

*Впервые опубликовано в « УФН »
в апреле 1918 г.*

СЕВЕРНЫЕ СИЯНИЯ И МАГНИТНЫЕ БУРИ

A.H. Крылов

(Речь председателя в январском 1917 г. общем собрании членов Русского физико-химического общества)

1. Северные сияния издавна привлекали взоры наблюдателей, и ученые давно старались разгадать природу этих явлений, порождавших целый ряд легенд и суеверий.

Более 200 лет тому назад Галлей обращал внимание на сходство явлений северного сияния и того свечения, которое наблюдается при истечении электричества от сильно наэлектризованного тела; он же обратил внимание, что когда сияние имеет вид свода, вершина этого свода находится в магнитном меридиане, наклон же лучей или полос близок к наклонению магнитной стрелки.

Полярные мореплаватели первой половины прошлого столетия заметили отклонения в показаниях компаса и возмущения магнитной стрелки во время северных сияний, и Франклайн едва ли не первый произвел обстоятельные исследования по этому вопросу.

Свечение разреженных газов под действием электрических разрядов представило новую аналогию в области электрических явлений и северных сияний. Были даже предложены теории, в которых северные сияния приписывались тихим разрядам земного электричества через верхние разреженные слои атмосферы.

После того, как по почину Гаусса были устроены магнитные обсерватории, наблюдения Франклина получили систематическое подтверждение, и связь магнитных бурь и северных сияний была установлена с полною несомненностью.

Наконец, наблюдения за состоянием поверхности Солнца и солнечными пятнами, правильно введенные с начала 1700-х годов, уже в 1850-х годах дали возможность подметить связь между солнечными пятнами и северными сияниями — годы с развитою и сильною деятельностью Солнца, сопровождаемою и обилием пятен, были обильны и северными сияни-

ями, и притом в эти годы они достигали и наибольшей силы и видимости даже в средних широтах.

Еще в 1790-х годах Дальтон, пользуясь положением вершины дуги или свода сияния относительно звезд, наблюденными из двух пунктов, отстоящих друг от друга на 83 английских мили (125 верст), определил, что эта вершина находилась на высоте 100 английских миль немного к югу от одного из этих пунктов.

В статье R. Potter'a «Calculation of the Heights of the Aurora Boreales of 17th Sept. and 12th Oct. 1853», напечатанной в 8-м томе «Philosophical Transactions of the Cambridge Royal Society», приведен ряд подобных наблюдений, давших в результате также высоты от 65 до 85 англ. миль.

Спектральные наблюдения обнаружили в северных сияниях ряд линий, которые находились в известных земных телах.

2. В таком приблизительно положении находился вопрос лет двадцать пять тому назад, т.е. явление было описано и исследовано с внешней стороны, главным образом, качественной, но не было подвергнуто систематическому изучению с помощью точных наблюдений, которые затем сопоставлялись бы между собою и служили бы основанием стройной теории.

Но вот ровно двадцать лет тому назад норвежский ученый проф. Биркеланд снарядил свою первую экспедицию для исследования северных сияний.

В этой экспедиции он принял участие сам лично с двумя своими студентами-учениками Helland-Hansen'ом и Laws'ом в сопровождении старика финна «поствапуса», т.е. почтаря, Хетта.

Экспедиция имела целью достичнуть вершины одной горы высотою около 3000 футов в Северной Норвегии, недалеко от Гаммерфеста и воспользоваться

имевшейся близ вершины бревенчатой хижиной для своей стоянки и наблюдений.

Но экспедиция эта не удалась — не доходя версты две до хижины экспедиция была застигнута метелью при сильном северном ветре и морозе до 25°C . Все участники экспедиции обморозились; им пришлось бросить багаж и приборы, вернуться обратно, и лишь опытность старого «поствапуса» помогла им вновь добраться до ст. Гаржия (Gargia), которую они оставили за 31 час перед тем.

Умелое оттаивание отмороженных рук в ледяной воде и своевременная врачебная помощь избавили участников экспедиции от гангрены и увечья.

3. Неудача первой попытки не ослабила энергии Биркеланда, напротив, заставила его продолжать начатое дело с большей осторожностью и предусмотрительностью.

Он летом 1897 и 1898 гг. посетил Северную Норвегию, всходил на вершины наиболее высоких ее гор, выбирая наиболее подходящую для устройства обсерватории.

После такого изучения он остановил свой выбор на вершинах Суккертоп и Тальвиктоп, расположенных на расстоянии около 3—4 километров друг от друга под 70° сев. шир. и $22^{\circ} 30'$ вост. долг. от Гринвича. Высота и той и другой вершины около 3000 ф. над уровнем моря.

На обеих вершинах были построены прочные каменные здания обсерваторий, соединенные как между собою, так и с общею сетью телефонами.

На этих обсерваториях и были произведены в течение зимы 1899 — 1900 гг. наблюдения северных сияний, магнитные и метеорологические, под руководством самого проф. Биркеланда. Не входя в подробности полученных результатов, так как они поглощаются дальнейшими, упомянем лишь о тех же стоких штормах и буранах, которые участникам экспедиции пришлось наблюдать. Скорость ветра на этих вершинах достигала до 46 метров в секунду, и бывали штормы со скоростью до 38 метров при морозе 16° . Биркеланд говорит: «Трудно вообразить, что это такое и как такой шторм действует на человека». Один из его ассистентов вернулся через несколько минут с отмороженной рукой потому, что он не надел меховых рукавиц поверх шерстяных, производя наблюдения анемометрами.

Тем не менее, коренастый, небольшого роста финн аккуратно, несмотря ни на какие штормы и метели, доставлял на обсерваторию почту раз или два в неделю. Однажды, когда он пришел весь обмерзший, так что его едва можно было узнать, профессор его спросил: «Не боится ли он ходить в такую худую погоду?» Финн сперва не отвечал и сидел спокойно, пока с него лед не оттаял, и тогда сказал: «Я слишком глуп, чтобы бояться».

4. Главный вывод, полученный на основании произведенных второй экспедицией наблюдений, состоял в том, что для решения вопроса о причине северных сияний и магнитных бурь необходимо иметь в своем распоряжении одновременные записи магнитных приборов и наблюдения на разных станциях, соответственно расположенных на расстоянии около 1000 км одна от другой, и такие же записи для возможно большего числа станций, распределенных по всей поверхности Земли. Оказалось возможным доказать расчетами, что некоторые магнитные возмущения, охватывавшие значительные области, можно приписать действию электрического тока, параллельного земной поверхности в полярных ее частях на высоте нескольких сот километров и силою до миллиона ампер, если только силу потока электрических частиц измерять так же, как измеряется гальванический ток по магнитному его действию. В полярных странах эти токи были хорошо очерчены и сосредоточены, располагаясь по временам между двумя станциями — Ян-Майеном и Боссекопом.

Норвежское правительство ассигновало на дальнейшие исследования 20000 крон, пять частных лиц дали по 6000 крон и сам проф. Биркеланд присоединил к этой сумме 30000 крон и оборудовал свои трети экспедиции для исследования северных сияний. Эти экспедиции относятся к 1902—1903 гг.; обработка всех добытых результатов еще не закончена, но проф. Биркеландом уже изданы две громадные книги, составляющие первую и вторую части первого тома его обработки этих результатов.

Станции были устроены в следующих четырех пунктах (рис. 1):

Kaafjord (Сев. Норвегия) (шир. $69^{\circ}56'$ N, дол. $22^{\circ}58'$ Ost.).

Dyrafjord (Исландия) (шир. $66^{\circ}15'$ N, дол. $22^{\circ}30'$ West.).

Axelöen (Шпицберген) (шир. $77^{\circ}41'$ N, дол. $14^{\circ}50'$ Ost.).

Маточкин Шар (Новая Земля) (шир. $73^{\circ}17'$ N, дол. $53^{\circ}57'$ Ost.).

Все станции были снабжены полной серией самопищущих вариационных магнитных приборов, абсолютным магнитометром, инклинерами, полным комплектом метеорологических приборов, теодолитом для астрономических наблюдений и хронометром.

На каждой станции был устроен жилой дом, магнитная обсерватория для самопищущих приборов, обсерватория для абсолютных магнитных наблюдений, метеорологическая будка и будка для астрономических наблюдений. На каждой станции был заведующий и два помощника, причем сам проф. Биркеланд.

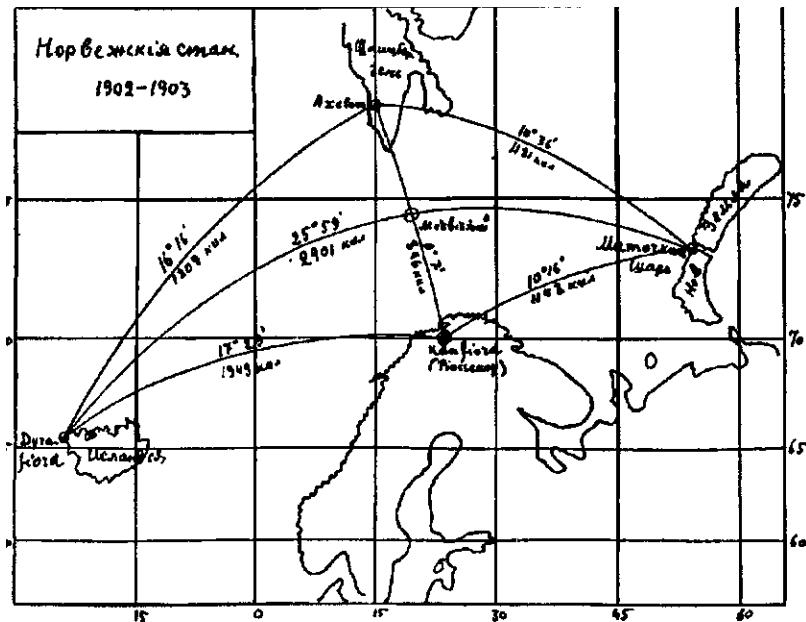


Рис. 1

ланд руководил ст. Каафиорд, на севере Норвегии, и устройством всех станций.

На Новой Земле в распоряжение экспедиции был предоставлен дом, построенный для художника Борисова, и экспедиция была доставлена в Маточкин Шар и обратно на казенном пароходе «Владимир» по распоряжению бывшего тогда архангельским губернатором контр-адмирала Н.А. Римского-Корсакова.

Кроме этих специально построенных и оборудованных станций на всех главных магнитных обсерваториях (числом 23) всего мира производились в обусловленные часы записи с более быстрым ходом регистрирующих приборов; результаты наблюдений сообщены проф. Биркеланду.

Вот этот-то громадный материал он и подверг систематической обработке, о которой я и имею в виду вкратце дать понятие.

5. Исходя из той идеи, что причина северных сияний и магнитных бурь происхождения не земного, а космического и что ее надо искать в движении наземлектризованных частиц (или частиц электричества), выбрасываемых Солнцем, на котором пятна могут быть источниками катодных лучей, Биркеланд принял следующий способ обработки.

Прежде всего для каждого из наблюденных магнитных возмущений, происходящих, как известно, еще со временем Гаусса одновременно на всей Земле, он рассчитал величину и направление возмущающей силы для каждого из мест наблюдений и получал таким образом представление о силовом возмущающем магнитном поле на поверхности Земли. Такой

расчет он делал для каждого возмущения для целого ряда последовательных моментов, чтобы иметь возможность проследить за самым ходом его развития. Для представления вышеупомянутого поля он принял своеобразный способ: на карту наносились не проекции возмущающей силы, а для каждого из мест наблюдений строился вектор, направление которого совпадало с направлением горизонтального электрического тока, могущего, протекая над данным местом, произвести наблюданную горизонтальную возмущающую магнитную силу; длина вектора откладывалась пропорционально силе тока, а значит, и пропорционально горизонтальной слагающей возмущающей силы.

Для представления вертикальной ее слагающей строился вектор, перпендикулярный первому и направленный от него влево, когда эта сила направлялась вниз и вправо — когда вверх. При таком обозначении, если бы возмущение производилось действительно горизонтальными токами, расположенными над землею, то стрелка, изображающая вертикальную силу, направлялась бы к месту наибольшей плотности тока.

Рассмотрение построенных таким образом карт привело Биркеланда к следующей классификации магнитных возмущений или бурь:

- 1) Положительные экваториальные.
 - 2) Отрицательные экваториальные.
 - 3) Положительные полярные.
 - 4) Отрицательные полярные.
 - 5) Вихревые средних широт (cyclo-median).
- Положительное экваториальное возмущение харак-

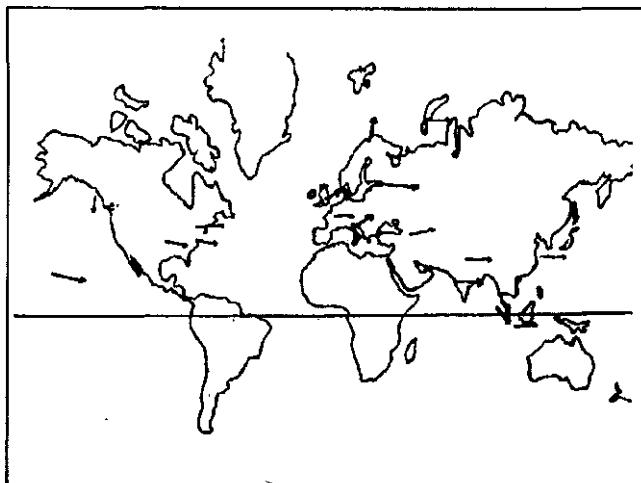


Рис. 2

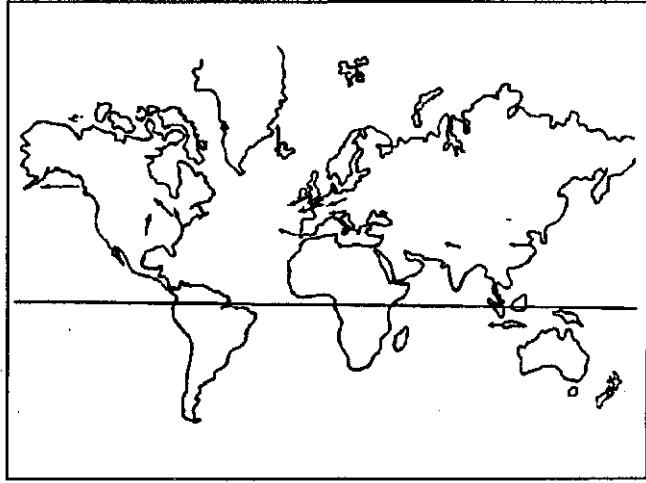


Рис. 3

теризуется следующими особенностями: а) в средних и малых широтах наблюдается положительная (т.е. увеличивающая горизонтальную слагающую) возмущающая сила, лежащая в плоскости магнитного меридиана, т.е. не производящая изменений, ни склонения, ни наклонения, или лишь весьма малые. Наибольшая величина силы наблюдается в малых широтах, к полюсу величина ее убывает.

Карта (рис. 2) представляет пример возмущений этого типа.

Отрицательное экваториальное возмущение бывает сравнительно редко, примером его может служить карта (рис. 3), на которой расположение стрелок подобно предыдущему, направление же их обратное.

Полярное возмущение характеризуется весьма большою величиною возмущающей силы в полярных странах, но на сравнительно небольшой области, при удалении от которой величина силы быстро убывает в средних и малых широтах, становясь весьма малой.

Такое возмущение (отрицательное), т.е. где горизонтальная слагающая в области наибольшего возмущения им уменьшается, представлено на карте (рис. 4), причем векторы для Исландии и Шпицбергена изображены в пять раз меньшею длиною, нежели следовало бы, если принять и для них тот же масштаб, как для Средней Европы.

Положительное полярное возмущение отличается от предыдущего лишь направлением сил.

Пример вихревого, или циклического, возмущения представлен на карте (рис. 5), на которой направления силовых стрелок имеют вихревой характер.

6. Прежде чем изложить те объяснения, которые дал наблюденным явлениям Биркеланд, необходимо

сказать несколько слов о математической теории северных сияний, данной норвежским математиком Карлом Штёрмером.

Теория Штёрмера изложена в реферате, помещенном в 42-м томе «Журнала Русского физико-химического общества», и я ограничусь поэтому лишь самым существенным.

Штёрмер занялся исследованием вопроса о том, при каких условиях частица, несущая электрический заряд, выброшенная Солнцем, попадет в сферу действия магнитного поля Земли и под его влиянием достигнет ее поверхности или пройдет от нее весьма близко.

Чтобы решить эту задачу, он принимает, что Солнце — тело не магнитное, так что оно не образует магнитного поля, и все движение частицы обусловливается полем Земли, которую Штёрмер заменяет элементарно-малым магнитом, ось которого направлена по магнитной оси Земли и магнитный момент которого равен ее магнитному моменту, т.е.

$$8,52 \cdot 10^{25} \text{ CGS.}$$

Дифференциальные уравнения движения частицы, несущей электрический заряд в магнитном по-

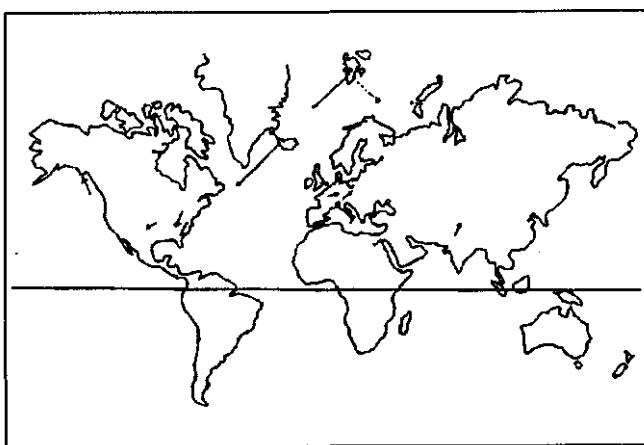


Рис. 4

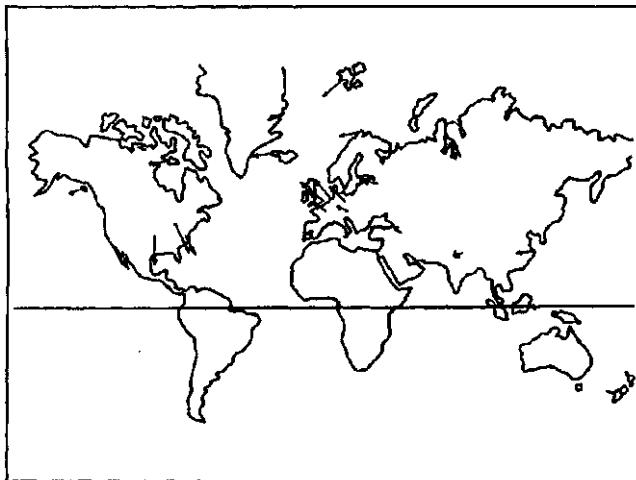


Рис. 5

ле, напишутся, если уподобить элемент траектории, описываемой частицею в рассматриваемый момент, элементу тока и применить правило действия магнитного поля на такой ток, причем сила тока пропорциональна скорости движения частицы и заряду ее.

Обозначая через H_x , H_y , H_z слагающие напряжения поля по осям координат, через m массу частицы, e заряд ее и α некоторую постоянную ^(1*), будем иметь уравнения

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \alpha \frac{e}{m} (H_y v_z - H_z v_y), \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \alpha \frac{e}{m} (H_z v_x - H_x v_z), \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \alpha \frac{e}{m} (H_x v_y - H_y v_x), \end{aligned} \quad (1)$$

где через v_x , v_y , v_z обозначены проекции скорости v частицы на оси координат. Так как направление силы, действующей на частицу, перпендикулярно к направлению ее скорости, то скорость v постоянна, и в предыдущие уравнения Штёрмер вводит вместо времени t переменную s — длину дуги траектории уравнением $ds = v dt$. Направив затем ось z по магнитной оси Земли и обозначая ее потенциал через V , он получает

$$v = M \frac{z}{r^3}, \quad (2)$$

где M есть магнитный момент Земли и $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$; следовательно,

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{\partial V}{\partial x} = -3M \frac{xz}{r^5}, \\ H_y &= \frac{\partial V}{\partial y} = -3M \frac{yz}{r^5}, \\ H_z &= \frac{\partial V}{\partial z} = -M \frac{3z^2 - r^2}{r^5}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x}{ds^2} v^2, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2y}{ds^2} v^2, \quad \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d^2z}{ds^2} v^2,$$

и, обозначая значками производные, взятые по переменной s , будем иметь систему

$$\begin{aligned} x'' &= \frac{c_1^2}{r^5} [3yzz' - (3z^2 - r^2)y'], \\ y'' &= \frac{c_1^2}{r^5} [(3z^2 - r^2)x' - 3xzz'], \\ z'' &= \frac{c_1^2}{r^5} (3xzy' - 3yzx'); \end{aligned} \quad (4)$$

здесь через c_1 обозначена некоторая постоянная, зависящая от отношения заряда частицы к массе ее, от скорости ее движения v , т.е. зависящая от *рода* частицы и от магнитного момента M . Из уравнений (4) видно, что c_1 представляет некоторую длину, величины которой при вышепринятое значении M следующие:

для катодных лучей c_1 равно 4,0 — 8,5 млн. км,

для β -лучей радия — 1,4 — 2,2 млн.км,

для α -лучей радия — 150000 — 170000 км.

Ясно, что по однородности уравнений (4) можно принять за единицу длины любую длину.

Уравнения становятся проще, если взять $c_1 = 1$, чем и будет определяться масштаб траекторий.

В дальнейшем и будем полагать $c_1 = 1$.

Оказывается, что система (4) имеет интеграл, подобный интегралу площадей. В самом деле, составив выражение $xy'' - yx''$, получим

$$\begin{aligned} xy'' - yx'' &= \frac{1}{r^5} [(3z^2 - r^2)(xx' + yy') - \\ &- 3(x^2 + y^2)zz'], \end{aligned}$$

или, полагая $x^2 + y^2 = R^2$,

$$xy'' - yx'' = \frac{3z^2 - r^2}{r^5} RR' - \frac{3R^2}{r^5} zz' \quad (5)$$

Выражение, стоящее в правой части уравнения (5), есть полная производная по s от величины R^2/r^3 , ибо

$$\frac{\partial}{\partial R} \frac{R^2}{r^3} = \frac{3z^2 - r^2}{r^5} R, \quad \frac{\partial}{\partial z} \frac{R^2}{r^3} = -\frac{3R^2}{r^5} z.$$

Вводя затем цилиндрические координаты
 $x = R \cos \varphi$, $y = R \sin \varphi$

и сохраняя ось z без перемены, вместо уравнения (5) получим

$$\frac{d}{ds} \left(R^2 \frac{d\varphi}{ds} \right) = \frac{d}{ds} \frac{R^2}{r^5}, \quad (5')$$

другие же два уравнения системы при решении относительно d^2R/ds^2 и d^2z/ds^2 заменяются такими:

$$\frac{d^2R}{ds^2} = R \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \frac{r^2 - 3z^2}{r^5} R \frac{d\varphi}{ds}, \quad (6)$$

$$\frac{d^2z}{ds^2} = \frac{3z}{r^5} R^2 \frac{d\varphi}{ds},$$

вместо же уравнения (5') берется соответствующий ему интеграл

$$R^2 \frac{d\varphi}{ds} = 2\gamma + \frac{R^2}{r^3}, \quad (7)$$

в котором через 2γ обозначена произвольная постоянная.

Кроме того, так как S есть дуга траектории, то будет

$$R^2 \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dR}{ds} \right)^2 + \left(\frac{dz}{ds} \right)^2 = 1. \quad (8)$$

Соответствующее интегралу площадей уравнение (7) имеет для дальнейшего весьма важное значение.

Написав это уравнение в виде

$$R \frac{d\varphi}{ds} = \frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3}, \quad (9)$$

и замечая, что величина $R d\varphi/ds$ есть синус угла θ , составляемого касательной к траектории с плоскостью, проведенной через точку касания и ось z , получим неравенство

$$-1 \leq \frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} \leq 1, \quad (10)$$

ограничивающее те области пространства, в которых при заданном значении произвольной постоянной 2γ могут находиться траектории, *каковы бы ни были начальные условия*, от тех, где траекторий находиться не может. Ясно, что граничащие поверхности получатся, когда в формуле (10) будут взяты знаки равенства.

На рис. 6 — 9 представлен вид меридианов этих поверхностей, которые все суть поверхности вращения около оси z , причем черным покрыты те области, где траекторий быть не может.

Значения постоянной γ , для которых эти фигуры составлены, следующие:

рис. 6, а:	$\gamma = 0,03,$
" 6, б:	$\gamma = 0,2,$
" 7, а:	$\gamma = -0,05,$
" 7, б:	$\gamma = -0,5,$
" 8, а:	$\gamma = -0,97,$
" 8, б:	$\gamma = -1,016.$

Обратим внимание, каким весьма узким сектором подходит к началу координат каждая из этих поверхностей, в особенности для значений γ , близких к -1 ; значит, все траектории, *каковы бы ни были*

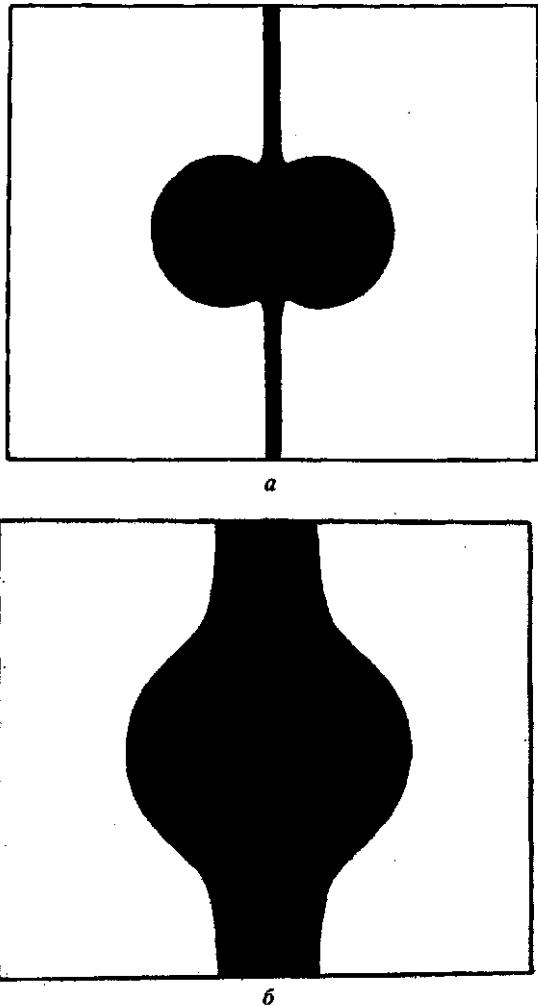


Рис. 6

начальные условия, при таком значении γ подойдут к началу внутри этой весьма узкой области.

Рассмотрение этих поверхностей показывает, что они односвязны, т.е. состоят из одного куска и распространяются в бесконечность, заключая и начало координат, если

$$-1 \leq \gamma \leq 0.$$

При весьма малых положительных значениях γ , траектории не доходят к началу координат, но если

Δ малая величина и $\gamma \leq (2c_1/\Delta)^3$, то траектория приближается к началу на расстояние меньше Δ .

Наконец, приняв для катодных лучей величину c_1 равной 5,2 миллиона километров, так что расстояние от Земли до Солнца равно 28,8 c_1 , или просто 28,8, когда за единицу длины принята длина c_1 Штёрмер получил еще ряд неравенств, ограничивающих величины возможных значений γ , а также и тех начальных условий, при которых частица, вылетевшая от Солнца, может достигнуть Земли.

Рассмотрение форм пространств, заключающих траектории в смежности с началом координат, для вышеупомянутых значений параметра 2γ привело Штёрмера к следующим выводам:

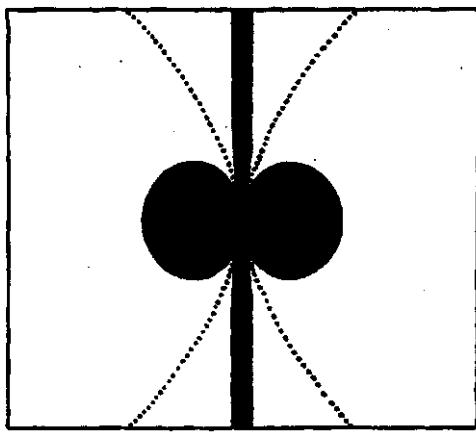
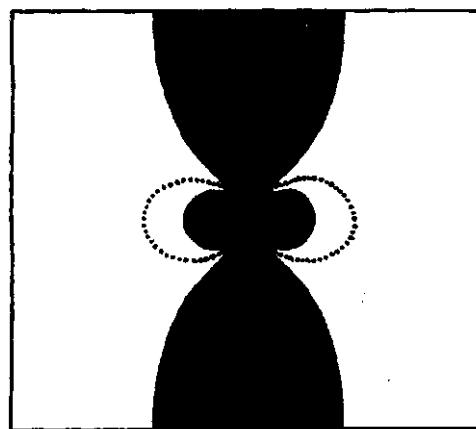
*a**b*

Рис. 7

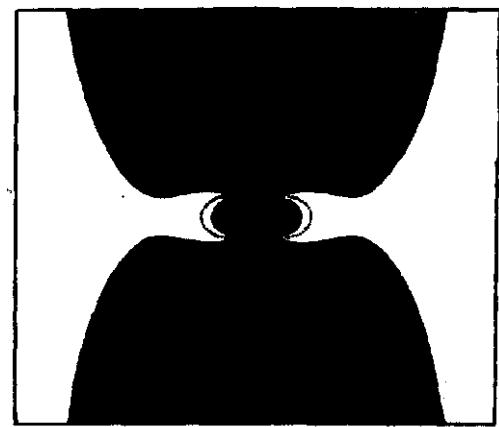
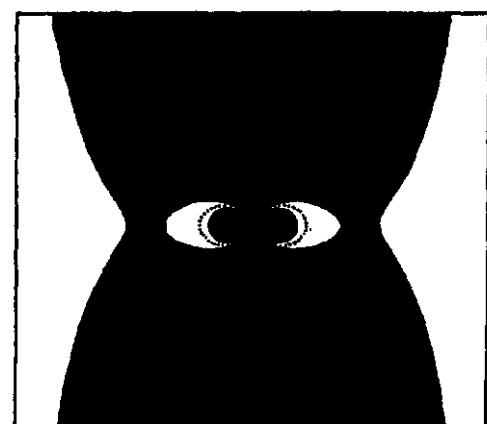
*a**b*

Рис. 8

1°) Все траектории достигают пределов атмосферы внутри поясов, расположенных вокруг магнитных полюсов на расстояниях, заключающихся:

для катодных лучей между $2^{\circ},3$ и $3^{\circ},4$,

" β - лучей радиа " $4^{\circ},6$ и $5^{\circ},8$,

" α - " " $16^{\circ},6$ и $18^{\circ},1$.

Как видно, эти пояса уже зоны сияний, но надо иметь в виду и тот ряд упрощающих предположений, который был сделан для расчетов, и что «жесткость» лучей, испускаемых солнечными пятнами, т.е. в условиях, совершенно недоступных нашим опытам, может и отличаться от «жесткости» лучей, нам известных.

По уравнению (9) угол φ найдется при помощи квадратуры

$$\varphi = \int_{s_0}^s \left(2\frac{y}{R^2} + \frac{1}{r^3} \right) ds + \varphi_0,$$

после чего найдутся x и y и может быть построена траектория.

Таким образом, все дело сводится к интегрированию, иными словами, к составлению таблицы значений функций R и z при заданных s .

Положим, что берется ряд последовательных рав-

ноотстоящих значений переменной независимой s с табличным промежутком $\Delta s = h$, достаточно малым, так что эти значения будут:

$$s_\lambda = s_0 + \lambda h \quad (\lambda = 1, 2, \dots, n-2, n-1, n, n+1, \dots);$$

соответствующие значения R и z обозначим через

$$R_\lambda = R(s_\lambda), \quad z_\lambda = z(s_\lambda);$$

введены еще величины ρ_λ и ζ_λ равенствами

$$\rho_\lambda = R''(s_\lambda) h^2, \quad \zeta_\lambda = z''(s_\lambda) h^2.$$

Процесс вычисления состоит в последовательном присоединении по одной строке в таблицах величин R_n , ρ_n , z_n , ζ_n и их разностей, причем для нахождения ρ_n и z_n при известных R_n и z_n служат первые два дифференциальных уравнения системы^(2*).

Таким образом, пусть таблица заполнена, как показано, и совершенно такие же две таблицы для z и ζ требуется вычислить R_{n+1} и z_{n+1} .

s_{n-3}	R_{n-3}	ΔR_{n-3}	$\Delta^2 R_{n-3}$	ρ_{n-3}	$\Delta \rho_{n-3}$	$\Delta^2 \rho_{n-3}$	$\Delta^3 \rho_{n-3}$	$\Delta^4 \rho_{n-3}$
s_{n-2}	R_{n-2}	ΔR_{n-2}	$\Delta^2 R_{n-2}$	ρ_{n-2}	$\Delta \rho_{n-2}$	$\Delta^2 \rho_{n-2}$	$\Delta^3 \rho_{n-2}$	$\Delta^4 \rho_{n-2}$
s_{n-1}	R_{n-1}	ΔR_{n-1}	$\Delta^2 R_{n-1}$	ρ_{n-1}	$\Delta \rho_{n-1}$	$\Delta^2 \rho_{n-1}$	$\Delta^3 \rho_{n-1}$	$\Delta^4 \rho_{n-1}$
s_n	R_n			ρ_n				

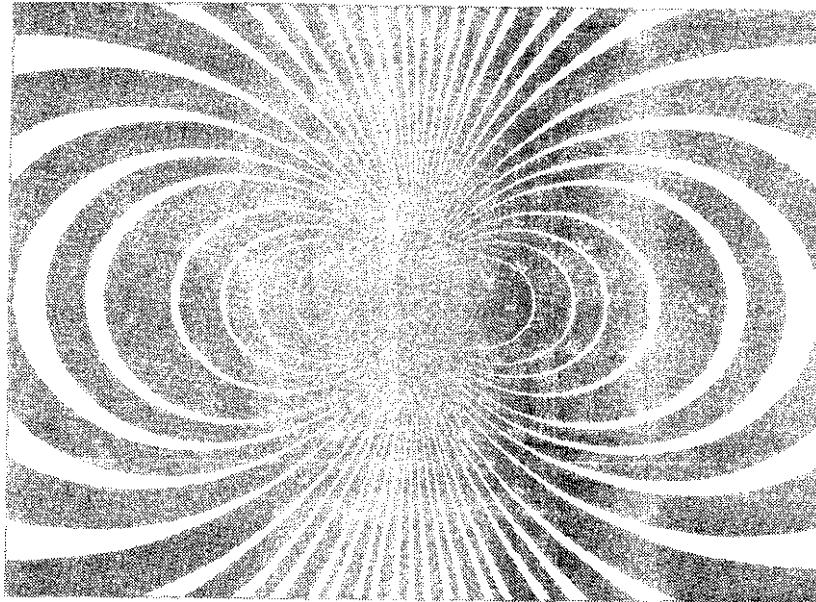


Рис. 9

Для этого по уравнениям

$$\begin{aligned} R'' &= \left(\frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} \right) \left(\frac{2\gamma}{R^2} + \frac{3R^2}{r^5} - \frac{1}{r^3} \right), \\ z'' &= \left(\frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} \right) \cdot \frac{3Rz}{r^5} \end{aligned}$$

вычисляются непосредственно величины

$$R''_{(n)} \text{ и } z''_n$$

и по ним

$$\rho_1 = R''_n h^2 \text{ и } z_n = z''_n h^2,$$

после чего к таблице значений величины ρ_n прибавятся числа

$$\begin{aligned} \rho_n, \Delta\rho_{n-1}, \Delta^2\rho_{n-2}, \Delta^3\rho_{n-3}, \Delta^4\rho_{n-4} \\ \text{и точно так же к таблице значений } \zeta_n - \text{числа} \\ \zeta_n, \Delta\zeta_{n-1}, \Delta^2\zeta_{n-2}, \Delta^3\zeta_{n-3}, \Delta^4\zeta_{n-4}. \end{aligned}$$

Пользуясь формулой Тэйлора, устанавливаем следующее соотношение, пренебрегая членами с h^5 :

$$\begin{aligned} \Delta^2 R_{n-1} &= \rho_n + \frac{1}{12} (\Delta^2 \rho_{n-2} + \Delta^3 \rho_{n-3} + \\ &+ \Delta^4 \rho - \frac{1}{20} \Delta^4 \rho_{n-4}), \end{aligned}$$

пользуясь которым, найдем $\Delta^2 R_{n-1}$, затем, зная ΔR_{n-1} , получим

$$\Delta R_n = \Delta R_{n-1} + \Delta^2 R_{n-1},$$

$$R_{n+1} = R_n + \Delta R_n.$$

Совершенно также находится z_{n+1} .

Применяя этот процесс, Штёрмер, пользуясь услугами своего ассистента и двух вычислительниц, вычислил около 120 траекторий для нижеследующих 27 значений $\gamma = -\gamma$:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; \\ &0.85; 0.90; 0.92; 0.926; 0.9285; 0.93; 0.9335; 0.939; \\ &0.94; 0.95; 0.956; 0.957; 0.97; 0.999; 1; 1.2; 1.5; 2; 5. \end{aligned}$$

Для каждой траектории вычислено около 100—120 точек, на что потребовалось свыше 5000 рабочих часов.

Для всех этих траекторий начальные условия были выбраны такие, чтобы траектория проходила через начале координат и уходила в бесконечность, причем Штёрмер, на основании исследования уравнений системы (4), доказал, что для каждого значения постоянной γ между 0 и -1 таких траекторий две и только две, и вместе с тем он показал, как находить начальные значения переменных для этих траекторий.

На основании произведенных вычислений им построены модели, снимки которых представлены на рис. 10—12.

Но кроме траекторий, уходящих в бесконечность, существуют еще траектории замкнутые, или периодические, для которых исполнена приблизительно такая же работа, как и для уходящих в бесконечность.

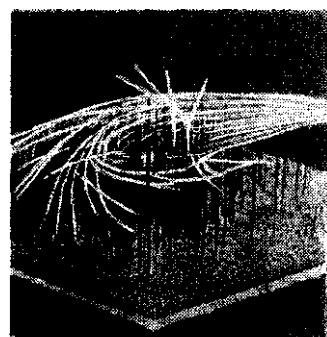


Рис. 10

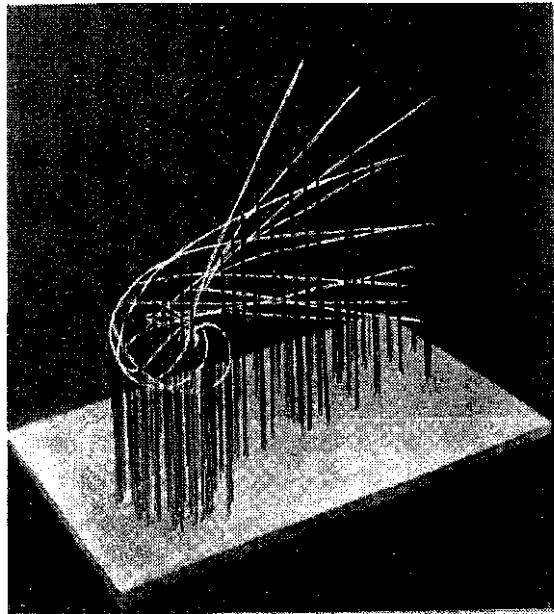


Рис. 11

Эти периодические траектории представляют иногда весьма сложные спирали, как, например, представленные на рис. 12, и нетрудно вообразить, сколько надо труда, чтобы вычислить достаточное число точек для построения такой спирали.

7. Итак, исследования Штёрмера с несомненноностью показывают, что частицы электричества, соответствующие катодным, β -или α -лучам радия, могут при сделанных допущениях, под влиянием магнитного поля Земли, достигать Земли и притом в весьма ограниченной близи к полярной области, причем их траектории будут все заключаться при подходе к Земле в чрезвычайно узком секторе, сечение которого на высоте около 100 км над земною поверхностью составляет от нескольких метров до нескольких километров, смотря по «жесткости» лу-

чей. Ясно, что поток частиц, выкинутых Солнцем одновременно, хотя бы в значительно удаленных друг от друга местах и движущихся по таким траекториям, и произведет явление северного сияния с его драпировками и лучами.

8. Несколько иначе подошел к решению вопроса Биркеланд: он стал изучать движение частиц электричества в магнитном поле опытным путем. Для этого он построил, так сказать, модель земного шара, которую он назвал *terrella* (земличка).

На рис. 13 представлена первоначальная его модель, на рис. 14 вторая, больших размеров.

Сущность устройства и той, и другой одинакова: в стеклянном сосуде или в ящике со стеклянными стенками, в котором поддерживается разрежение до нескольких тысячных миллиметра ртути, помещается подвешенным посередине ящика электромагнит, которому придана форма шара. Электромагнит этот покрыт оболочкою, окрашенной раствором синеродистого бария. На одной из стенок ящика помещен источник катодных лучей; шаровой электромагнит (*terrella*) может быть устанавливаем так, чтобы его магнитная ось занимала любое положение по отношению к прямой, соединяющей его центр с катодом, и кроме того, ему может быть сообщено вращение, соответствующее суточному вращению Земли.

Меняя силу намагничивающего тока, можно из-

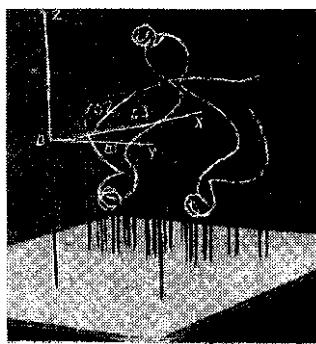


Рис. 12

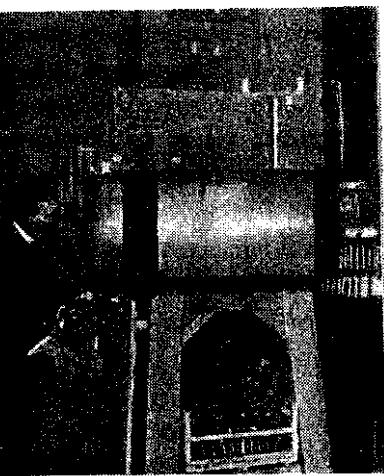


Рис. 13

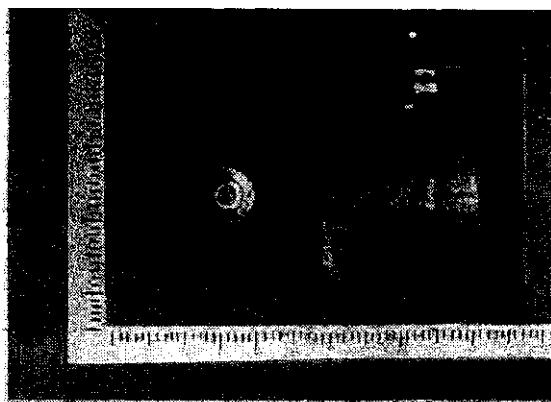


Рис. 15

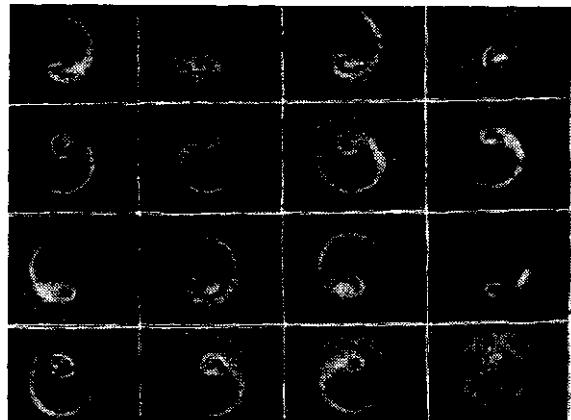


Рис. 16

менять в весьма широких пределах магнитный момент магнита, т.е. ту постоянную c_1 в уравнениях Штёрмера, которая для Земли меняется в зависимости от рода лучей, и, таким образом, на тех же катодных лучах изучать и ход лучей другой «жесткости».

Катодные лучи дают свечение в разреженном газе, в месте же их падения на поверхность терреллы замечается яркое свечение благодаря окраске синеродистым барием.

Биркеланд снабжал также свою терреллу различными экранами, окрашенными тем же веществом, чтобы с еще большей ясностью проследить пути лучей; кроме того, онставил другие экраны с щелью, чтобы выделять узкий поток лучей желаемого направления.

Рис. 14 — 16 показывают некоторые из полученных Биркеландом результатов; здесь видны и экваториальное кольцо, и полярные свечения, сосредоточенные в узкой области на расстоянии около 20° от полюса.

Формы этих кривых и места их примыканий к шару в общем соответствуют математической теории Штёрмера.

9. При некоторых начальных условиях в ряду траекторий, найденных Штёрмером, заключаются и такие, которые состоят как бы из вертикальной ветви, приближающейся к Земле, небольшого горизонтального участка вблизи ее поверхности и опять вертикальной ветви, уходящей от Земли. Такие траектории подходят к Земле в близполярных областях.

Подобные же пути получил и Биркеланд при некоторых условиях намагничивания своей терреллы и положения ее магнитной оси относительно потока лучей.

Это обстоятельство и сравнительная простота поля, получаемого при полярной магнитной буре, заставило его исследовать такую задачу: определить

длину горизонтальной части, высоту ее над поверхностью Земли и силу такого тока, который производил бы возмущающее поле, подобное наблюденному. Оказалось, что высоту надо брать около 200 км, длину около 1600 км и силу тока около 1 000 000 ампер, и тогда получилось бы поле, близкое к одному из наблюденных. Для других наблюдений получались величины того же порядка.

10. Траектории Штёрмера приближаются к земной поверхности по большей части со стороны, не освещенной Солнцем; то же показали Биркеланду и опыты с терреллою, поэтому он поставил себе задачу изучить распределение магнитных бурь по времени дня для своих четырех полярных станций. Простого счета возмущений или учета их продолжительности в разные часы дня недостаточно, необходимо принять во внимание и напряженность самого возмущения.

Пусть, например, P_h представляет величину горизонтальной слагающей возмущающей силы в плоскости магнитного меридиана, тогда интеграл

$$|S_H| = S_H^a = \frac{1}{T} \int_0^T |P_h| dt$$

от *абсолютной* величины этой слагающей представит абсолютную среднюю напряженность горизонтальной возмущающей силы по меридиану. Подобным образом, если обозначить соответственно через P_h^p и P_h^n положительные и отрицательные значения интегралы

$$S_H^p = \frac{1}{T} \int_0^T P_h^p dt,$$

$$S_H^n = \frac{1}{T} \int_0^T P_h^n dt$$

представят среднюю напряженность положительно-

го и отрицательного возмущения вышеупомянутой слагающей.

Понятно, что подобные же величины можно составить для поперечной слагающей (возмущения склонения) и вертикальной.

Наконец,

$$S^T = \sqrt{|S_H|^2 + |S_D|^2 + |S_V|^2}$$

представить значение средней величины полной напряженности, причем $|S_D|$ и $|S_V|$ представляют та-ковые для поперечной и вертикальной слагающих.

Такие расчеты и произведены Биркеландом для каждого двухчасовых промежутков каждого дня, затем для тех же часов по пятидневным периодам, затем по месячным и, наконец, для всего времени наблюдений.

Оказывается, что средняя напряженность возмущений вблизи пояса северных сияний следует за суточным движением Солнца, и если бы представлять эти возмущения векторами направлений токов, то для каждой станции можно бы заметить две главные системы:

1°) первая система, имеющая maximum около 6 часов вечера по местному времени со стрелкою, направленную к востоку по поясу сияний;

2°) вторая система с maximum'ом около полуночи и стрелкою, направленную к западу.

Около 9—10 часов утра по местному времени наступает, так сказать, магнитное затишье, т.е. отсутствие возмущений.

Эти две главные системы соответствуют тем возмущениям, которые выше были названы положительным и отрицательным полярными.

Рассмотрение самих диаграмм указало Биркеланду, что для этих возмущений центр располагается между Axoloen'ом и Kaafjord'ом, но кроме этих главных встречается и некоторое число местных бурь меньшей силы по близости к магнитному полюсу Земли и к северу от пояса сияний.

Суточный период, расположение зоны полярных возмущений, время дня, когда они достигают наибольшей интенсивности, соответствуют как теории Штёрмера, так и опытам Биркеланда с терреллою, в которых он обнаружил, меняя жесткость лучей, что можно получить два типа электрических осаждений на вечернюю сторону Земли; у одного из этих типов движение частиц происходит к востоку, у другого — к западу. (Это обнаружил Биркеланд с помощью экранов, расположенных в виде звездки близ полюсов терреллы, замечая их свящающуюся и теневую стороны.) Эти два типа и могут служить объяснением полярных возмущений положительного и отрицательного.

Источником же электрической радиации служит Солнце.

11. Любопытны также опыты Биркеланда с терреллою, когда он сам электромагнит или саму терреллу делал источником катодных лучей, в то же время намагничивая ее.

Он получал явления, подобные солнечной короне и кольцам Сатурна, как можно видеть по рис. 17.

12. Трудно дать в несколько четвертей часа полное понятие о двух огромных томах столь богатых содержанием как наблюдательного, так опытного и, наконец, теоретического материала, как то сочинение Биркеланда, беглый очерк которого я дал.

Я обращусь теперь к последним работам Штёрмера, в которых он обнаруживает свой талант наблюдателя и опытного исследователя, тогда как в предыдущих работах он показал свои математические силы.

Я уже упоминал в начале о расчете Дальтона, которым он определил положение вершины дуги или свода северного сияния, и работы Potter'a, относящиеся к 1833 г.

В то время не было еще ни фотографии, ни телефона и, конечно, не было и самой мысли о возможности телефона; понятно поэтому, что наблюдения с двух пунктов такого изменчивого явления, как северное сияние, простым глазом или простейшими угломерными приборами для определения положения выдающихся точек сияния относительно звезд не могли отличаться большою точностью по самой своей трудности.

Штёрмер и решил применить к систематическому исследованию этого вопроса современные научные средства. С этой целью он устроил на севере Норве-



Рис. 17

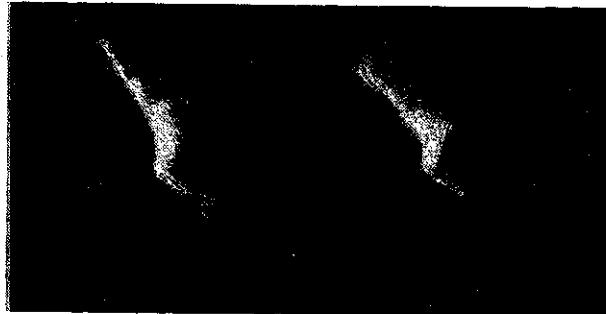


Рис. 18



Рис. 19

гии две обсерватории в Боссекопе и в Стор-Корснес, лежащих — первый под 70° север. широты и 24° вост. долготы от Гринвича, второй на том же меридиане, но на 27 километров к северу.

На каждой из этих обсерваторий имелись специально приспособленные, совершенно одинаковые между собой фотографические камеры. Обе станции были соединены телефоном, и, следовательно, легко было получать вполне одновременные снимки. Камеры наводились на ту область неба, где было северное сияние, так, чтобы на пластинке получалось и изображение какой-либо яркой звезды или планеты, к которой затем можно было бы относить соответствующие изображения той же самой точки сияния.

Одним словом, производилась фотограмметрическая съемка сияния одновременно двумя камерами, причем изображение звезд на пластинке давало ориентировку камеры.

Понятно, что по таким двум одновременным снимкам нетрудно определить положение любой отличительной точки, полученной на снимках по отношению к базе как по высоте, так и по азимуту, и, следовательно, вынести проекцию этой точки на карту и отметить на ней ее возвышение над поверхно-

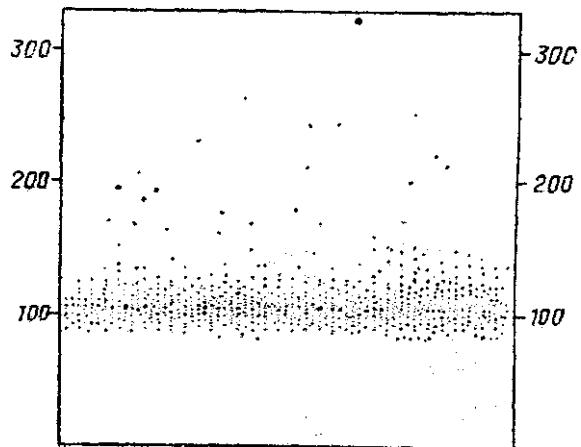


Рис. 20

стью Земли. Штёрмер определял, главным образом, нижний край сияния, когда оно имело вид занавеси, и исследовал несколько сот снимков, сняв с них положение многих тысяч точек.

На рис. 18 и 19 представлены пары снимков, на которых видны изображения сияния и Венеры.

Рис. 20 представляет сводную таблицу наблюдений; на ней показаны возвышения всех вычисленных точек и видно, как они все группируются в слое на высоте около 100 километров над земной поверхностью.

Работы Штёрмера еще не закончены; одновременно с фотограмметрическою съемкою им производились и магнитные наблюдения самопищающимися вариационными приборами.

Ясно, что обработка этих совместных наблюдений даст точные данные для расчетов, подобных сделанным предположительно Биркеландом, т.е. о силе того потока электрических частиц, который, внедряясь в атмосферу, производит и северные сияния, и магнитные бури, но уже теперь можно сказать, что работами Биркеланда и Штёрмера сущность дела выяснена, в дальнейшем будет лишь изучение его деталей.

ПРИМЕЧАНИЯ

⁽¹⁾ Постоянная a есть отношение электрической единицы электрической массы к электромагнитной и равна $1/c$, где c — скорость света.

⁽²⁾ Этот метод изложен подробно в статье: Крылов А.Н. //Архив физ. наук. 1918. № 1—2. С. 68.