорией. Теория токов дрейфа не дает объяснения дополуночного максимума S . Достигнув этого пункта, Чэпман оставил теорию, высказав предположение, что для объяснения этого опережения по фазе, возможно, придется обратиться к динамо-эффекту.

Область длинных свободных пробегов может участвовать в суточных вариациях S вследствие своих диамагнитных свойств и токов дрейфа. Для эффективности первого влияния необходимо, чтобы распределение ионизации приблизительно подчинялось уравнению (18); для эффективности второго влияния должно иметь место аналогичное распределение в области длинных пробегов и, кроме того, проводимость или ионизация в области коротких пробегов должна удовлетворять известному распределению (которое не уточняется). Результаты количественного исследования, имевшего целью определить распределение ионизации, оказались благоприятными для диамагнитной теории и неблагоприятными для теории токов дрейфа.

При исследовании были сделаны следующие предположения: 1) что ионизация обусловлена ультрафиолетовым излучением солнца, 2) что в области длинных пробегов при вертикальном падении солнечных лучей $y' = 5 \cdot 10^{16}$, в соответствии с диамагнитной теорией; это отвечает ионизации $y = 5 \cdot 10^9$ в области от 150 до 200 км и 3) что в области коротких пробегов, при вертикальном освещении солнечными лучами, $y = 5 \cdot 10^9$ на высоте 150 км и уменьшается по экспоненциальному закону до значения $1,4 \cdot 10^7$ на высоте 100 км; это приводит к $\sigma = 1,44 \cdot 10^{-5}$. Заштрихованные площадки на рис. 1 соответствуют сделанным предположениям. Казалось, что заштрихованные площадки не должны были выходить за пределы пунктирной линии, что означало бы, что предполагаемая ионизация превышает измеренные значения. Однако расхождения с опытом все же нет, так как пунктирная линия относится к году минимума солнечных пятен, а заштрихованные площадки — к среднему числу пятен; известно ²⁷, что ионизация за время от минимума (в 1923 г.) до максимума (в 1928 г.) числа солнечных пятен возросла в среднем на 50%.

Основываясь на трех сделанных предположениях и принимая во внимание ионную рекомбинацию, диффузию и электрический и магнитный дрейф, вычислялась ионизация верхних слоев; довольно сложные детали вычислений здесь опускаются и с ними следует ознакомиться в оригинальных работах⁹. Анализ показывает, что ионизация области длинных пробегов находится в соответствии с уравнением (18), а следовательно, и в соответствии с диамагнитной теорией. Дневная проводимость области коротких пробегов имеет высокие значения в тропических широтах и падает до сравнительно низкой величины на широтах выше 40° ; в ночной половине земного шара, в тропической зоне, проводимость падает до $1/5$ дневного значения. Следовательно, цепь восточного электрического тока дрейфа в области длинных свободных пробегов замыкается не токами, текущими днем в высоких широтах на запад (как это показано на рис. 3), а частично (на $3/4$) западным током в дневной тропической области коротких пробегов и частично (на $1/4$) восточными токами в ночной области свободных пробегов.

Детальное рассмотрение показывает, что охватывающая весь земной шар система токов направлена в основном вдоль параллелей и складывается из: 1) токов в освещенной половине земли, протекающих в области длинных пробегов в восточном направлении, которые у пунктов восхода и заката солнца разбиваются на две системы токов; 2) одна из систем направлена на запад и протекает в области коротких пробегов, непосредственно под токами 1; 3) а вторая система является как бы продолжением токов 1, направлена на восток и охватывает ночную половину земли. Основная масса тока (приблизительно $4/5$) протекает в экваториальной области между 40° северной широты и 40° южной широты и падает до малых значений на высоких широтах. Полные значения силы токов трех систем составляют соответственно: $2,1 \cdot 10^7$, $1,6 \cdot 10^7$ и $5 \cdot 10^6$ А. Восточный и западный дневные токи, вычитаясь один из другого, создают остаточный ток в $5 \cdot 10^6$ А, опоясывающий землю и протекающий непрерывно. Распределение силы тока вдоль широт показано на рис. 4 (кривая 2).

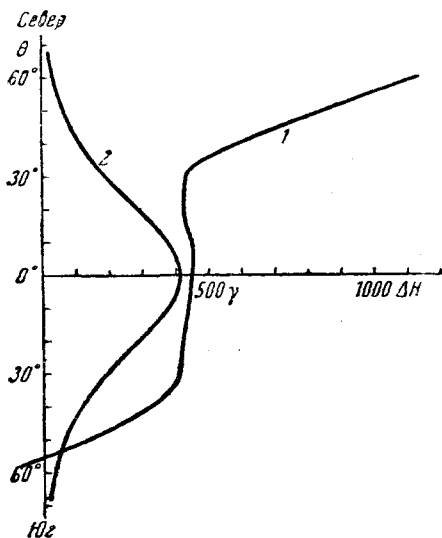


Рис. 4. Кривая 1 показывает наблюдаемые²⁸, а кривая 2 — вычисленные⁹ горизонтальной составляющей ΔH постоянного магнитного поля земли, обусловленной внешними причинами

Детальное рассмотрение показывает, что охватывающая весь земной шар система токов направлена в основном вдоль параллелей и складывается из: 1) токов в освещенной половине земли, протекающих в области длинных пробегов в восточном направлении, которые у пунктов восхода и заката солнца разбиваются на две системы токов; 2) одна из систем направлена на запад и протекает в области коротких пробегов, непосредственно под токами 1; 3) а вторая система является как бы продолжением токов 1, направлена на восток и охватывает ночную половину земли. Основная масса тока (приблизительно $4/5$) протекает в экваториальной области между 40° северной широты и 40° южной широты и падает до малых значений на высоких широтах. Полные значения силы токов трех систем составляют соответственно: $2,1 \cdot 10^7$, $1,6 \cdot 10^7$ и $5 \cdot 10^6$ А. Восточный и западный дневные токи, вычитаясь один из другого, создают остаточный ток в $5 \cdot 10^6$ А, опоясывающий землю и протекающий непрерывно. Распределение силы тока вдоль широт показано на рис. 4 (кривая 2).

Исследуя в 1922 г. с помощью гармонического анализа постоянное магнитное поле земли, Бауэр²⁸ пришел к заключению, что часть поля, около 20%, обусловлена внешними причинами. Найденные им значения горизонтальной составляющей ΔH внешнего поля на разных широтах представлены в виде кривой 1 на рис. 4, по оси абсцисс которого отложена сила поля в γ ($1 \gamma = 10^{-5}$ гаусса). Вычисленные значения горизонтальной составляющей поля, обусловленные кольцевым током в $5 \cdot 10^6$ А, изображены на том же рисунке кривой 2. Расчетная кривая достаточно хорошо соответствует экспериментальной в области тропических широт. В высоких широтах наблюдается заметное расхождение; однако надо иметь в виду, что из-за небольшого числа наблюдений в полярной зоне эти точки кривой определены недостаточно точно.

Вычисленные значения вертикальной составляющей магнитного поля, которые здесь не приводятся, согласуются с экспериментальными данными в такой же степени, как и горизонтальные составляющие, показанные на рис. 4.

На основании сказанного было сделано заключение, что токи, обусловленные гравитационно-магнитным дрейфом, вместо системы поверхностных токов, показанных на рис. 3, дают начало круговому току, опоясывающему землю; этот ток обуславливает внешнюю часть постоянного поля земли. Как показывает анализ⁹, это заключение остается в силе при распределении ионов, даже несколько отличающемся от показанного заштрихованными площадками на рис. 1.

Мы заканчиваем раздел, сделав тривиальное замечание, что правильное объяснение S , повидимому, заключается в одновременном учете всех трех процессов в верхних слоях атмосферы: динамо-эффекта, диамагнетизма и токов гравитационно-магнитного дрейфа.

В. ЛУННЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Данные наблюдений

Небольшие вариации L магнитного поля земли, амплитуда которых составляет около 3 γ , как было установлено, обусловлены действием луны. Характер лунных изменений L показан на рис. 5 и 6. Восемь верхних кривых представляют собой изменения восточной горизонтальной составляющей L , в зависимости от времени лунных суток, по данным обсерватории в Батавии²⁹; кривые относятся к разным фазам луны. Из кривых следует, что амплитуда изменений во время солнечного дня больше, чем амплитуда изменений во время ночи. Средняя из восьми кривых показана на нижней кривой рис. 5, в которой исключено влияние солнца на лунные вариации и где L получает симметричную форму полусуточных колебаний, аналогичную приливным вариациям. На рис. 6 показаны изменения северной горизонтальной N , вертикальной V и западной горизон-

тальной W , составляющих L на разных широтах, составленные путем усреднений наблюдения на ряде обсерваторий³⁰.

Гармонический анализ показывает, что так же, как и в случае S , $3/4$ или $2/3$ изменений L обязаны внешним причинам, а $1/4$ или $1/3$ — токам, индуцированным в земле. Если L обусловлено магнитным действием токов в верхних слоях атмосферы, то максимальная плотность тока у экватора должна составлять $4 \cdot 10^{-6}$ единиц CGSM. Амплитуда L изменяется вместе с расстоянием до луны приблизительно по тому же закону, что и лунная приливная сила. В противоположность S , L зависит лишь незначительно от среднего годового числа пятен, хотя с увеличением магнитной активности L меняется ото дня ко дню в большей степени, нежели S .

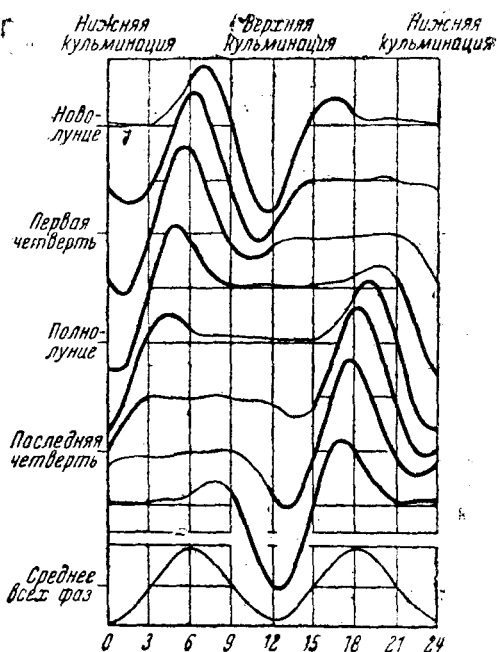


Рис. 5. Лунные вариации W в Батавии²⁹

Теория атмосферной динамо

Единственной теорией, пригодной для объяснения вариации, является теория атмосферной динамо Шустера-Стюарта, которая была впервые разработана в деталях Беммеленом³¹, а впоследствии Чэпманом²². Как и в случае S , изменения приписываются магнитному дей-

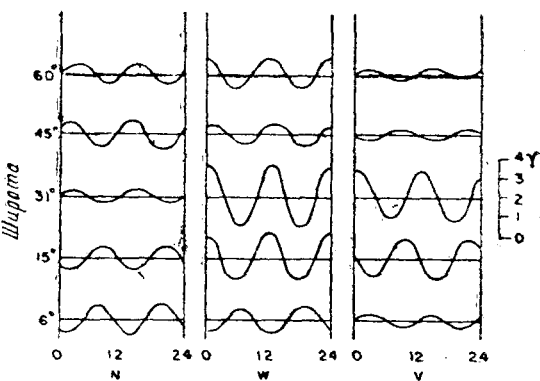


Рис. 6. Усредненные лунные вариации элементов земного магнетизма³⁰

ствию токов в верхних слоях атмосферы. Теория полагает, что токи возникают под действием э. д. с., которая в свою очередь образуется от приливного движения верхних слоев атмосферы в вертикальных составляющих магнитного поля земли; приливные движения вычис-

ляются по наблюдениям за лунными барометрическими вариациями. В Батавии, у экватора, амплитуда 12-часовой составляющей (по лунному времени) достигает 0,063 мм ртутного столба; зависимость амплитуды барометрических колебаний от широты не определялась. Как показывают вычисления, приливные движения атмосферы порождают систему электрических токов, которая по своему характеру отвечает наблюдаемым вариациям L . Положение осложняется, однако, тем, что между теоретическими и действительными изменениями L имеет место сдвиг по фазе, достигающий 223° , т. е. эти изменения почти противоположны по фазе. Это расхождение по фазе тем более трудно объяснить, что, повидимому, единственной причиной лунных барометрических вариаций являются приливные силы²⁰. Вследствие этого, теория L оставляет гораздо меньше путей для маневрирования, чем теория S , в которой всегда можно предположить сложное взаимодействие приливных и тепловых сил. Расхождение фаз в теории L является гораздо более острым противоречием для теории, чем расхождение фаз в теории S .

Для определения по наблюдаемым L проводимости σ в верхних слоях атмосферы мы заменяем сложные вычисления²² более простыми. При лунной барометрической амплитуде 0,063 мм средняя скорость атмосферного „прилива“ и „отлива“ составляет $\frac{1}{0,063 \cdot 760}$ окружной скорости вращения земли. Это соответствует скорости $v = 2$ см/сек, или 0,07 км/час. Подставляя в формулу $\sigma = \frac{i}{vH}$, $i = 4 \cdot 10^{-6}$, $H = 0,3$ гаусса и $v = 2$, получим $\sigma = 5 \cdot 10^{-6}$. Эта величина представляет собой среднее значение проводимости в разных точках вокруг земли, у экватора, ибо L было взято из нижней кривой рис. 5. Вследствие этого полуденное (максимальное) значение σ превышать вычисленную величину в 3 или 5 раз в зависимости от предполагаемого закона суточного изменения σ . Полагая, что σ есть функция косинуса зенитного угла солнца, мы должны для получения полуденной проводимости у экватора выбрать множитель 4; при этом проводимость оказывается равной

$$\sigma = 20 \cdot 10^{-6}.$$

Приблизительно к такому же значению пришел Чэпман; это примерно в 7 раз превышает проводимость, найденную Шустером, исходя из S . Так как эти значения основываются на теориях, только частично оправдавшихся, то они не могут считаться надежными.

С целью объяснить расхождение между теориями, с одной стороны, и наблюдаемыми фактами, с другой стороны, были высказаны многочисленные предположения, как то: о резонансе в атмосфере, о ее вязкости и о возможности того, что S и L обусловлены токами на разных уровнях атмосферы²². До сих пор, однако, ни одно из этих предположений не сделало возможным объяснение

всех противоречий. Мы полагаем, что дальнейшее развитие теории в направлении, обрисованном выше, не может последовать в ближайшее же время, так как для этого потребуются статистическая обработка весьма малых величин, полученных при наблюдениях на многих, разбросанных по всему земному шару, обсерваториях, при этом в течение длительного времени.

Г. МАГНИТНЫЕ БУРИ И ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Данные наблюдений за магнитными бурями

Неправильные вариации или возмущения магнитного поля земли настолько разнообразны, что представляется затруднительным установить для них достаточно полную классификацию. Возмущения могут возникать в любое время суток, они могут охватывать весь земной шар или носить местный характер. Наиболее серьезные возмущения, классифицируемые как бури, почти всегда проявляются на всем земном шаре и обычно сопровождаются полярными сияниями.

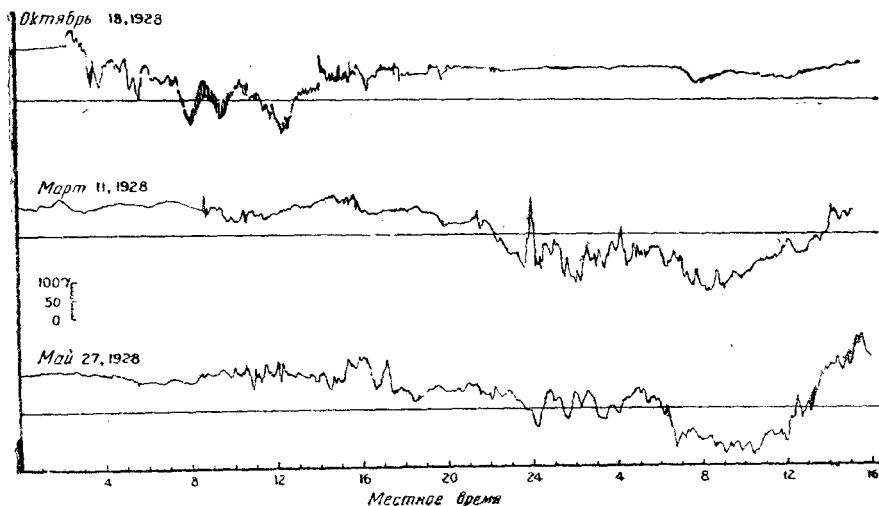


Рис. 7. Горизонтальная составляющая во время трех общих магнитных бурь, по наблюдениям в Челтенхэме³²

Среди этих возмущений в особый класс выделяют бури с явно выраженным, внезапным началом. Кривые регистрирующих приборов на магнитных обсерваториях в течение нескольких часов могут иметь совершенно спокойный характер, и, казалось, ничего не предвещает нарушения их плавного хода. И вдруг, внезапно, возникает резкое колебание в ходе кривой, которое в низких и средних широтах наиболее сильно проявляется в ходе горизонтальной составляющей N . В течение нескольких минут N может

измениться на 50 γ или даже более. Довольно большой процент наиболее сильных бурь начинается именно с такого резкого колебания, которое не без основания считается предвестником или началом бури. На рис. 7 приведены магнитограммы N , полученные в обсерватории Челтенхэм (Cheltenham Maryland), (США), для трех общих (всемирных) бурь³², которые иллюстрируют: а) упомянутое выше внезапное начало, когда N резко возрастает, б) бурю, которая началась с резкого возрастания и затем падения N , и, наконец, в) бурю, начавшуюся постепенно. На рис. 8 приведены кривые N по наблюдениям на ряде обсерваторий, относящиеся к короткой, но ясно выраженной буре, которая началась внезапно в 7 час. по гриничскому времени 14 марта 1922 г.

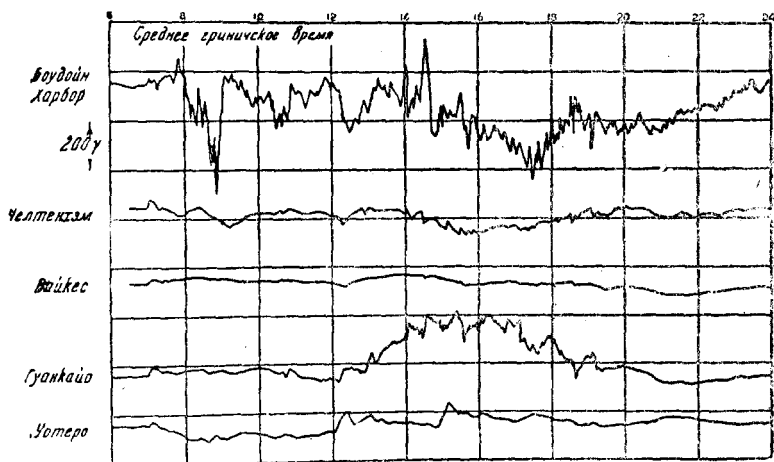


Рис. 8. Горизонтальная составляющая на разных станциях во время магнитной бури 14 марта 1922 г.

В некоторых из общих бурь „внезапное начало“ сейчас же сопровождается сильно возмущенным периодом, тогда как в других случаях между первым импульсом и собственно бурей проходит несколько часов; наконец, отмечены случаи, когда в течение 12 час. после резкого импульса ничего, даже отдаленно напоминающего бурю, не наблюдалось. „Внезапное начало“ общих бурь происходит на всех станциях одновременно, в пределах 3 мин.^{33, 34} На рис. 9 показано начало магнитной бури 3 мая 1921 г., начавшейся в 13 ч. 10 м. по гриничскому времени¹³. Это одна из двух наиболее сильных бурь за промежуток времени с 1908 по 1928 г. Буря продолжалась в течение 5 суток; за это время отмечены четыре импульса типа „внезапного начала“, каждый из которых наблюдался одновременно на всем земном шаре.

За исключением „внезапного начала“, в ходе магнитных бурь нельзя обнаружить характерных особенностей, которые проявлялись бы на всем земном шаре. Высокий пик и глубокая выемка, наблю-

даемые на магнитограммах, обычно, уже бесследно исчезают на станциях, удаленных от места наблюдения на расстояние земной полуокружности³³. Анализируя магнитограммы за 12 лет, с 1913 по 1924 гг., Уэльс³³ обнаружил только одно короткое и резкое возмущение, которое, несомненно, наблюдалось на всех станциях. Это была глубокая остроконечная депрессия на кривой рис. 9, которая имела место в 15¹⁵ по гриничскому времени.

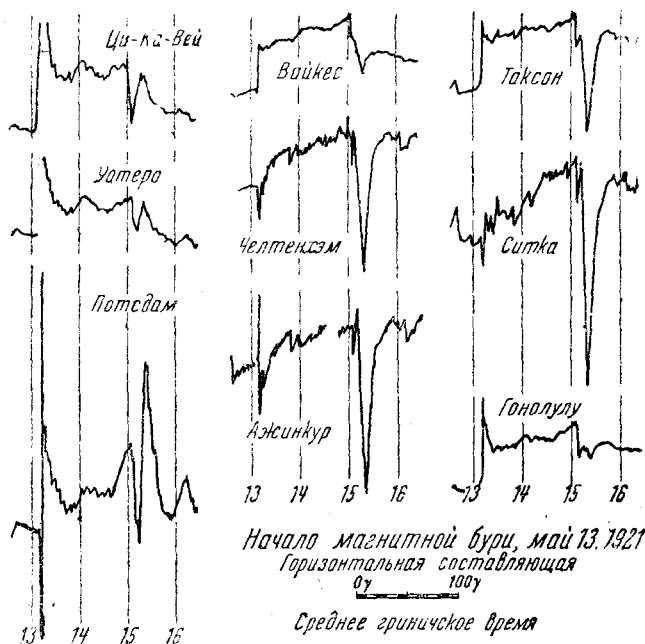


Рис. 9. Запись горизонтальной составляющей во время начала магнитной бури 13 мая 1921 г.

В магнитограммах в области низких³⁵ и средних широт резкие изменения, по характеру напоминающие „внезапное начало“, почти во всех случаях проявляются на всем земном шаре. Это, однако, уже несправедливо для магнитограмм, полученных в высоких широтах. Так например, на магнитограмме обсерватории Эскдалемюр (Eskdalemuir) (Шотландия) можно видеть большое число „внезапных начал“, помимо тех, которые уже зарегистрированы на всех других обсерваториях и которые уже не наблюдаются на удаленных магнитных станциях³⁶. Записи на станциях в полярных районах в течение магнитных бурь настолько неправильны, что в них можно обнаружить самые разнообразные изменения.

Первоначальное увеличение N в момент „внезапного начала“ часто характеризуют как первую фазу или „импульс“³⁷ магнитной бури. Вслед за этим увеличением в большинстве случаев рано или

поздно наблюдается заметное снижение N , относимое обычно ко второй фазе бури; это снижение сопровождается неправильными колебаниями поля, во время которых N уменьшается примерно на 100 γ относительно первоначального значения. К концу наблюдается „период последствий“, который тоже может сопровождаться

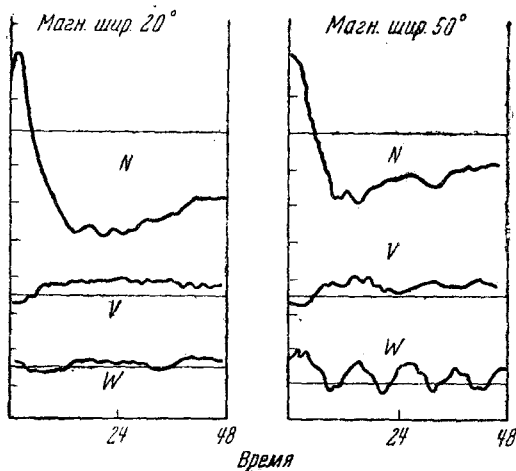


Рис. 10. Ход общих бурь на разных широтах³⁸; время отсчитывается с начала бури

колебаниями. Некоторые из этих особенностей можно заметить на рис. 7 и 8. Чэмпан³⁸ выбрал около 40 кривых хода бурь такого характера по наблюдениям на ряде обсерваторий, усреднил их и после вычета суточного хода спокойного дня подверг двоякой обработке, составив на их основании кривые изменения магнитного поля в функции „времени бури“ (начало отсчета времени соответствует началу бури), характеризующие бури с точки зрения всего земного шара, и кривые изменения магнитного поля по местному времени, характеризующие суточный ход возмущений в периоды бурь. Эти усредненные кривые приведены на рис. 10 и 11³⁸. Как следует из рис. 10, магнитные бури, рассматриваемые во „время бури“ на высоких и низких широтах, протекают приблизительно одинаково; рис. 11 показывает, что суточный ход возмущений в периоды бурь увеличивается вместе с широтой.

Плотность энергии в среде с магнитной проницаемостью μ при напряженности магнитного поля H выражается формулой

$$E = \frac{\mu H^2}{8\pi}. \quad (23)$$

Обозначим через x_0, y_0, z_0 и x, y, z средние составляющие H вдоль прямоугольных осей, соответственно, для спокойного и возмущенного состояния поля. Пусть далее $\Delta x = x_0 - x$, $\Delta y = y_0 - y$,

$\Delta z = z_0 - z$. Тогда изменение энергии E во время возмущения, при $\mu = 1$, представится в виде

$$\Delta E = \frac{(x_0 \Delta x + y_0 \Delta y + z_0 \Delta z)}{4\pi} + \frac{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2]}{8\pi} \quad (24)$$

или ввиду малой погрешности, отбрасывая второй член

$$\Delta E = \frac{H_0 \Delta H}{4\pi}. \quad (25)$$

Используя данные обсерватории Баудойн Харбор (Bowdoin Harbor), Соданкила (Sodankyla), Ситка (Sitka), Челтенхэм (Cheltenham),

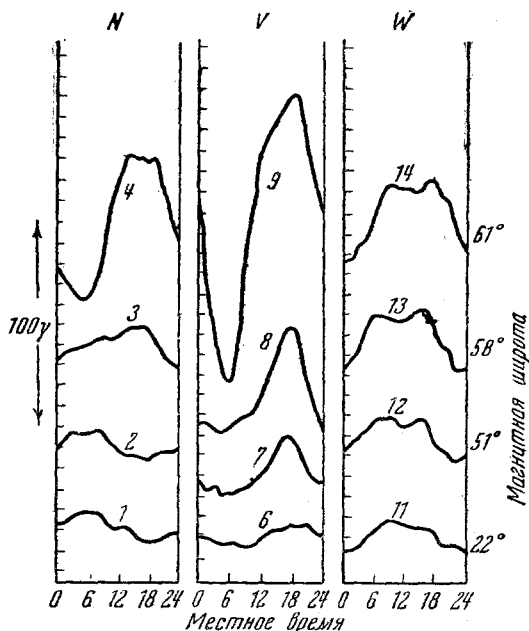


Рис. 11. Суточные изменения элементов магнетизма во время бурь на разных широтах

Туксон (Tucson), Вайкес (Vieques), Гонолулу (Honolulu), Антиполо (Antipolo), Гуанкайо (Huancayo), Пилар (Pilar), Вассукас (Vassuras) и Уатеро (Watheroo), Уэльс³³ вычислил среднее ΔE для бурь — 14 марта 1922 г. и 29 января 1924 г., продолжавшихся соответственно 17 и 26 час.

Результаты вычислений, представленные в виде кривой на рис. 12, показывают, что у магнитного экватора ΔE претерпевает явный максимум, между 20 и 40° магнитной широты — неглубокий минимум, затем достигает высокого максимума между 60 и 80° и постепенно уменьшается к магнитному полюсу, достигая у последнего

такого же значения, как и на широте 60° . Ход кривой ΔE соответствует кривой повторяемости полярных сияний³⁹. К таким же заключениям пришел Стэгг⁴⁰, проделавший аналогичное исследование.

Из рис. 12 также следует, что средняя плотность возмущенной энергии магнитного поля во время бурь составляет около 10^{-5} эрг/см³. Умножая эту величину на объем земли, получим 10^{22} эрг — полную энергию магнитной бури, которую следует увеличить до $3 \cdot 10^{22}$ для учета магнитного поля в пространстве вокруг земли. Если бы эта энергия получалась от солнца в течение 28 час., что

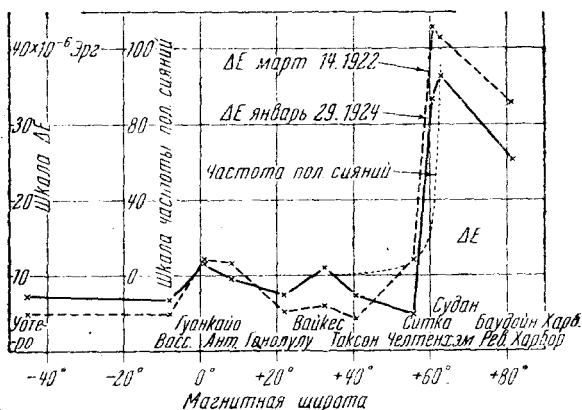


Рис. 12. Средние значения плотности энергии ΔE во время магнитных бурь 14 марта 1922 г. и 29 января 1924 г.³⁸

соответствует $3 \cdot 10^{17}$ эрг/сек, то это составляло бы небольшую долю от $2 \cdot 10^{24}$ эрг полной энергии солнечного излучения, получаемой землей каждую 1 сек.

Магнитные возмущения, радиосвязь, ионосфера и солнце

С введением в эксплуатацию коротковолновых радиолиний связи большой протяженности, работающих на волнах от 15 до 40 м, почти сразу было обнаружено, что во время сильных магнитных бурь радиосвязь подвергалась нарушениям, а подчас линии оказывались даже непригодными для эксплуатации. Как показывает анализ⁴¹, нарушения проявляются, главным образом, в дневное время: связь на радиолиниях, проходящих по освещенной половине земли, нарушается с начала бури, тогда как на линиях, погруженных в темноту, сохраняются нормальные условия до рассвета, когда связь может тоже нарушиться; нарушение дневной радиосвязи часто продолжается и после наступления темноты.

До сих пор мы располагаем лишь неполными сведениями о состоянии ионосферы во время магнитных бурь. Шефер и Гудалл⁷,

основываясь на собственных наблюдениях и на наблюдениях других авторов, пришли к заключению, что во время жестоких магнитных бурь увеличивается поглощение отраженного от ионосферы луча, сопровождаемое его рассеянием или расщеплением, что проявляется в большом числе лучей, отражаемых от слоев ионосферы, так незначительно отличающихся один от другого по высоте, что затрудняется их точное определение. Во время умеренных магнитных бурь, обычно, бывает затруднительно определить по наблюдениям за характером отражений о начинающемся возмущении. f_c слоев E и F_2 изменяется в зависимости от магнитного состояния лишь незначительно, f_c слоя F_1 с увеличением магнитной активности уменьшается, однако, только в редких случаях более чем на 20%.

Программа всемирного исследования ионосферы чрезвычайно выиграет от перехода к непрерывно регистрирующим установкам и от расширения спектра радиочастот. Можно надеяться, что в ближайшие несколько лет будут получены важные результаты, которые позволят многое разъяснить в явлениях земного магнетизма.

Уже в настоящее время сделаны новые открытия, позволяющие наметить линию дальнейших исследований. Деллинджер⁴² первый обратил внимание на новое явление в распространении коротких радиоволн на освещенной половине земного шара. Явление заключается во внезапном пропадании, обычно, на несколько минут, радиосигналов, причем полный процесс „фэдинга“ от начала ослабления до полного восстановления занимает около 15 мин. Это явление охватывает одновременно все дневные линии связи и вовсе не проявляется в ночное время. Такие „всеобщие радиофэдинги“ наблюдались во время магнитных бурь и, по крайней мере, в 1935 г. повторялись через 54 дня. Для проверки высказанного предположения о том, что причиной „всеобщих фэдингов“ является особого рода форма солнечной активности, были проанализированы полученные на обсерватории Маунт Вильсон спектрогелиограммы в линиях H_α водорода⁴³. В двух случаях фэдинга, 6 июля и 20 августа 1935 г., спектрогелиограммы были получены в надлежащее время и на них были обнаружены резкие и заметные изменения по форме и по интенсивности водородных флоккул, по времени, с точностью до нескольких минут, совпадающие с моментом фэдинга. В эти дни полные наблюдения за ионосферой не проводились.

Два обстоятельства казались очевидными: во-первых, что явление принадлежит к классу кратковременных, продолжаясь всего несколько минут, и, во-вторых, что для его дальнейшего исследования необходимо установить непрерывные наблюдения за солнцем, за радиосвязью и за ионосферой; непрерывные наблюдения за магнитным полем земли были уже „свершившимся фактом“ в течение многих лет. Период повторяемости в 54 дня, хотя его реальность еще не была установлена, по крайней мере давал указание о том, когда такие наблюдения могли вознаградить усилия.

24 октября 1935 г. наблюдалось водородное извержение умеренной яркости, сопровождавшееся частичным фэдингом, который на-

рушил связь на наиболее высоких частотах; в это же время была отмечена общая магнитная буря. Наблюдения за ионосферой⁴⁴ показали, что $f_c F_2$ слоя F_2 увеличилось за время с 10 по 23 октября до очень высокого значения и затем 24 октября упало до половинного значения, а 25 октября и в последующие дни вновь возвратилось к первоначальным высоким значениям. В это же время действительная высота F_2 24 октября возросла до 460 км, в то время как в предыдущие и последующие дни составляла всего 250 км.

Вслед за тем яркие извержения в линиях H_α были зарегистрированы 16 и 17 декабря 1935 г., но каких-либо необычных явлений в распространении радиоволн в эти дни не наблюдалось. Всеобщие фэдинги наблюдались 6, 14 и 17 февраля 1936 г., причем один из них, а именно 14, был особенно значителен. 6 февраля особых изменений в солнечной активности не было замечено, а облачная погода на обсерватории Маунт Вильсон помешала вести наблюдения с 10 по 19 февраля.

8 апреля 1936 г. на Маунт Вильсон⁴³ и Гуанкайо (Перу) наблюдалось исключительно яркое солнечное извержение, которое началось в 16⁴⁵ по гриничскому времени, увеличивалось по яркости до 16⁴⁷ и вернулось к нормальному состоянию в 17⁰³.

Глубокий и широкораспространенный фэдинг на дневных линиях радиосвязи начался в 16⁴⁶, 8 апреля, продолжаясь на разных частотах от 15 до 30 мин. Общая магнитная буря внезапно началась в 16⁴⁶ в Гуанкайо и за промежуток времени с 16⁴⁰ до 16⁵¹, составляющая N увеличилась на 108 γ. Отражение радиоволн от ионосферы внезапно прекратилось в 16⁴⁵ и восстановилось только час спустя. Яркие водородные извержения, всеобщий радиофэдинг и резкие изменения N и ионосферы представляют собой необычные, но ясно выраженные явления. Ричардсон⁴³ пришел к заключению, что, по крайней мере, в этом случае солнечная деятельность была непосредственно связана с явлениями на земле и что энергия передавалась со скоростью света.

Данные наблюдений за полярными сияниями

Повидимому, наиболее полную сводку фактов, относящихся к полярным сияниям, составили Кри⁴⁶ и Вегард⁴⁷. Кривая I на рис. 13, характеризующая зависимость среднего числа наблюдаемых сияний от магнитной широты местности, показывает, что максимальная повторяемость сияний³⁹ наблюдается на расстоянии примерно 23° от каждого из магнитных полюсов. Часть кривой, отвечающая широтам выше 67°, показана пунктиром, так как подробные данные в этой области отсутствуют; известно только, что повторяемость сияний на этих широтах уменьшается. Дифузные облака и пульсирующее свечение наблюдаются на высотах от 85 до 150 км, а лучи и колеблющиеся драпри — на высотах от 110 до 600 км^{48, 49}.

В области максимума полярных сияний сияния наблюдаются почти ежедневно; сияния распространяются в низкие широты во время

магнитных бурь, причем, чем интенсивнее магнитная буря, тем глубже распространяются сияния.

В периоды относительно спокойных магнитных условий на разных станциях не удастся заметить закономерности в суточном ходе сияний, который в большой степени определяется местными метеорологическими условиями в верхних слоях атмосферы (над станцией), как то: воздушными течениями и условиями возбуждения атмосферных атомов и молекул^{50, 51}. В продолжение сильных бурь движущиеся и окрашенные сияния наиболее часто наблюдаются в вечернее время, а диффузные слабые и спокойные формы — по утру.

Большое число спектральных линий полярных сияний отождествлено⁵² с эмиссионными линиями азотных молекул и кислородных атомов, причем бросающаяся в глаза зеленая линия ($5577 \text{ \AA}$) обусловлена метастабильным атомным кислородом. Линии гелия и водорода в спектре сияний не обнаружены. Штермер⁵³ обратил внимание на очень высокие сияния, окрашенные в фиолетово-серый цвет, достигающие иногда 1000 км . Они расположены в области, освещаемой солнцем. Спектр таких сияний заметно отличается от обычных сияний, расположенных в области земной тени, главным образом тем, что интенсивность зеленой линии слабее линий азотной серии^{53, 54}.

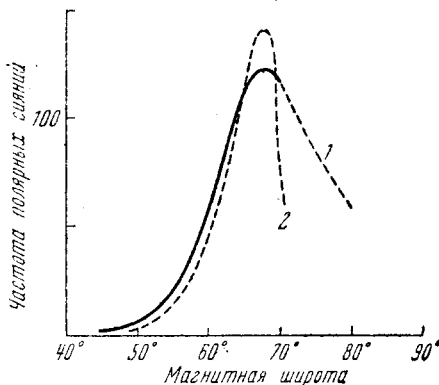


Рис. 13. Средняя повторяемость полярных сияний на разных широтах по наблюдениям (кривая 1)³⁹ и по вычислениям (кривая 2)

Корпускулярная теория магнитных бурь

Корпускулярная теория магнитных бурь в законченном виде не существует. В различное время высказывались предположения, что некоторые явления земного магнетизма обусловлены заряженными частицами, выбрасываемыми солнцем, но эти предположения либо страдали неопределенностью, либо оказывались несостоятельными. Уже давно было известно⁵⁵, что общее для всего земного шара увеличение N во время первой фазы магнитной бури может быть объяснено внезапным возникновением кольцевого тока, направленным на восток и опоясывающим землю, главным образом, в области тропиков, а уменьшение N во время второй фазы бури — таким же током, направленным на запад. Предполагая, что эти кольцевые токи составлены из электронов или положительных ионов, вопрос об их образовании, поддержании постоянного значения и исчезновении обсуждению не подвергался. Повидимому, число затруднений,

возникающих при выдвижении этого постулата, превышает число тех затруднений, которые удастся с его помощью разрешить.

Корпускулярная теория магнитных бурь, разработанная Чэпманом⁵⁷, не выдержала критики Линдемана⁵⁸, в результате чего автор был вынужден отказаться от своей теории⁵⁷. В этой теории предполагалось, что частицы одинаковых зарядов, выбрасываемые солнцем в виде корпускулярных лучей, попадают в наружные оболочки атмосферы, где производят движение проводящих слоев, направленное вниз. Вследствие динамо-эффекта [уравнение (12)] образуются восточные токи вокруг земли, вызывающие увеличение N во время первой фазы бури. Под действием электростатического отталкивания заряженных частиц вслед за движением, направленным вниз, следует расширение атмосферы вверх, при котором индуктируется западный ток, — вторая фаза бури. Между тем Линдеман, развивая выдвинутую Шустером⁵⁹ идею, пришел к заключению, что луч, составленный из частиц одинаковых зарядов, плотность которых соответствует энергии бури, вследствие электростатического отталкивания не может существовать в виде луча на расстоянии, большем чем один или два солнечных диаметра, кроме того, из-за заряда, который почти мгновенно приобретает земля, такие частицы могут падать на землю только в продолжение первых немногих секунд.

Чэпман и Ферраро⁶⁰ сделали попытку создать другую теорию, основанную на предположении, что солнце выбрасывает поток частиц, электрически нейтральный, который состоит из равного числа положительных и отрицательных зарядов. Они обволакивают землю на расстоянии 50 000 км или даже больше и благодаря своим диамагнитным свойствам приводят к увеличению N во время первой фазы магнитной бури. По мере того как заряженные частицы проникают в магнитное поле земли, положительные частицы отклоняются к западу, а отрицательные — к востоку. Была выдвинута идея, согласно которой частицы могли опоясывать землю, образуя западный ток, необходимый для объяснения второй фазы бури. Авторы, однако, пришли к заключению, что они не в состоянии объяснить физический процесс образования кругового тока. Чэпман⁶¹ по этому поводу недавно заметил, что „теория в целом представляется спекулятивной и трудной; повидимому, наиболее сомнительной частью ее является круговой ток, существование и образование которого объясняется очень неуверенно“. Теория была оставлена в схематической и незаконченной форме. Теория не давала объяснения суточным изменениям в ходе бурь и не разъясняла, каким образом частицы проникают в ионосферу и вызывают там наблюдаемые во время магнитных бурь изменения.

Корпускулярная теория полярных сияний¹⁾

Хорошо известная корпускулярная теория полярных сияний Биркеланда, Штермера и Вегарда⁴⁷ встречается с затруднением Шустера⁵⁹,

¹⁾ Эта глава сделана краткой и неполной вследствие того, что я был предупрежден редактором о готовящейся для журнала статье о полярных сияниях, в которой будет разобран вопрос о корпускулярной теории.

которое, как было отмечено Линдеманом⁵⁸ и Сванном⁶², эта теория никогда не могла обойти. Вычисления Штермера, посвященные фокусировке заряженных частиц магнитным полем земли в зоне полярных сияний, относятся к одной заряженной частице, например, к электрону или α -частице, в то время как теория полярных сияний должна оперировать с совокупностью (облаком) подобных частиц; было показано^{58, 60, 62}, что поток электронов или ионов или поток, состоящий из комбинации тех и других, не может быть причиной полярных сияний. Чэпман и Ферраро⁶³ заключают, что „пересмотр условий, в которых протекает движение потока от солнца до земли, заставил нас окончательно отказаться от соблазнительного предположения, что хотя бы часть потока, достаточная для объяснения образования полярных сияний, может достигнуть земли, отклоняясь таким же образом, как и отдельные корпускулы в штермеровской теории (или хотя бы приблизительно следуя этому закону); наша работа подтвердила заключение Линдемана, что единственно приемлемой формой потока является поток, который с большим приближением можно считать электрически нейтральным“.

Теория ультрафиолетового излучения, общие соображения

Теория ультрафиолетового излучения в применении к магнитным бурям и полярным сияниям была разработана в деталях, притом даже в количественном отношении, в ряде работ^{41, 50, 64}.

Здесь приводится описание наиболее существенных физических идей, на которых основана эта теория. Как показывает табл. 1, в столбе атмосферы 1 см^2 сечения, над уровнем 300 км , содержится примерно 10^{16} молекул. Выше этого уровня частицы практически не претерпевают столкновений, а совершают движения вверх и вниз (как бы „прыжки“); вверх — под действием сил, направленных вверх, образующихся при соприкосновении с другими частицами¹⁾, а вниз — под влиянием силы тяжести. Такой именно нам представляется наружная граница атмосферы. 10^{16} молекул на высоте 300 или 400 км испытывают 10^{14} столкновений. При температуре 360° К нормальное соприкосновение сообщает частице скорость порядка 1 км/сек , которая редко выбрасывает частицу на высоту свыше 2000 км .

Предполагается, что во время спокойного периода солнечной деятельности, т. е. в отсутствие магнитных бурь и полярных сияний, 10^8 из 10^{16} соприкосновений являются столкновениями второго рода с возбужденными молекулами и атомами, при которых молекулы получают скорость 10 км/сек . В течение времени от 3 до 6 час. они достигают высоты $40\,000$ — $80\,000 \text{ км}$ и если остаются не ионизированными, то попадают обратно на землю по различным орбитам,

¹⁾ При приближении к другим частицам. *Прим. переводчика.*

форма которых определяется, как это следует из рис. 14, первоначальным углом вылета.

Предполагается, что в течение 3 или 6 час. полета действием ультрафиолетового солнечного излучения частицы ионизируются. Будучи ионизированы, они продолжают свое движение уже вдоль магнитных силовых линий и попадают в область высоких широт атмосферы, выделяя свою энергию в форме полярных сияний и магнитных возмущений. Поток энергии на разных широтах был вычислен, и результаты расчета показаны в виде пунктирной линии на

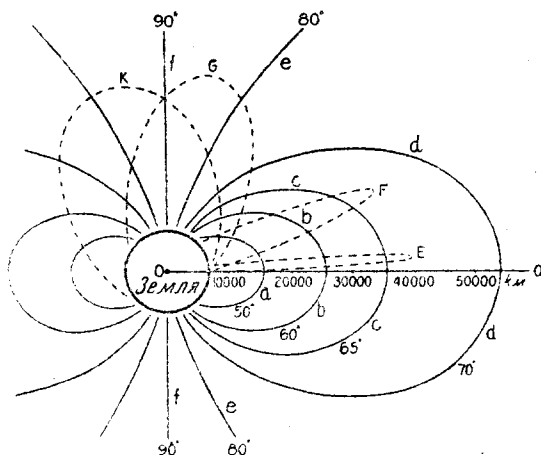


Рис. 14. Кривые *a, b, c* и т. д. представляют собой силовые линии магнитного поля земли. Цифры у этих кривых обозначают магнитную широту, в которой линии входят в землю. Кривые *E, F, G* и *K* представляют собой траектории частиц, выброшенных с земли со скоростью 10 км/сек, под углом с вертикалью, соответственно в 1, 22, 45 и 60°

рис. 13, находящейся в хорошем соответствии с кривой *I*. Энергия, переносимая при сделанных выше предположениях в область полярных сияний, составляет $5 \cdot 10^{13}$ эрг/сек, которую можно считать достаточной для спокойного сияния, но далеко недостаточной для образования мощных сияний, энергия которых достигает 10^{15} эрг/сек⁶⁴.

Далее предполагается, что во время активных периодов солнце излучает в течение получаса интенсивную ультрафиолетовую радиацию. Если, к примеру, $1/10\,000$ часть солнечной поверхности излучала бы как черное тело при температуре 30 000° К, то солнечная постоянная увеличилась бы на 0,74%, а солнечная энергия на волнах 3500, 4000, 5000 и 6000 Å — соответственно на 3,2; 1,7; 0,75 и 0,032%. Соответствующие значения колебаний солнечной энергии, которые наблюдались⁶⁵ в короткие промежутки времени (около часа), составляют примерно 1,8, 2,1 и 0,2%, достигая, подчас,

еще более высоких значений. Энергия ультрафиолетового излучения в областях 3000—2000, 2000—1000 и 1000—0 Å выражается величиной, соответственно в 1,5, 10^2 и 10^5 раза большей. Вычисления, аналогичные проделанным и основанные на законах излучения черного тела, следует рассматривать только лишь как иллюстративные, которые, быть может, очень далеки от действительности, так как несомненно, что эмиссионные линии и линии поглощения играют немаловажную роль. Эта энергия увеличивает ионизацию верхних слоев атмосферы и высоко подбрасываемых частиц, является причиной нагревания, расширения и возникновения течений в верхних слоях атмосферы, что в свою очередь дает начало полярным сияниям и магнитным возмущениям.

Теория ультрафиолетового излучения в применении к полярным сияниям

В спектре ультрафиолетовых солнечных вспышек длины волн короче границы серии данного атома, повидимому, наиболее действительны для ионизации атома, тогда как более длинные волны производят только возбуждение атомов. Вообще же можно предположить существование некоторых разновидностей ультрафиолетовых вспышек, а именно: 1) вспышек, содержащих, главным образом, возбуждающие длины волн, и 2) вспышек, которые содержат как возбуждающие, так и ионизирующие длины волн различной интенсивности, и т. д. Вспышки первого типа вызывают появление большого числа возбужденных атомов. Эти атомы в свою очередь стимулируют появление высоко подбрасываемых атомов или молекул, которые, подвергаясь ионизации, падают в полярные области и создают полярные сияния. Так как подобные вспышки не вызывают ионизации в умеренных широтах, то они не должны сопровождаться общими магнитными бурями. Следовательно, в этих случаях сильные полярные сияния в высоких широтах могут и не сопровождаться магнитными возмущениями в умеренных широтах, по крайней мере, настолько сильными, чтобы их можно было классифицировать как бури. Примеры этому можно найти в сильных полярных сияниях в области Антарктики 20 и 27 апреля и с 18 по 21 июня 1908 г. в Кэп Ройдс⁶⁶, 29 мая, 19 июня и 7 июля 1913 г. в Кэп Денисон (Cape Denison). Магнитное поле на этих станциях во время сияний было возмущено⁶⁶, тогда как в умеренных широтах магнитные бури ни в день сияний, ни в ближайшие дни не были зарегистрированы. Много ярких сияний, не сопровождавшихся магнитными бурями в умеренных широтах, было отмечено во время экспедиции на „Мод“⁶⁷ с 1922 по 1925 г. в Северном ледовитом океане у берегов Сибири.

Вспышки второго типа, в дополнение к большому числу образуемых ионов, создают также много подбрасываемых вверх частиц, которые вследствие необычной интенсивности ионизирующих волн оказываются ионизованными еще задолго до того, как они достигнут больших высот. Частицы вследствие этого не попадают в полярные области, а, следуя вдоль магнитных силовых линий

поля земли, проникают в умеренные широты, притом в достаточном числе для того, чтобы вызвать появление полярных сияний. В соответствии с этим можно предположить, что сильные магнитные бури должны сопровождаться полярными сияниями в высоких областях умеренных широт, притом, чем сильнее магнитная буря, тем глубже в южные широты должны проникать полярные сияния. Проникновение полярных сияний в область южных широт было замечено уже давно⁶⁸. Полярные сияния в умеренных широтах наблюдались Бэрнардом⁶⁹ на Иеркской (Jerik) обсерватории за время с 1902 до 1909 гг. в течение 140 ночей; 120 из этих сияний сопровождалось магнитными бурями.

В те ночи, когда было отмечено отсутствие магнитных бурь, полярные сияния были слабыми, и вполне вероятно, что магнитные возмущения, которые могли наблюдаться в это время, были недостаточно сильными для того, чтобы отнести их к классу бурь.

Частица, вылетающая вверх из атмосферы со скоростью 10 км/сек достигает высоты 40 000 км примерно через 3 часа. Если на этой высоте частица под действием солнечных лучей ионизируется, то на ее обратное падение в полярную область потребуется несколько часов; точное время зависит от извилистости ее спиральной траектории и от скорости в момент ионизации, полагая, что единственными факторами, влияющими на ион, являются сила тяжести и магнитное поле земли. Возможно действие других причин, как то: светового давления, электрического поля и др.; однако установить, насколько велико их значение, не представляется возможным.

После падения на высоту от 300 до 400 км дальнейшее опускание ионизированной частицы происходит путем диффузии⁶⁴, причем, как показывают вычисления, для достижения высоты 100 км требуется от 3 до 6 час. Если ультрафиолетовая вспышка, вызывающая миграцию ионов в полярные области, в то же время создает сильную ионизацию в верхних слоях атмосферы, а, стало быть, является причиной магнитной бури, то полярное сияние должно наблюдаться спустя несколько часов после начала бури. Вследствие того, что миграция ионов к полюсам во время вспышек большой интенсивности может быть прервана, то есть основание полагать, что запаздывание в появлении сияний в высоких широтах будет большим в случае длительных и интенсивных магнитных бурь, чем в случае коротких бурь.

Наблюдения за полярными сияниями, как это видно из отчетов Британской и Австралийской антарктических экспедиций^{60,70}, а также Арктической экспедиции на „Мод“⁶⁷, подтверждают приведенные выше теоретические предположения. На рис. 15 приведены данные наблюдений за полярным сиянием в Кэп Денисон (Антарктика) и отмечены начало и конец весьма сильной магнитной бури, которая началась 17 сентября 1912 г. в 2⁰⁰ часа. Полярное сияние наблюдалось 40 час. спустя после начала бури.

Имелось всего 11 магнитных бурь, по которым наблюдения в Антарктике и Арктике были настолько полными, что оказалось возможным построить кривые, аналогичные рис. 15. Обработка

этих материалов показывает⁶⁴, что полярные сияния начинаются примерно сутки спустя после возникновения магнитной бури в низких широтах и что промежуток времени между сиянием и бурей увеличивается для магнитных бурь большой интенсивности; впрочем, ввиду недостаточного числа наблюдений последний вывод не может считаться совершенно достоверным. Производя обширный статистический анализ наблюдений за полярными сияниями во время первой антарктической экспедиции Бёрда, Дэвис⁷¹ получил дальнейшее подтверждение существования „явления запаздывания“ и пришел к заключению, что „сравнение ежедневных характери-

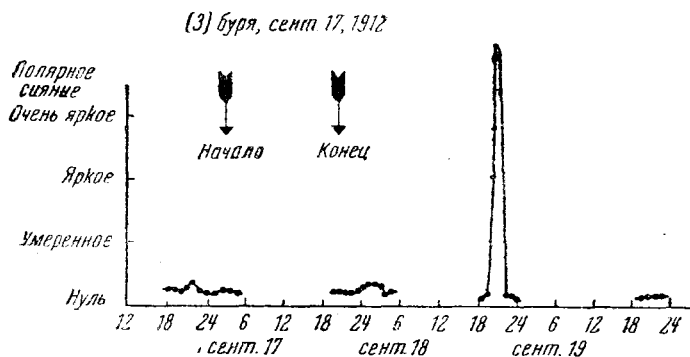


Рис. 15. Интенсивность полярных сияний в Кэп Денисон (Антарктика) и магнитная буря 17 сентября 1912 г.

ческих чисел полярных сияний и международных магнитных индексов показало явную связь между максимумом полярных сияний и максимумом кривой магнитных индексов; максимум сияний имел место либо в тот же день, либо сутки спустя“.

Нет указаний на то, что спектр полярных сияний был воспроизведен в лабораторных условиях. Каплану⁷² удалось получить много особенностей спектра сияний, наблюдая тихий разряд в кислороде и азоте, и собрать важные сведения о процессах возбуждения атомов. В результате этих опытов могут быть получены весьма ценные сведения о физическом состоянии атмосферы во время полярных сияний.

В заключение следует заметить, что все теории полярных сияний являются скорее геометрическими теориями, ибо они, главным образом, трактуют о механизме передачи энергии в область полярных сияний, оставляя совершенно в стороне вопрос о том, каким образом осуществляется переход энергии в полярный свет. Полная теория должна дать ответ и на эти вопросы и должна среди прочего основываться на точном знании уровней энергии атмосферных атомов и молекул, метастабильных состояний и вероятностей их переходов, точно так же, как на знании процессов возникновения полярного света. Затем, уже давно напрашивалась идея, согласно

которой процесс излучения полярного света определяется не только энергией потока ионов, но также подходящими, а может быть даже критическими условиями, в которых находится та область атмосферы, в которую проникает поток; эти условия могут зависеть от случайных причин, как то: атмосферных течений и состояния возбуждения атомов и молекул.

Теория ультрафиолетового излучения в применении к магнитным бурям

Активная область (область вспышки), занимающая $1/10\,000$ часть поверхности солнца при температуре $30\,000^\circ$, будет посылать на землю энергию 10^{22} эрг/сек, что примерно соответствует средней энергии магнитной бури, продолжающейся одни сутки. Следовательно, меньшая по площади активная поверхность или менее мощная вспышка, продолжающаяся более 1 сек., также способна создать энергию бури. Излучение этой вспышки охватывает ионизирующие длины волн короче $1500 \text{ \AA}$, которые вызывают увеличение ионизации в области длинных и коротких свободных пробегов над освещенной половиной земного шара; вспышки с различными спектральными характеристиками могут увеличивать ионизацию в области длинных и коротких свободных пробегов в разных пропорциях. Увеличение ионизации в области длинных пробегов увеличивает восточный ток $5 \cdot 10^6 \text{ А}$, опоясывающий землю, вследствие чего N возрастает, а V уменьшается, как это и наблюдается во время первой фазы бури. Увеличение ионизации в области коротких пробегов влечет за собой увеличение проводимости и, следовательно, увеличение западного дневного тока. Вследствие этого восточный ток $5 \cdot 10^6 \text{ А}$ уменьшается, и как бы возникает западный ток, опоясывающий землю; N уменьшается, а V увеличивается, как это имеет место при второй фазе бури.

Кроме того, имеют место добавочные явления, одинаково присущие всем типам вспышек, как, например, нагревание верхних слоев атмосферы на уровне 100 км . Нагревание влечет за собой расширение атмосферы, которое в свою очередь является причиной динамо-эффекта и „задерживающего эффекта“ (engulfing effect). Динамо-эффект обусловлен движением вверх воздушных масс в поле H и наиболее ярко проявляется в низких широтах, где H приблизительно горизонтально. Динамо-эффект создает западное электрическое поле и западный ток вокруг земли, уменьшающий N . При скорости движения области коротких пробегов (рис. 1) вверх в 10 км/час N уменьшается у экватора приблизительно на 100γ . „Задерживающий эффект“, проявляясь с наибольшей силой также в зоне тропических широт, обусловлен тем, что когда H , приблизительно, горизонтально, ионы с длинными пробегами в промежутке между столкновениями могут проходить лишь короткое расстояние в направлении, перпендикулярном H и, следовательно, частично исключаются из свободного движения вверх нейтральных частиц

расширяющейся атмосферы. Таким образом после начала магнитной бури большое число ионов в области длинных пробегов участвует в общем движении вверх молекул воздуха; длина их пробега укорачивается и они превращаются в ионы с короткими пробегами. Вследствие того, что ионы испытывают большое число столкновений до момента, пока наступает рекомбинация, дневная область коротких пробегов увеличивается за счет области длинных пробегов, в результате чего и возникает западный ток.

Мы можем представить себе последовательность явлений в общей буре подобно изображенной на рис. 10 следующим образом: вспышка ультрафиолетового излучения прежде всего вызывает увеличение ионизации в области длинных пробегов, что влечет за собой появление восточного тока и возрастание N сверх нормального значения (первая фаза бури). Во второй фазе проявляется тепловой эффект вспышки, верхние ионы атмосферы расширяются, ионизированный слой движется вверх, и N на несколько часов уменьшается. Когда движение вверх в слое прекращается, N , казалось, должно было возрасти до первоначального значения (выше нормального); однако к этому времени вследствие „задерживающего эффекта“ уменьшается область длинных свободных пробегов, и, стало быть, N опять оказывается меньше нормального значения. После прекращения вспышки N медленно возрастает до своего нормального значения, излишняя ионизация уменьшается, и атмосфера приходит в невозмущенное состояние.

Часто встречаются магнитные бури, которые начинаются не с увеличения N и которые состоят из одной второй фазы; примером такой бури может служить третья кривая на рис. 7. В этих случаях можно предположить, что вспышка, главным образом, излучает энергию, нагревающую верхние слои атмосферы и производящую в основном ионизацию области коротких свободных пробегов. Бури, состоящие из одной первой фазы, встречаются крайне редко; для их образования вспышка должна увеличивать ионизацию только в области длинных пробегов, не производя заметного нагревания. Неправильные и местные возмущения могут вызываться движениями ионизированных слоев под действием ветров и индуктированными земными токами.

Изменения суточной кривой хода бурь (рис. 11) объясняются действием высоко подбрасываемых ионов, попадающих в полярные области. Полагая, что земля в целом не несет заряда, можно показать⁶¹, что частицы, вылетающие у полуденного меридиана на низких широтах, попадают, уже в виде ионов, на высоте 300—400 км в высокие широты в 13 и 14 час.; здесь они замедляются в своем движении и, диффундируя, опускаются еще на 200 км в течение следующих 3 или 6 час. Обладая длинными свободными пробегами, эти ионы создают восточный ток гравитационно-магнитного дрейфа, и если проводимость верхних слоев атмосферы меняется в зависимости от зенитного угла, следуя приблизительно уравнению (16), то они вызывают распределение тока, изображенное на рис. 16. Такая система токов вызывает суточные изменения хода бурь,

изображенные на рис. 11. Как было показано, теория приемлема и с количественной стороны. В это же время воздушные течения в ионизированных областях атмосферы, возникающие на границе освещенности и направленные от дневной к ночной половине земного шара, вызывают значительной силы неправильные магнитные возмущения. Возможно, что увеличение энергии магнитных возмущений, наблюдаемое на высоких широтах, как это видно из рис. 12, обусловлено именно этими течениями.

Новые наблюдения за одновременностью всеобщих радиофэдингов, изменениями в ионосфере, магнитными возмущениями и солнечными извержениями⁴⁵ дают детальные доказательства правильности ультрафиолетовой теории. Однако вместо того, чтобы преждевременно искать окончательного

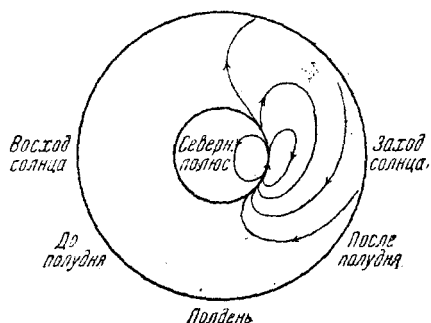


Рис. 16. Теоретическое распределение электрических токов в верхних слоях атмосферы, производящих суточные изменения поля во время магнитных бурь

подтверждения теории, лучше выждать результатов будущих экспериментов. Вполне вероятно, что многие из этих явлений могут протекать иным образом; например, некоторые из всеобщих фэдингов или изменений в ионосфере могут протекать без магнитных возмущений или видимых явлений на солнце и обратно, и только в случае ярко выраженных явлений между ними наблюдается причинная связь.

Длины волн ультрафиолетового излучения, вызывающие земные явления, экранируются атмосферой от непосредственных наблюдений, и вследствие этого они, как правило, невидимы. И только если вспышка сопровождается длинноволновой радиацией, что, надо сказать, вовсе не обязательно, излучение может сделаться явным. Поэтому в ряде случаев вспышка может ускользнуть от наблюдений. Наконец, активная область при вспышке может быть очень маленькой точкой на солнечном диске или группой таких точек, недоступных наблюдениям.

Очень интересная программа наблюдений за протуберанцами, начатая в 1928 г., была проведена Перепелкиным⁷³ в Пулковской обсерватории. Им обнаружено, что отношение i интенсивности линии H_ϵ бальмеровской водородной серии к резонансной линии H кальция меняется вместе с магнитной активностью W_D , как это показано на рис. 17, где W_D — суточная амплитуда склонения в Случке. Корреляция между i и W_D была больше, нежели между относительным числом солнечных пятен и W_D . Это является совершенно новым экспериментальным фактом, стоящим в стороне от теорий. Перепелкин отмечает, что, к несчастью, новый индекс i относится только к краям солнечного диска, где только и можно наблюдать спектр протуберанцев. Среднее значение i оказалось

практически одним и тем же на разных гелиографических широтах, но индивидуальные значения менялись от протуберанца к протуберанцу, что давало повод полагать, что причина изменений i обусловлена не солнцем в целом. Была выдвинута гипотеза о существовании на поверхности солнца пятен, богатых ультрафиолетовым излучением. В случае постоянства относительного числа водородных и кальциевых атомов это излучение увеличивает интенсивность H_e в большей степени, нежели H , что сопровождается увеличением i .

Теория „узкого пучка“ и „широкого ненаправленного излучения“ при солнечных извержениях

Были выдвинуты две теории, трактующие о возможной форме активных солнечных излучений, которые дают начало магнитным возмущениям. Одна теория предполагает, что солнечное активное излучение представляет собой узкий пучок⁷⁴ подобно прожектору, а вторая, что излучение представляет собой нечто вроде извержения вулкана⁶⁴, т.е. носит ненаправленный характер. Статистика магнитных бурь^{75, 76} показывает, что возмущенные условия имеют тенденцию повторяться примерно через 27 дней, и для объяснения этого Мондер⁷⁴ предположил, что возмущающее солнечное излучение исходит из ограниченных областей солнечной поверхности в виде узких пучков лучей, вращающихся вместе с солнцем. Синодический период обращения солнечных пятен выражается цифрами 26,9; 27,3; 28,3 суток соответственно на гелиографических широтах 0, 15 и 30°; период вращения обращающегося слоя примерно на 2% меньше. Таким образом, если период вращения луча совпадает с периодом вращения солнечной поверхности, то возмущающие очаги должны быть расположены около солнечной широты 15°. В предположении, что непосредственной причиной магнитных бурь являются подобные лучи и допуская, что излучение распространяется со скоростью света, можно вычислить ширину луча, которая оказывается равной 13° для бури, продолжающейся одни сутки, и 1° — для двухчасового магнитного возмущения; при меньшей ско-

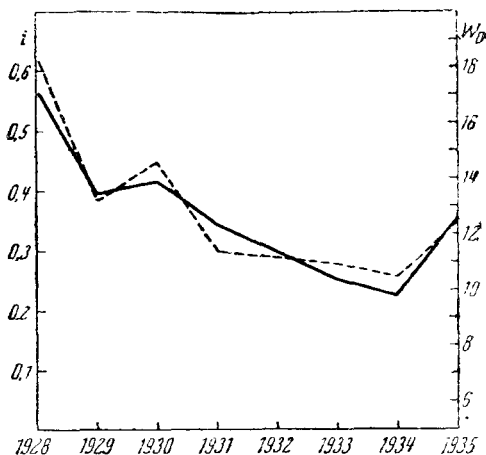


Рис. 17. Отношение $i = \frac{H_e}{H}$ в солнечных протуберанцах и магнитные возмущения W_D по наблюдениям в Служке

узких пучков лучей, вращающихся вместе с солнцем. Синодический период обращения солнечных пятен выражается цифрами 26,9; 27,3; 28,3 суток соответственно на гелиографических широтах 0, 15 и 30°; период вращения обращающегося слоя примерно на 2% меньше. Таким образом, если период вращения луча совпадает с периодом вращения солнечной поверхности, то возмущающие очаги должны быть расположены около солнечной широты 15°. В предположении, что непосредственной причиной магнитных бурь являются подобные лучи и допуская, что излучение распространяется со скоростью света, можно вычислить ширину луча, которая оказывается равной 13° для бури, продолжающейся одни сутки, и 1° — для двухчасового магнитного возмущения; при меньшей ско-

рости распространения ширина луча соответственно уменьшается. Объяснение „внезапного начала“ магнитных бурь требует резко выраженного переднего края (фронта) луча. Это строгое требование к форме луча вызвало блестящее замечание Кри⁷⁷: „Выдвигаемая теория едва ли отвечает физической стороне проблемы, но она ясна и определена и не затемняется сложными формулировками. Она, конечно, недостаточно полна и может быть совершенно ошибочна, но все же чрезвычайно соблазнительна...“

Теория вращающегося узкого луча встречает затруднения в разных направлениях. Вращение поверхности солнца ускоряется примерно на 60% за время от минимума до максимума числа пятен⁷⁸; однако систематического удлинения или укорочения 27-дневного периода повторяемости обнаружено не было как в отношении ряда лет с большим или малым числом пятен, так и для пятен, расположенных в высоких и низких широтах.

Уже давно обнаружено, что магнитная активность подвержена годовым изменениям, следуя в первом приближении синусоидальному закону, с максимумом в равноденствие и минимумом при солнцестоянии, причем в период максимума число бурь увеличивается почти в два раза⁷⁹.

Теория узкого луча объясняет годовые изменения наклоном солнечной оси относительно земной, иными словами, годовыми колебаниями „гелиографической широты земли“⁸⁰.

Строгое исследование этой теории, проведенное Бартельсом⁷⁶, показало ее несостоятельность; более детальные сведения можно найти в его статье. Мэрис⁷⁹, основываясь на предположении, что ультрафиолетовая вспышка создает ненаправленное, с широким углом излучение, произвел детальные вычисления, которые привели его к убедительному объяснению годовых изменений магнитных возмущений, основанных на наклоне солнечной оси относительно земной.

В то же время он обратил внимание на то, что не все магнитные возмущения солнечного происхождения и что по крайней мере некоторые из них обусловлены прохождением земли через области, заполненные планетными осколками.

Мэрис и Хальберт⁸¹ указали, что по наблюдениям за кометами можно судить о ширине активного солнечного излучения. Они основывались на том, что солнечная радиация, вызывающая на земле магнитные бури и полярные сияния может быть в то же время причиной некоторых изменений в кометах.

Были произведены наблюдения над многими неправильными и, казалось, не подчиняющимися никаким законам явлениями в поведении комет, хорошо известными из истории комет, к которым относятся: внезапное увеличение яркости, раскалывание на отдельные куски, образование новых хвостов и т. д. При этом было найдено, что в большинстве случаев такого рода явления следовали непосредственно за магнитными возмущениями.

Сопоставление положений солнца, земли и кометы для 28 подобных явлений показало, что средний угол раствора солнечного

излучения составляет около 90° . Непосредственная связь явлений на кометах с магнитными возмущениями совершенно необъяснима в теории „узкого пучка“.

На основании этого можно заключить, что доказательства складываются в пользу теории излучения „под широким углом“ и против теории „узкого пучка“. Это заключение, однако, оставляет без объяснения повторяемость магнитных бурь. Специально для объяснения этого было высказано предположение, что периодическое возникновение вспышек обусловлено особым рода пульсациями солнца⁸¹. Таким образом обе точки зрения являются одинаково непривычными, так как основаны на непредвиденных свойствах солнечных вспышек: теория вращающегося пучка требует физически необоснованного, узкого луча, а теория широкого излучения — пульсирующего „гейзерного“ действия солнца, период которого по случайному совпадению почти тот же, что и период обращения солнца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше были рассмотрены и сопоставлены между собой теории вариаций магнитного поля земли и теории полярных сияний.

Теории солнечных суточных вариаций могут быть основаны на динамо-эффекте, на явлениях диамагнетизма и на токах дрейфа. Теория атмосферной динамо требует высоких значений проводимости верхних слоев атмосферы, на первый взгляд, больших тех значений, которые показывают измерения ионосферы; однако нельзя сказать, что наблюдения над ионосферой, безусловно, исключают такую проводимость. В дополнение эта теория требует общей циркуляции воздуха в верхних слоях атмосферы, как если бы воздух растекался во все стороны от области, расположенной под солнцем. Такая система течений, вообще говоря, возможна; однако существование ее не доказано. Диамагнитная теория также требует ионизации, большей, чем та, которая предполагалась; однако и здесь наблюдения за ионосферой определенно не отвергают возможности такой ионизации. Эта теория проще теории атмосферной динамо, так как она не требует общей циркуляции атмосферы. Теория токов дрейфа, как было показано, требует распределения ионизации в атмосфере, находящегося в противоречии с гипотезой, согласно которой ионизация вызывается ультрафиолетовым излучением солнца. Данные ионосферы находятся в соответствии с этой теорией.

Единственной теорией лунных вариаций земного магнетизма является динамо-теория, которая полагает, что влияние луны вызывается приливными движениями в верхних слоях атмосферы. Вычисления, основанные на наблюдениях за колебаниями атмосферного давления на уровне моря, приводят к правильному характеру магнитных лунных вариаций, которые, однако, различаются от наблюдаемых вариаций по фазе. Это расхождение представляется серьезным и до сих пор не получило объяснения.

Теории магнитных бурь и полярных сияний основаны на предположении, что явления эти обусловлены потоками исходящих от солнца заряженных частиц или ультрафиолетовым излучением. Полной корпускулярной теории, находящейся в соответствии с наблюдаемыми явлениями, предложено не было.

Различные неполные теории встречались с фундаментальными затруднениями, которые они никогда не могли преодолеть; например, вследствие сил электростатического отталкивания, действующих на пути от солнца до земли, поток заряженных частиц не может обладать у земли энергией, достаточной для заметного возмущения магнитного поля земли. Теория ультрафиолетового излучения удачно объясняет сложные изменения магнитного поля земли во время бурь: полярные сияния, проникновение сияний во время сильных бурь в низкие широты, отставание в появлении сияний после начала бурь и другие наблюдаемые факты. Недавние наблюдения за ионосферой, распространением радиоволн и солнечными извержениями показали, что в ряде случаев солнечное излучение, вызывающее различные явления на земле, распространяется в пределах точности наблюдений со скоростью света, что послужило новым и существенным подтверждением ультрафиолетовой теории.

Повторяемость магнитных возмущений может быть объяснена гипотезами, согласно одной из которых солнечное излучение, вызывающее возмущение, выбрасывается солнцем в виде узкого пучка, не шире 10° , вращающегося вместе с солнцем; другая гипотеза полагает, что извержение происходит под широким углом и периодически повторяется. Обе теории одинаково непривычны, как основанные на непредвиденных свойствах солнечных вспышек: теория вращающегося пучка требует физически необоснованного тонкого луча, а теория широкого излучения — повторяющегося гейзерного действия или пульсаций. Наблюдения за земными явлениями и за кометами приносят доказательства, которые являются благоприятными для теории широкого излучения и неблагоприятными — для теории узкого луча.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maris, Terr. Mag. a Atmos. Elec., **33**, 233, 1928; **34**, 45, 1929.
2. Hulburt, Publ. Ast. Soc. Pacific, **44**, 178, 1928.
- 2a. Prokofiew a. Goltzman, Nature, **133**, 918, 1934; Paneth a. Glückauf, Nature, **136**, 717, 1935; Lepape a. Colange, Nature, **137**, 459, 1936; Regener, Nature, **138**, 544, 1936; Shepherd, National Geographic Soc.-U. S. Army Air Corps Stratosphere Flight of 1935, Technical Papers, p. 117, 1936.
3. Frankенberger, Ann. d. Hydrographie u. Maritimen Meteorologie, **59**, 20, 1931.
4. Gowan, Proc. Roy. Soc., A **128**, 531, 1930.
5. Martyn a. Pulley, Proc. Roy. Soc., A **154**, 455, 1936.
6. Hulburt, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **40**, 193, 1935; Proc. Inst. Rad. Eng., **23**, 1492, 1935.
7. Kirby, Berkner a. Stuart, Proc. Inst. Rad. Eng., **22**, 481,

- 1934; Berkner a. Wells, Proc. Inst. Rad. Eng., **22**, 1102, 1934; Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **39**, 209, 1934; Gilliland, Nat. Bur. Standards J. Res., **14**, 283, 1935; Kirby a. Judson, Nat. Bur. Standards, J. Res., **14**, 469, 1935; Schafer a. Goodall, Proc. Inst. Radio Eng., **19**, 1434, 1931; **20**, 1131, 1932; **23**, 1670, 1935.
8. Breit a. Tuve, Phys. Rev., **28**, 554, 1926.
9. Hulburt, Phys. Rev., **31**, 1018, 1928; **34**, 1167, 1929; **35**, 240, 1930
- 39**, 977, 1932.
10. Pedersen, The Propagation of Radio Waves, 1927, Chap. VII.
11. Page, Phys. Rev., **34**, 763, 1929.
12. Maris a. Hulburt, Phys. Rev., **33**, 412, 1929.
13. Chapman, Proc. Roy. Soc., **A 122**, 369, 1929.
14. Page, Phys. Rev., **33**, 553, 823, 1929.
15. Gunn, Phys. Rev., **32**, 133, 1928; Terr. Magg. a. Atmos. Elec., **34**,
- 17**, 1929.
16. Angenheister, Handb. d. Physik, **15**, 302, 1927.
17. Schuster, Phil. Trans. Roy. Soc., **A 180**, 467, 1889; **208**, 163, 1908.
18. Bartels, Handb. Exp. Physik, **25**, 630, 1928.
19. Humphreys, Physics of the Air, 1929, Chap. 14.
20. Chapman, Quarterly J. Roy. Met. Soc., **45**, 113, 1919; Nature, **103**,
- 185**, 1919.
21. Walker, Proc. Roy. Soc., **A 89**, 379, 1914.
22. Chapman, Phil. Trans. Roy. Soc., **A 218**, 1, 1919; **225**, 49, 1926.
23. Chapman, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **34**, 1, 1929.
24. Cowling, Roy. Ast. Soc., Monthly Notices, **90**, 140, 1929; **92**,
- 407**, 1932.
25. Van Leeuwen, J. de physique, **2**, 361, 1921.
26. Darrow, Electrical Phenomena in Gases, 1932, p. 200.
27. Hulburt, Physics, **4**, 196, 1933; Young a. Hulburt, Phys. Rev.,
- 50**, 45, 1936.
28. Bauer, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **28**, 1, 1923.
29. Bartels, Die höchste Atmosphärenschichten, Berlin 1928.
30. Chapman, Dictionary of Applied Physics, Glazebrook **2**, 543, 1922.
31. Van Bemmelen, Meteor. Z., **5**, 218, 1912; **12**, 589, 1913.
32. Cheltenham Observatory Records, 1928.
33. Wallis, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **35**, 93, 1930; **36**, 15, 1931.
34. Bauer, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **15**, 9, 221, 1910; Faris, ibid.
- 15**, 93, 1910; Rodes, ibid., **28**, 161, 1922.
35. Moos, Bombay Magn. Observ., 1846—1905.
36. Chree, British (Terra Nova) Antarctic Expedition 1910—1913; Terrestrial Magnetism, 1921.
37. Angenheister, Nachr. d. ges. d. Wiss. Göttinge, **S. 1**, 1924.
38. Chapman, Proc. Roy. Soc., **A 95**, 61, 1919; **A 115**, 242, 1927; Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **40**, 349, 1935.
39. Fritz, Das Polarlicht, 1881; Boller, Gerlands Beitr., **3**, **56**,
- 550**, 1908.
40. Stagg, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **40**, 255, 1935.
41. Maris a. Hulburt, Proc. Inst. Rad. Eng., **17**, 494, 1929.
42. Dellinger, Phys. Rev., **48**, 705, 1935; Science, **82**, 351, 548, 1935.
43. Richardson, Trans. Am. Geophys. Union, 1936.
44. Kirby, Gilliland, Judson a. Smith, Phys. Rev., **48**, 849,
- 1935**.
45. Torreson, Scott a. Stanton, Science, **83**, 463, 1936.
46. Chree, Encyclopaedia Britannica, thirteenth edition **2**, 927, 1926.
47. Vegard, Handb. d. Exper. Physik, **25**, 1, 385, 1928.
48. Vegard, Phil. Mag., **42**, 47, 1921; Vegard a. Krogness, Geophys. Pub. Oslo, **Nr. 1**, 1920; Störmer, ibid., **No. 7**, 1926.
49. Curie, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **39**, 293, 1934.
50. Hulburt, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **36**, 23, 1931.
51. Fuller, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., **40**, 269, 1935.

52. McLennan, Proc. Roy. Soc., A 120, 327, 1928; McLennan и соавт. Proc. Roy. Soc., A 115, 515, 1927; 108, 501, 1925; 106, 188, 1924.
53. Störmer, Z. Geophys., 5, 177, 1929.
54. Козырев и Еропкии, Циркул. Пулковской обсерват. № 18, 1936.
55. Van Bemmelen, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., 8, 153, 1903; Schmidt, Met. Z., 34, 385, 1899.
56. Störmer, C. R., 131, 736, 1910; Birkeland, Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902—1903.
57. Chapman, Proc. Roy. Soc., A 95, 61, 1918; A 115, 242, 1927; Proc. Camb. Phil. Soc., 21, 577, 1923.
- ✓ 58. Lindemann, Phil. Mag., 38, 669, 1919.
- ✓ 59. Schuster, Proc. Roy. Soc., A 85, 44, 1911.
- ✓ 60. Chapman a. Ferraro, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., 36, 77, 171, 1931; 37, 147, 421, 1932; 38, 79, 1933.
61. Chapman, Quatrième Rapport de la Commission pour l'Étude des Relations entre les Phénomènes Solaires et Terrestres, 1936, p. 56.
- ✓ 62. Swann, Phil. Mag., 47, 306, 1924.
- ✓ 63. Chapman a. Ferraro, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., 36, 80, 1931; Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 89, 470, 1929; Quart. J. Roy. Met. Soc., 52, 225, 1926.
- ✓ 64. Hulburt, Phys. Rev., 31, 1038, 1929; 34, 344, 1929; 36, 1560, 1930; Maris a. Hulburt, Phys. Rev., 33, 412, 1929.
65. Annals of Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution IV, pp. 17 a. 207; Smithsonian Miscellaneous Collections, 80, 10, 1927.
66. Mawson, British Antarctic Expedition 1908, Trans. Roy. of South Australia 40, 151, 1916; Australasian Antarctic Expedition 1911—1914, Sci. Reports, Ser. B, 2, P. 1, 1925; Webb. ibid., Ser. B, 1, March 1925.
67. Sverdrup, Carnegie Inst. Pub. No. 6, 175, 1927.
68. Rostad, Geofysiske Pub. Oslo, 5, 1, 1928.
69. Barnard, Astrophys. J., 31, 208, 1910.
70. Wright, British (Terra Nova) Antarctic Expedition 1910—1913, Observations on the Aurora, опубликовано в 1921.
71. Davies, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., 36, 199, 1931.
72. Kaplan, Phys. Rev., 45, 671, 1934; 42, 86, 1932; 33, 154, 1929.
73. Перепелкин, Циркул. Пулковской обсерватории № 9, 1933; Гусев, там же, № 10, 1934.
74. Maunder, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 76, 63, 1913; 65, 2, 666, 1904.
75. Chree a. Stagg, Phil. Trans. Roy. Soc., A 227, 21, 1927; 212, 75, 1912.
76. Bartels, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., 37, 1, 1932.
77. Chree, Terr. Mag. a. Atmos. Elec., 10, 14, 1905.
78. Newall, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 82, 101, 1921; Halm, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 82, 479, 1922.
79. Maris, Phys. Rev., 39, 504, 1932.
80. Cortie, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 73, 52, 1913; Chapman, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 89, 456, 1929.
81. Maris a. Hulburt, Phys. Rev., 33, 1046, 1929.