

Н. В. ПУШКОВ

МАГНЕТИЗМ В КОСМОСЕ



1961
СЕРИЯ IX

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЗНАНИЕ

ФИЗИКА И ХИМИЯ

15

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Н. В. ПУШКОВ
Лауреат Ленинской премии,

МАГНЕТИЗМ В КОСМОСЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва

1961

В брошюре директора Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук СССР, Лауреата Ленинской премии Н. В. Пушкова рассказано об исследованиях магнетизма Земли и космических тел при помощи спутников и космических ракет.

Автор знакомит с результатами измерений магнитных полей Земли и Луны, проведенных на спутниках и ракетах, и их значением для науки о космическом магнетизме.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей — не специалистов. Однако она представляет интерес и для тех, кто немного знаком с явлениями земного магнетизма.

В основу этой работы легли материалы публичных лекций, прочитанных автором в Политехническом музее в Москве летом 1960 года.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Что мы знаем о земном магнетизме	5
Спутники и ракеты исследуют постоянное магнитное поле	11
Магнитометры обнаруживают электрические токи в ионосфере	20
Магнитные бури и внеионосферные системы токов	24
Радиационные зоны Земли	31
Магнитные исследования во внешней радиационной зоне и в межпланетном пространстве	38
Магнетизм космических тел	44
Заключение	48

Автор Николай Васильевич Пушков

Редактор И. Б. Файнбойм

Техн. редактор А. С. Назарова

Корректор Е. Э. Ковалевская

Обложка художника А. Г. Ординарцева

Сдано в набор 7/VIII 1961 г. Подписано к печати 14/IX 1961 г. Изд. № 233.
 Формат бумаги 60×92¹/₁₆. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,84.
 А 08839. Цена 9 коп. Тираж 32 000. Заказ 2540.

Типография изд-ва «Знание», Москва, Центр, Новая пл., 3/4.

*Посвящается первому летчику-
космонавту ГАГАРИНУ
ЮРИЮ АЛЕКСЕЕВИЧУ*

ВВЕДЕНИЕ

Памятная дата 4 октября 1957 года золотыми буквами вписана в историю человечества. Это день первого запуска Советским Союзом искусственного спутника Земли — начала новой эры исследования и покорения человеком космоса.

Лишь несколько лет отделяют нас от этого знаменательного события, но как много новых научных открытий в области космических явлений совершено за это время!

В авангарде изучения и освоения космоса все эти годы шла наша страна, замечательные советские ученые. За первым спутником они создали искусственную планету солнечной системы, осуществили полет на Луну и облет Луны, послали космическую ракету к планете Венере и, наконец, свершился исторический полет в космосе первого в мире летчика-космонавта майора Юрия Алексеевича Гагарина.

Вслед за Ю. А. Гагариным длительный космический полет по орбите вокруг Земли совершил второй советский космонавт — майор Герман Степанович Титов. Космический корабль «Восток-2» стартовал 6 августа 1961 года. После 17 оборотов вокруг земного шара была произведена посадка корабля-спутника. Космонавт Г. С. Титов в течение 25 часов 18 минут пролетел в космосе свыше 700 тысяч километров.

Наступил новый этап исследований космоса с непосредственным участием в них человека.

Наши знания о космическом пространстве растут так быстро, что за ними трудно следить даже специалистам. Каждый спутник или космическая ракета приносит все новые сведения о процессах и явлениях, происходящих вблизи Земли, в межпланетном пространстве и на других планетах.

Исследованию космического пространства с помощью спутников и ракет посвящены уже сотни статей в десятках научных журналов и в трудах многочисленных симпозиумов и конференций.

Результаты многих исследований, например открытие радиационных зон Земли, фотографирование обратной сторо-

ны Луны, доказательство отсутствия большого магнитного поля у Луны и другие, хорошо освещены. Однако большинство работ пока мало известно широкому кругу читателей. К таким работам относится и основная часть исследований в области земного и космического магнетизма. Цель настоящей брошюры рассказать в общедоступной форме об исследованиях в этой интересной области.

Магнитные явления не ограничиваются одной только Землей. Магнитными полями обладают Солнце и звезды. Магнитные наблюдения на ракетах недавно подтвердили предположение о существовании магнитного поля в межпланетном пространстве. Можно думать, что магнитные поля должны иметься и на других планетах солнечной системы. Вот почему мы говорим теперь не только о земном, но и о космическом магнетизме, рассматривая земной магнетизм как частный случай космического магнетизма.

Магнитные явления играют важную роль в космосе. Достаточно сказать, что взаимодействие между Солнцем и Землей в значительной мере определяется магнитными полями Солнца и Земли. Многие свойства околоземного космического пространства целиком зависят от земного магнитного поля. Не удивительно поэтому, что в общей программе космических исследований большое место отводится магнитным исследованиям.

Магнитные поля вне Земли могут быть измерены в настоящее время практически двумя способами. Один из них — по наблюдениям расщепления спектральных линий в спектре космических тел. Этот способ применим только к телам, испускающим собственный, а не отраженный свет. Так были обнаружены магнитные поля у Солнца и звезд.

Магнитные поля планет, их спутников, межпланетное магнитное поле и магнитное поле Земли на большом расстоянии от нее не могут быть измерены таким способом. Для этой цели пригоден только второй метод измерения полей с помощью магнитных приборов, а именно — магнитометров, установленных на спутниках и ракетах.

Наш рассказ об исследовании земного и космического магнетизма с помощью магнитометров спутников и космических ракет начнется с изучения двух частей магнитного поля Земли — одной, связанной с твердым телом Земли, и второй, связанной с атмосферной оболочкой Земли. Затем последуют исследования межпланетного магнитного поля и поля Луны.

Краткие сведения о магнитных приборах, применявшихся при измерениях на спутниках и ракетах, даны при описании соответствующих экспериментов.

Сравнительно много места в брошюре отведено изучаемым явлениям, так как предполагается, что читатель либо

совсем не знаком с ними, либо знает о них очень мало. При этом говорится не о всех явлениях, а только о тех, которые уже были или могут быть объектами изучения с помощью спутников и ракет.

Природа и происхождение многих явлений космического магнетизма остаются до настоящего времени неизвестными. Существует большое количество теорий, или, точнее, гипотез, пытающихся объяснить эти явления, но ни одна из них не может считаться пока вполне достоверной. Мы не ставим задачи познакомить читателя со всеми этими теориями и если будем говорить о некоторых из них, то только для того, чтобы показать, какие имеются еще спорные и нерешенные вопросы. Уточнению их могут помочь магнитные исследования на спутниках и ракетах.

ЧТО МЫ ЗНАЕМ О ЗЕМНОМ МАГНЕТИЗМЕ

Наша земля обладает магнитным полем. Это поле и наблюдающиеся в нем явления уже давно стали предметом изучения. Интерес ученых к изучению земного магнетизма вызывается его практическим применением для вождения морских судов и самолетов по магнитному компасу, для поисков железных руд, нефти и других полезных ископаемых, при землеустроительных работах и т. д.

Ученых интересует земное магнитное поле как геофизическое явление, природа и происхождение которого остаются до настоящего времени невыясненными. Интерес к земному магнетизму еще больше усиливается благодаря многочисленным и разнообразным связям магнитных явлений с солнечной деятельностью, космическими лучами, полярными сияниями, изменениями в ионосфере, электрическими токами в земле и в море, нарушениями радио и проводной связи и т. п.

Существование магнитного поля может быть обнаружено по его проявлениям. Таких проявлений довольно много.

Одно из них — расщепление спектральных линий в магнитном поле, о котором мы уже говорили. Оно проявляется также в радиоволнах. Отраженная от ионосферы радиоволна приходит обратно на Землю в виде двух составляющих: обыкновенной и необыкновенной волны, различающихся по частоте на величину, зависящую от интенсивности магнитного поля в области отражения.

Хорошо известно также действие магнитного поля на магнитную стрелку: в магнитном поле стрелка компаса всегда устанавливается по направлению силовых линий поля.

Земля обладает очень слабым магнитным полем. Его величина даже в районе самой сильной в мире Курской магнитной аномалии не превышает двух эрстед. Эрстедом называется напряженность поля, при которой оно действует на

единичный магнитный полюс с силой в одну дину. В практике геомагнитных измерений пользуются обычно меньшей единицей — гаммой, равной одной стотысячной эрстеда (обозначается греческой буквой гаммой — γ).

Для полного определения поля нужно знать не только величину его напряженности, но и ее направление. Направление может быть определено двумя углами. Один из них угол, образуемый направлением поля с горизонтальной плоскостью, второй — с плоскостью географического меридиана. Первый угол называют магнитным наклоением, второй — магнитным склонением.

В практике геомагнитных измерений часто вместо полной напряженности поля измеряют величины ее проекций либо на вертикальную, либо на горизонтальную плоскость.

Величина и направление магнитного поля меняются от места к месту: чтобы изучить пространственное распределение магнитного поля, проводят магнитные съемки. Результаты съемок представляют в виде карт магнитных элементов: склонения, наклоения, полной напряженности и других.

Хотя магнитные съемки проводятся уже давно, поверхность земного шара охвачена ими пока неудовлетворительно. Имеются значительные территории, либо еще незаснятые, либо заснятые очень редкой и неравномерной съемкой. К их числу относятся: Антарктида, почти весь мировой океан и ряд областей в Азии и Африке.

Магнитное поле меняется непрерывно во времени, причем имеются очень медленные возрастания или убывания магнитных элементов, продолжающиеся в одном направлении десятки и сотни лет. Эти изменения называют вековыми вариациями. Накапливаясь с течением времени, вековые вариации приводят к очень значительным изменениям поля. Магнитологам приходится поэтому периодически, через 5—10 лет, вводить в магнитные карты поправки на вековые вариации.

Изменения магнитных элементов во времени непрерывно регистрируются в магнитных обсерваториях, которых в настоящее время насчитывается до 150. Большинство обсерваторий находится на континентах, особенно в Европе, и лишь немногие — на островах в океанах.

Бывают дни, когда на магнитограммах, так называются записи магнитных элементов в магнитных обсерваториях, отчетливо проявляются регулярные периодические изменения с периодом, равным солнечным суткам. Такие дни называют магнитно-спокойными днями, а изменения поля в эти дни — спокойными суточными вариациями. Наиболее четко спокойные суточные вариации наблюдаются в низких широтах, особенно в годы минимума солнечной деятельности, когда на Солнце мало пятен, флуккул и других активных образований.

Бывают также дни, когда плавные изменения поля сме-

няются быстрыми и неупорядоченными, иррегулярными колебаниями, часто очень большой амплитуды. Такое состояние поля называют магнитной бурей, а дни, когда наблюдаются магнитные бури, называют магнитновозмущенными днями. Магнитные возмущения и магнитные бури наиболее часто наблюдаются в годы максимума солнечной деятельности и наиболее сильны в высоких широтах, особенно в зоне максимальной частоты видимости полярных сияний. Однако даже и здесь величина магнитного возмущения составляет лишь несколько процентов от величины постоянного поля.

Образцы магнитограмм, на которых пунктиром показана

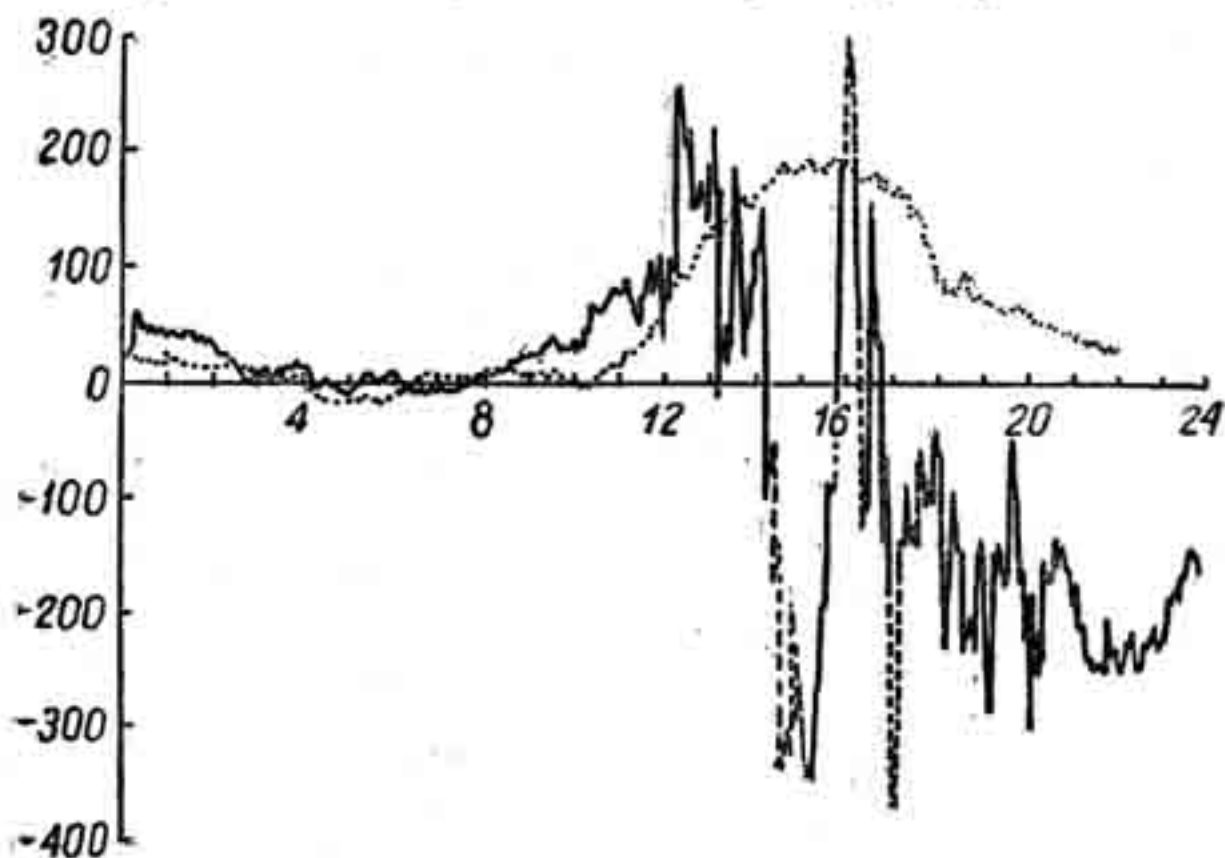


Рис. 1. Магнитограммы горизонтальной составляющей экваториальной обсерватории Гуанкайо, Перу. Пунктир — спокойный день; сплошная линия — возмущенный день. По оси ординат отложены изменения поля в гаммах, по оси абсцисс — часы суток по мировому времени.

ны спокойные, а сплошной линией возмущенные вариации горизонтальной составляющей поля, приведены на рис. 1.

Магнитные возмущения и бури хорошо коррелируются (взаимосвязываются) с солнечной деятельностью, полярными сияниями, космическими лучами, изменениями в ионосфере, что указывает на то, что источники этих процессов находятся вне твердого тела Земли.

Магнитное поле Земли делят обычно на переменное поле, к которому относят все преходящие вариации поля, и на постоянное поле, куда входят вековые вариации поля. Существует и другое деление: на поле внутреннее, источники которого

находятся внутри твердого тела Земли, и на поле внешнее с источниками в ионосфере и за пределами ее.

Вековые вариации относятся к внутреннему магнитному полю Земли. Они свидетельствуют о том, что внутренняя жизнь Земли далеко еще не закончена и в разных частях Земли протекает по-разному.

В первом, достаточно грубом приближении мы можем рассматривать магнитное поле Земли как поле однородно намагниченной сферы или поле магнитного диполя, помещенного в центре Земли, с осью намагничивания (осью диполя), накло-

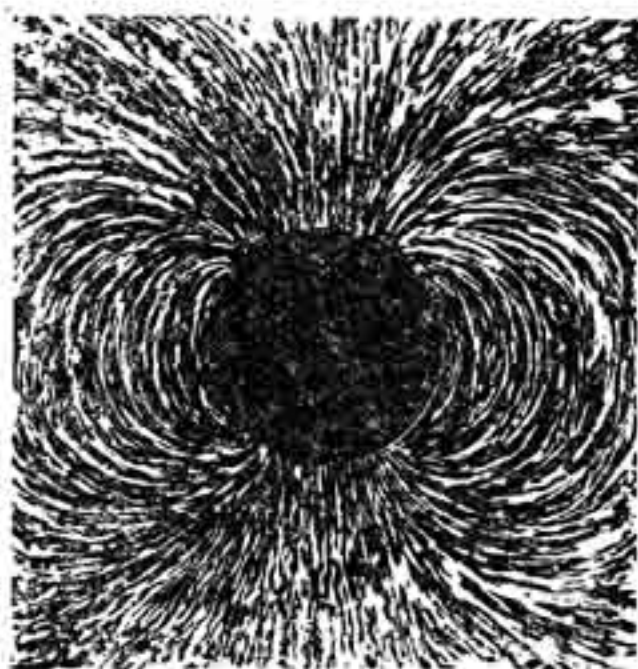


Рис. 2. Поле однородного намагничивания вокруг Земли.

ненной под углом $11,5^\circ$ к оси вращения Земли. Северный полюс этой оси находится в Антарктике, вблизи советской антарктической станции «Восток», а южный — в северо-восточной оконечности Гренландии, вблизи Туле. Ход силовых линий поля центрального диполя показан на рис. 2. Силовые линии выходят из южного полушария и входят в северном полушарии. По мере приближения к геомагнитному экватору они удаляются от Земли.

На рис. 3 показана мировая карта полной напряженности магнитного поля Земли. На ней не учтены региональные и локальные аномалии, поэтому картина распределения поля получается довольно простой. Мы видим, что поле меняется от 0,25 эрстеда на экваторе до 0,70 эрстеда на южном магнитном полюсе (магнитные полюса обозначены буквами МП), в то время как у поля диполя отношение напряженности поля на экваторе и на полюсах равно 1:2. В северном полушарии имеются две области с одинаковыми максимальными значе-

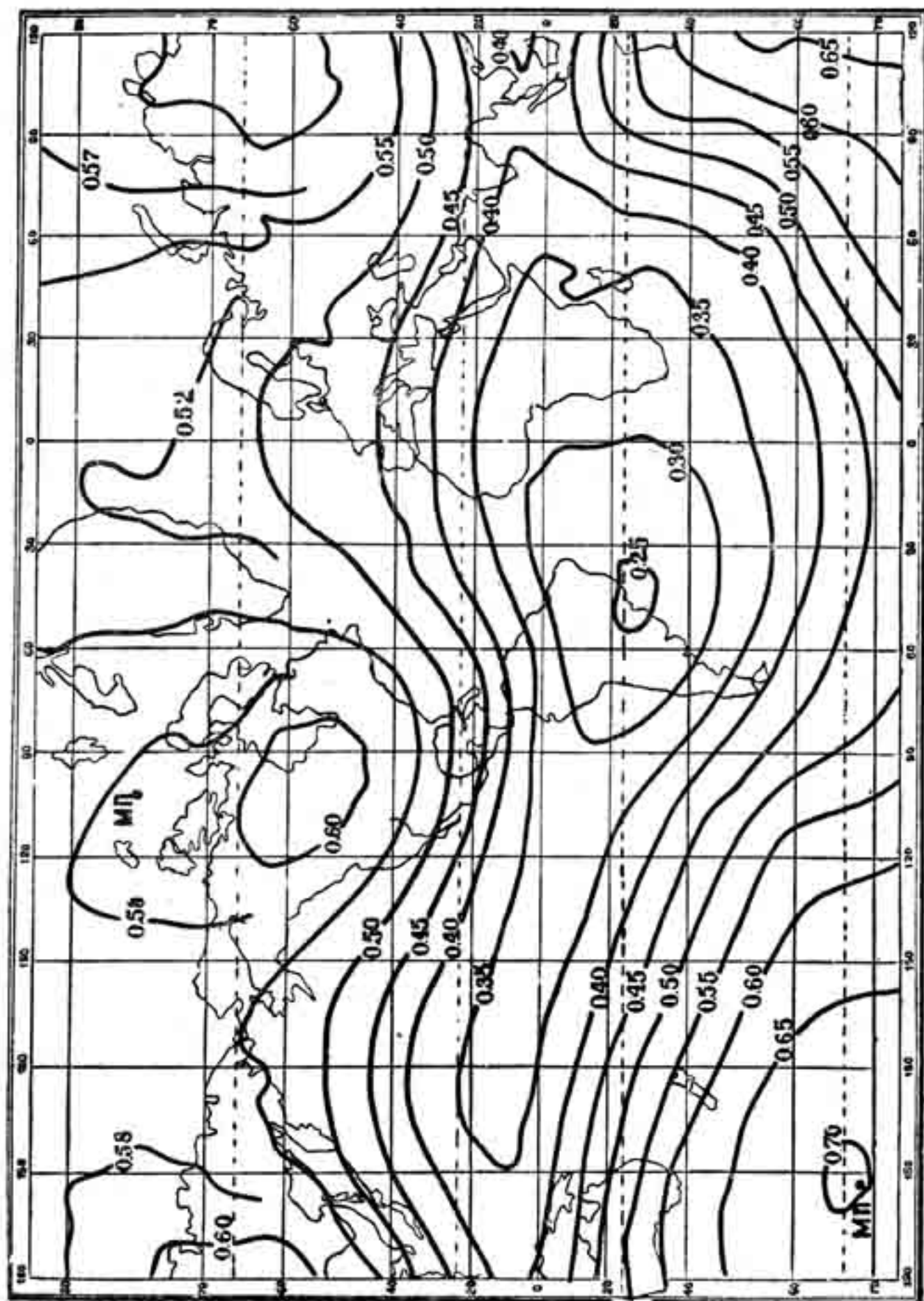


Рис. 3. Карта полной напряженности магнитного поля Земли (1945 г.).

ниями поля порядка 0,6 эрстеда. Это приводило к мысли о том, что в северном полушарии имеется не один (как у поля диполя), а два магнитных полюса. Приведенные примеры показывают, что магнитное поле Земли довольно сильно отличается от поля диполя.

Расчеты показывают, что наилучшее согласие между реально наблюдаемым полем и полем диполя получается, если предположить, что диполь находится не в центре Земли, а смещен от него примерно на 300 км в сторону Зондских островов.

Можно, хотя бы формально, представить реальное поле в виде поля однородно намагниченного шара, на которое наложены поля магнитных аномалий. Эти аномалии могут быть найдены, если из наблюдаемого поля вычтеть поле однородно намагниченного шара. Большие аномалии должны быть у нас в Сибири, в Северной Америке и между Южной Америкой и Африкой.

Такие большие протяженные аномалии называются мировыми. Помимо них имеются еще региональные аномалии типа Московской магнито-гравитационной аномалии, и локальные аномалии — типа Курской. Наличие большого числа магнитных аномалий различной протяженности делает магнитное поле Земли очень сложным. Для получения подробных данных о реальном распределении поля Земли нужны очень детальные магнитные съемки.

Для объяснения ряда магнитных эффектов, наблюдающихся в ионосфере и в полярных сияниях, нужно знать магнитное поле на больших расстояниях от Земли.

До появления ракет и спутников данные о магнитном поле на больших расстояниях от Земли получались из наземных измерений, производившихся методом сферического анализа, разработанным Гауссом и усовершенствованным Адольфом Шмидтом. Он позволяет представить потенциал и компоненты поля в любой точке пространства в виде ряда сферических функций от трех независимых переменных координат точки пространства.

Метод сферического анализа дает возможность разделить наблюдаемое поле на две части: на поле внутреннее, зависящее от источников, находящихся внутри Земли, и поле внешнее, создаваемое источниками, находящимися вне Земли. Указать более точно места, где находятся источники поля внутри и вне Земли, метод сферического анализа не может.

Разделение постоянного магнитного поля Земли на части внутреннего и внешнего происхождения произвел впервые А. Шмидт для поля 1885 года, а затем другие исследователи для полей поздних лет. Было найдено, что большая часть поля, наблюдаемого на поверхности Земли, принадлежит внутреннему полю. На долю внешнего поля приходится, по

старым анализам, около 3% и по новым — около 1%. Разность между наблюдаемым полем и полем, вычисленным по формулам сферического анализа, также составляет около 1%. Поэтому возникает сомнение: существует ли вообще такое большое постоянное внешнее поле и не объясняются ли результаты анализа неточностями в магнитных картах, по данным которых производится анализ.

Сопоставление различных анализов показывает, что магнитный момент Земли меняется от одного анализа к другому. Вызваны ли эти измерения только вековыми вариациями или здесь играют какую-то роль также изменения в точности исходных данных магнитных карт, сказать трудно. Чтобы судить об этом, нужны более полные и более точные съемки всего земного шара. В проведении таких съемок большую роль отводят магнитным измерениям на спутниках и ракетах. На них же возлагается задача определить места источников внешнего постоянного и переменного поля.

СПУТНИКИ И РАКЕТЫ ИССЛЕДУЮТ ПОСТОЯННОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

На протяжении последних десяти лет международная организация ученых — Международный союз геодезии и геофизики — неоднократно принимала решения о необходимости проведения мировой магнитной съемки. Работы по съемке намечается развернуть в 1964—1965 годах, в период ближайшего минимума солнечной деятельности.

К этому времени приурочивается и Международный год спокойного солнца. Ученые многих стран будут проводить по согласованным программам наблюдения и исследования солнечной деятельности, магнитного поля, ионосферы, полярных сияний, космических лучей и других геофизических явлений, связанных с солнечной деятельностью. Они дополняют исследования Международного геофизического года 1957—1958 годов, во время максимума солнечной деятельности.

Какие возможности несет с собой магнитная съемка со спутника?

Первое ни с чем не сравнимое преимущество этой съемки — ее быстрота. Съемка всего земного шара может быть проведена со спутника за несколько месяцев, тогда как при других средствах на это потребуется в лучшем случае несколько лет. Можно привести для сравнения такие цифры. С 1900 до 1929 год магнитные измерения на океанах производились магнитным отделом Института Карнеги (США) на судах «Галилей» и «Карнеги». Всего за это время ими было пройдено с измерениями около 800 тыс. км. Спутник проходит такое расстояние примерно за сутки.

Сейчас имеется на земле еще много «белых пятен», где не

было магнитной съемки из-за их недоступности. Для спутника каких-либо недоступных мест не существует. Наиболее удобными для съемки будут круговые орбиты, проходящие через географические полюса. При таких орбитах полярные области, наиболее трудные для съемки обычными средствами, наоборот, окажутся покрытыми наиболее густой съемкой.

Проводя съемки на разных расстояниях от Земли, можно будет проследить, как затухают мировые аномалии с высотой, и получить дополнительные сведения для суждения о глубине их залегания. Известно, что чем протяженнее аномалия и чем медленнее она затухает с высотой, тем глубже в земле должны находиться ее источники.

При удалении от Земли доля внутреннего поля будет уменьшаться, а доля постоянного внешнего поля, если оно существует, увеличиваться. Поэтому разделение поля на внутреннюю и внешнюю части должно давать более определенные результаты по данным измерений спутников.

В настоящее время имеется уже опыт проведения магнитных измерений на третьем советском спутнике и на американском спутнике «Авангард-3». Он полностью подтверждает целесообразность использования спутников для мировой магнитной съемки и службы векового хода.

Познакомимся теперь с результатами этих измерений, относящихся к постоянному полю (о переменном поле будет рассказано в следующем разделе). Описание магнитометров, с помощью которых выполнялись измерения, могло бы занять много места, поэтому мы ограничимся только изложением принципов, положенных в основу этих приборов.

Магнитные измерения впервые в мире были проведены на третьем советском искусственном спутнике Земли.

Третий спутник был запущен 15 мая 1958 года и продержался на орбите свыше 16 месяцев. Спутник летел на высотах от 250 до 1900 км, его орбита была наклонена к географическому экватору Земли под углом в 65° .

Магнитометр спутника должен был измерять поле в большом диапазоне и быть, кроме того, достаточно чувствительным. На него возлагалась также обязанность следить за изменением ориентации спутника в пространстве. Сведения об ориентации спутника нужны были для проводившихся одновременно других экспериментов.

При выборе типа магнитометра нужно было учесть еще одно обстоятельство. Третий спутник был насыщен большим количеством приборов и аппаратуры. Он обладал поэтому довольно большим собственным неоднородным магнитным полем, создаваемым ферромагнитными массами спутника.

При всех этих условиях было решено спроектировать и

построить для третьего спутника специальный тип индукционного магнитометра с магнитнонасыщенными датчиками.

Общий вид магнитометра третьего спутника показан на рис. 4.

Это очень сложный прибор, пожалуй, самый сложный из всех применявшихся до сих пор в магнитных измерениях на спутниках и ракетах. Он выполнен на полупроводниковых элементах и тем не менее весит около 13 кг. Магнитометр имеет три датчика: один для измерения величины полной напряженности поля и два для регистрации измерений ориентации спутника относительно силовых линий магнитного поля.

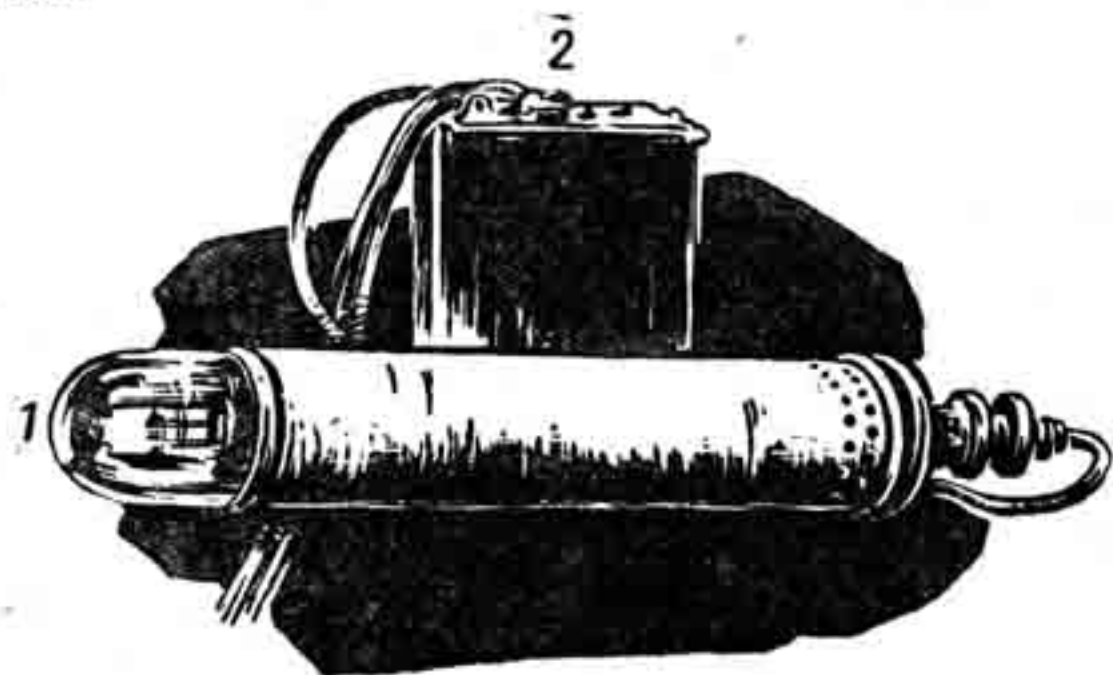


Рис. 4. Общий вид магнитометра третьего советского спутника:
1 — узел ориентации; 2 — блок электроники.

Все три датчика крепятся к одной рамке, которая может вращаться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Измерительный датчик устанавливается перпендикулярно плоскости рамки, а два датчика ориентации в плоскости рамки перпендикулярно осям вращения ее.

Все датчики представляли собой феррозонды, работавшие по схеме удвоения частоты. Сердечники датчиков состояли из двух тонких длинных полосок пермаллоя, на которые были нанесены особым образом первичная и вторичная обмотки. Через первичные обмотки пропускался ток с частотой 2000 герц, а со вторичных обмоток снимался ток удвоенной частоты — 4000 герц.

Сила и фаза токов, снимаемых со вторичных обмоток датчиков ориентации, определялась величиной и направлением проекций земного магнитного поля на оси датчиков. Эти то-

ки появлялись тогда, когда оси датчиков ориентации отклонялись от направления, перпендикулярного земному магнитному полю. После усиления, выпрямления и других преобразований они подавались на управляющие обмотки двух малоинерционных моторов и приводили их во вращение в ту или иную сторону в зависимости от фазы тока. Вращение этих моторов передавалось рамке с датчиками, и она поворачивалась вокруг соответствующих осей до тех пор, пока не становилась перпендикулярной полю. Изменение положения рамки относительно корпуса спутника или, что то же самое, изменение ориентации спутника относительно силовых линий поля передавалось на Землю по радио по двум каналам телеметрии.

В отличие от датчиков ориентации измерительный датчик имел еще компенсационную обмотку, по которой пропускался постоянный ток от эталонной батареи для компенсации земного магнитного поля. Ток компенсации менялся автоматически ступенями, соответствовавшими изменению поля в компенсационной обмотке в 3000γ . Измерительный датчик находился, таким образом, под действием поля, равного земному полю минус поле компенсации. При этом могли иметь место либо недокомпенсация, либо перекомпенсация поля. Нескомпенсированная часть поля компенсировалась током, возникающим во вторичной обмотке измерительного датчика под действием некомпенсированной части земного поля после выпрямления его фазочувствительным выпрямителем.

Номер ступени компенсации передавался по одному каналу телеметрии, а информация о части поля, компенсируемой током обратной связи, — по двум каналам.

Индукционный магнитометр третьего спутника является относительным прибором. Для того чтобы выразить его отсчеты в абсолютной мере, нульпункт его определялся перед запуском спутника с помощью протонного магнитометра. Длительные исследования магнитометра в магнитной обсерватории показали, что нульпункт его мало менялся со временем. Магнитометр мог работать как в режиме непосредственной передачи, так и на запоминание с последующей передачей по вызову.

«Авангард-3» летел на высотах от 510 до 3750 км. Орбита его была наклонена к экватору под углом $34^{\circ}4'$. Он был снабжен протонным магнитометром и производил измерения только по командам с семи наземных станций, расположенных вдоль экватора.

По своему устройству протонный магнитометр проще магнитометра третьего спутника. Общий вид его показан на рис. 5. В работе прибора используется явление свободной прецессии протонов (ядер водорода) в земном магнитном поле.

Создание свободной прецессии протонов и измерение ее периода производится следующим образом. Берется цилиндрический контейнер из немагнитных материалов и заполняется жидкостью с богатым содержанием протонов, например водой. На цилиндр наносится обмотка из изолированной проволоки, концы которой попеременно подсоединяются то к батарее постоянного тока, то к низкочастотному усилителю. При прохождении постоянного тока через обмотку создается магнитное поле в 100—200 раз большее земного поля и направленное под некоторым углом к нему. Протоны жидкости,

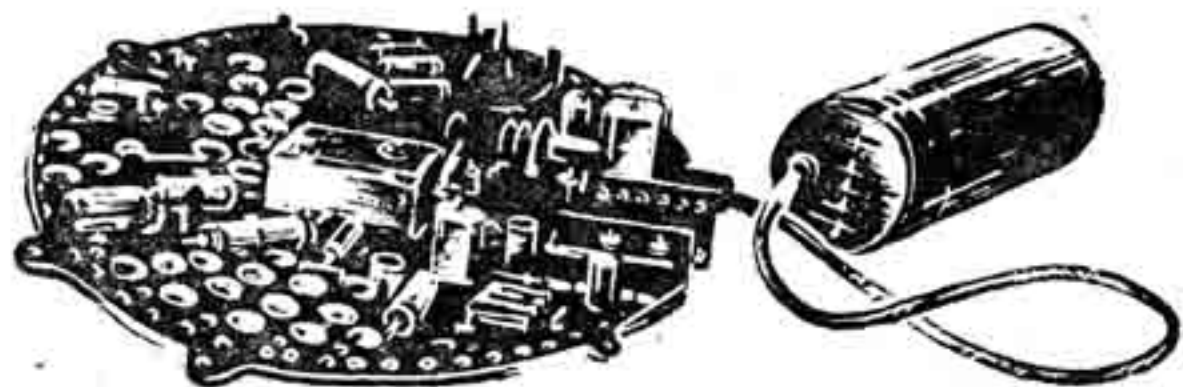


Рис. 5. Датчик и блок электроники магнитометра «Авангард-3».

обладающие магнитными и вращательными моментами, выстраиваются по направлению поля, в результате чего жидкость приобретает макроскопическое намагничение. Когда по истечении двух секунд ток отключат и концы обмотки подсоединят к усилителю, протоны жидкости начнут согласованно прецессировать вокруг силовых линий земного поля и своим магнитным полем будут возбуждать в обмотке переменный ток с частотой, равной частоте прецессии. Частота прецессии будет пропорциональна полю и равна частоте прецессии при поле в один эрстед — 4257,6 герца, умноженной на напряженность поля в эрстедах.

Ток обмотки после усиления используется для модуляции передатчика. Определив на Земле частоту сигнала, передаваемого спутником, можно узнать напряженность измеренного им поля. Из-за столкновений между частицами жидкости число протонов, участвующих в прецессии, будет довольно быстро уменьшаться и вместе с этим будет уменьшаться и амплитуда модулирующего сигнала. Однако времени затухания сигнала, около трех секунд, достаточно, чтобы зарегистрировать сигнал на Земле на магнитную пленку.

Частота прецессии меняется с изменением поля в значительных пределах, поэтому прием сигналов магнитометра ведется на земле широкополосным приемником. Сигнал обычно теряется в радиопомехах, и его приходится затем отфильтровывать.

Протонный магнитометр является абсолютным прибором высокой точности, но он не может работать в неоднородном поле.

Чтобы уменьшить неоднородность поля на «Авангарде-3», кроме магнитных измерений, проводились только измерения метеорных частиц и регистрация рентгеновского излучения. Приемная часть магнитометра была удалена от остальных приборов.

Магнитные измерения на третьем спутнике и на «Авангарде-3» дали ценные сведения об изменении поля с высотой. Они же прояснили некоторые вопросы, связанные с будущей мировой магнитной съемкой со спутников.

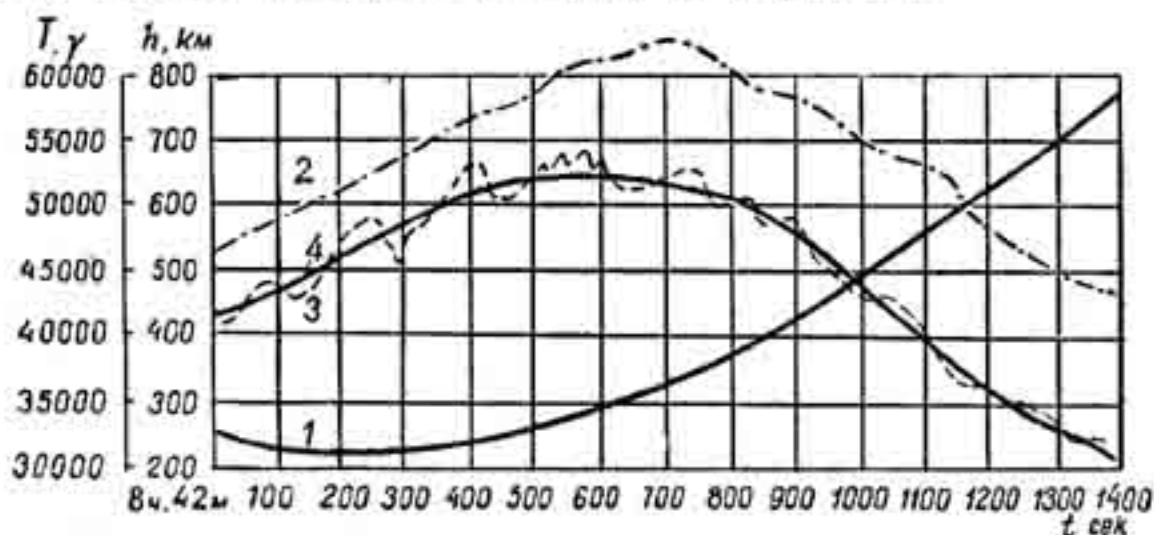


Рис. 6. Сравнение измерений третьего советского спутника с наземными данными: 1 — изменение высоты полета спутника; 2 — полная напряженность поля по наземным измерениям; 3 — напряженность поля по измерениям на спутнике; 4 — то же после исключения девиации.

Магнитные измерения на третьем спутнике проводились с 15 мая по 5 июня 1958 года. Расстояние, пройденное за это время спутником, над территорией Советского Союза превышало сотни тысяч километров. Теперь мы располагаем данными о напряженности магнитного поля на всем этом пути на высотах от 230 до 800 км. Данные же, относящиеся к большим высотам до 1880 км, имеются для областей, находящихся за пределами СССР; они были получены с помощью запоминающего устройства. К сожалению, таких данных немного, так как запоминающее устройство работало недолго.

На рис. 6 показаны данные измерений полной напряженности магнитного поля во время одного из полетов спутников через Сибирскую мировую магнитную аномалию. Для сопоставления приведены также данные о напряженности поля на Земле вдоль той же траектории, снятые с магнитных карт, и кривая измерений высоты полета. Спутник летел на этом отрезке траектории в направлении с северо-запада

на юго-восток; наименьшая высота полета была на широте 65° .

Спутник обладал достаточно большим собственным магнитным полем в месте установки магнитометра, хотя прибор был вынесен в носовую часть спутника, возможно дальше от других приборов. Магнитометр измерял поэтому геометрическую сумму земного магнитного поля и поля спутника. Спутник вращался вокруг некоторой оси с периодом около 100 секунд, и эта ось прецессировала с периодом около 130 секунд. В связи с этим менялся и угол, образуемый магнитным полем спутника с земным магнитным полем; в результате появились периодические изменения в величинах напряженности поля. Вводя поправки на девиацию (отклонение), созданную полем спутника, получают данные об изменении земного магнитного поля на высоте полета спутника. Сопоставляя эти данные с наземными, можно судить, как меняется напряженность поля над аномалиями и в нормальном поле.

Основной задачей магнитных измерений на «Авангарде-3» было изучение переменного магнитного поля, но он дал также ценные сведения для сопоставления измеренных данных с данными сферического анализа. Магнитометр работал в течение 85 дней и произвел за это время 4300 отсчетов.

Сопоставление данных измерений третьего спутника и «Авангарда-6» с соответствующими данными, полученными с помощью сферического анализа, показывает, что они совпадают между собой с точностью до 1%.

Измерения, осуществленные третьим спутником над Сибирской аномалией и «Авангардом-3» над Южно-африканской аномалией, показали, что эти аномалии слабо убывают с высотой. Отсюда можно предполагать, что причины, порождающие эти аномалии, находятся, по-видимому, на тех же глубинах, что и источники, создающие общее магнитное поле Земли.

Проведенные до сих пор измерения магнитного поля на спутниках показывают, что для мировой магнитной съемки со спутников могут быть использованы, как абсолютные, так и относительные приборы. Дело в том, что точность измерения на спутниках в настоящее время определяется не точностью магнитометров, а точностью определения координат спутника. Так, при измерениях на «Авангарде-3» ошибки магнитометра были порядка 3γ , а ошибки из-за неточного определения местонахождения спутника — порядка 60γ при высоте спутника 500 км.

Траектория следа спутника на Земле определяется вращением Земли и движением спутника по орбите. Поэтому спутник может многократно проходить над одними и теми же местами, и таким образом будет производить повторные магнит-

ные измерения. Известно, что третий спутник, орбита которого была наклонена к экватору под углом в 65° , многократно пролетал над одними и теми же примерно местами на одних своих витках в направлении на северо-восток, на других — в направлении на юго-восток. Таких мест только на территории СССР было несколько сот. Повторные измерения могут быть использованы для контроля за работой магнитометра и для определения радиальных градиентов поля, если спутник летит по эллиптической орбите.

Из абсолютных приборов перспективны для магнитной съемки рубидиевые, гелиевые и другие магнитометры, использующие для измерения слабых магнитных полей технику «оптического накачивания».

Устройство таких приборов сводится в принципе к следующему. Мы будем говорить в дальнейшем о рубидиевом магнитометре. Берется небольшой стеклянный баллон, внутри которого находится какой-либо нейтральный газ-аргон или неон и пары рубидия при низком давлении, порядка 10 миллиметров ртутного столба. Пары рубидия в баллоне просвечиваются светом рубидиевой лампы. Свет предварительно проходит через узкополосный фильтр и поляризатор и таким образом становится монохроматичным и поляризованным. Для просвечивания баллона используется спектральная линия рубидия длиной 7943 ангстрема.

Прошедший через пары рубидия свет попадает на фотоэлемент-детектор, позволяющий регистрировать его интенсивность. Атомы паров рубидия будут поглощать свет рубидиевой лампы и переходить на более высокие энергетические уровни. Каждому из этих уровней соответствует отдельная линия поглощения. Число линий поглощений определяется эффектом расщепления спектральных линий в магнитном поле.

Возбужденные атомы будут держаться на высоких уровнях только очень короткое время и затем возвратятся в нормальное состояние, но на их место «накачаются» новые атомы, поглотившие энергию света.

Магнитные моменты атомов ориентируются по направлению земного магнитного поля; в этом направлении будет наименьшее поглощение. Поглощение увеличивается, когда это упорядоченное расположение нарушится переменным магнитным полем, приложенным перпендикулярно к земному магнитному полю. Поле создается переменным током, пропускаемым через обмотку, наложенную на баллон. Наибольшее поглощение будет при резонансе с частотой линий поглощения.

Связь между магнитным полем и частотой наиболее сильной линии поглощения дается соотношением: частота (в герцах) равняется напряженности магнитного поля (в эрсте-

дах), умноженной на 100 000. Это соотношение примерно в 25 раз выгоднее, чем соотношение между напряженностью поля и частотой прецессии протонов.

В тех случаях, когда ориентация прибора относительно поля может меняться, как это имеет место на спутниках и ракетах, применяется не один, а несколько детекторов, а также несколько обмоток. Преимущество магнитометров с «оптической накачкой» перед другими типами магнитометров состоит в том, что они позволяют производить точные измере-

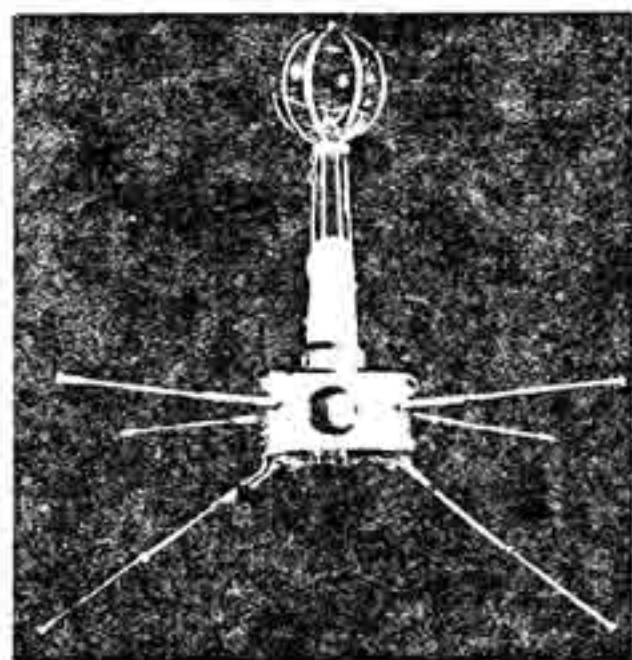


Рис. 7. Рубидиевый магнитометр.

ния в широком диапазоне полей, малоинерционны и дают возможность вести почти непрерывные измерения. На рис. 7. показан общий вид рубидиевого магнитометра, использовавшегося на «Эксплорере-10».

Три года назад был предложен новый метод анализа поля по данным измерений одной только полной напряженности поля. Этот метод требует более сложных вычислений, но они могут быть выполнены на современных электронно-счетных машинах. Пользуясь этим методом, можно вычислить соответствующие поля и построить магнитные карты для поверхности Земли и разных высот. Эти карты будут освобождены от локальных и региональных аномалий.

Вычитая из наблюдаемых значений нормальные значения, можно построить более точные карты магнитных аномалий, нужные геологам для поисков железных руд и других полезных ископаемых.

МАГНИТОМЕТРЫ ОБНАРУЖИВАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В ИОНОСФЕРЕ

Предположение о существовании электрических токов в верхних слоях земной атмосферы было высказано еще во второй половине прошлого столетия в связи с объяснением суточных вариаций земного магнитного поля. Это была смелая для своего времени мысль, так как тогда не было никаких сведений о верхних проводящих слоях атмосферы, известных теперь под названием ионосферы (воздух считался непроводником).

Дальнейшее развитие этой гипотезы привело к созданию «динамо-теории» спокойных суточных вариаций. Согласно этой теории, спокойные вариации обязаны своим происхождением электрическим токам, возникающим в ионосфере при движениях ее в постоянном магнитном поле Земли под действием приливо-отливных сил и изменения температуры.

Наряду со спокойными суточными вариациями имеются также возмущенные суточные вариации. Они наблюдаются в дни магнитных возмущений.

Возмущенные суточные вариации наиболее интенсивны в высоких широтах, в зоне полярных сияний, и на утренней и вечерней стороне Земли. Спокойные вариации наиболее сильны и ярко выражены в низких широтах, особенно в экваториальной области. Наибольшие изменения в спокойных суточных вариациях наблюдаются в дневное время около полудня по местному времени. Летом они бывают большими, чем зимой, и в годы максимума солнечной деятельности большими, чем в годы минимума солнечной деятельности.

Сферический анализ поля суточных вариаций показывает, что большая часть поля этих вариаций, примерно две трети, должна быть отнесена к причинам, находящимся вне твердого тела Земли, и одна треть — к причинам, находящимся внутри Земли.

Что касается внутренней части поля вариаций, то наиболее естественно допустить, что она создается индукционными электрическими токами, возникающими в Земле при суточных изменениях внешнего поля. Известно, что токи в Земле текут все время. В магнитно-спокойные дни они обычно слабые, но при сильных изменениях поля во время магнитных бурь они усиливаются настолько, что даже мешают работе однопроводных телеграфных линий, где обратным проводом служит Земля.

В настоящее время нет сомнения в том, что внешняя часть спокойных суточных вариаций создается электрическими токами в ионосфере. Предполагают также, что и источники возмущенных суточных вариаций могут находиться в ионосфере, по крайней мере в полярных областях.

Ионосферой называется часть атмосферы, простирающаяся по высоте примерно от 60 до 1000 км, а возможно и выше. Она отличается от нижележащих слоев атмосферы тем, что в ней имеется большое количество положительно и отрицательно заряженных частиц: ионов и электронов. Следовательно, ионосфера обладает проводимостью и при движении ее в магнитном поле Земли в ней могут возникать по индукции электрические токи.

Плотность электронов возрастает с высотой. При этом наблюдается несколько пиков или максимумов электронной плотности, сменяющихся небольшими уменьшениями в плотности, порядка 10 или 20%. Имеются три основных максимума или слоя — слой D на высоте около 85 км, слой E на высоте 110—120 км и слой F₂ между 240 и 600 км.

Кроме того, в дневное время в местах с большим зенитным углом Солнца наблюдается еще небольшой максимум плотности, известный под названием слоя F₁.

Плотность электронов, а также движение или «ветры» в этих слоях меняются в течение суток, с сезоном года, с циклом солнечной деятельности, а также в зависимости от того, является ли магнитное поле спокойным или возмущенным. Эти изменения протекают в разных слоях по-разному.

Естественно, возникает вопрос, ответственна ли за суточные вариации вся ионосфера в целом или отдельные ее слои. Ответ на этот вопрос можно получить теперь двумя путями — косвенным, сопоставляя изменения магнитного поля с изменениями различных слоев ионосферы, и прямым — проведением магнитных измерений в ионосфере на ракетах и спутниках. Посмотрим, что достигнуто этими двумя способами.

Ионосфера играет важную роль в развитии радиосвязи на большие расстояния и поэтому усиленно изучается. Основным методом исследования ионосферы до недавнего времени было вертикальное зондирование ее радиоволнами, излучаемыми вверх и принимаемыми на Земле после их отражения от ионосферы. Так можно получить данные об изменении электронной плотности с высотой в нижних частях до максимумов слоев E, F₁ F₂.

Но этот способ мало применяется для изучения слоя D. Электронная концентрация в нем настолько слабая, что она может отражать только очень длинные радиоволны, изучение которых представляет большие трудности. Наши сведения о слое D основаны поэтому больше на изучении ослабления и поглощения коротких радиоволн при их прохождении через слой D к слоям E и F₂ и обратно к Земле после отражения от них. Вторым недостатком вертикального зондирования заключается в том, что он не дает возможности судить о процессах в верхних частях ионосферных слоев, за пределами максимумов электронной концентрации в них.

Сведения о поведении ионосферы выше максимумов ионизации в слоях стали только недавно получать путем измерения на спутниках и ракетах и при наблюдении за их радиосигналами. С помощью таких наблюдений установлено, что за пределами максимума слоя F_2 ионизация убывает с высотой сравнительно медленно.

Данные вертикального зондирования и измерения поглощения радиоволн в ионосфере за большой срок говорят о том, что ионизация в слоях D, E, F_1 регулярно изменяется в зависимости от зенитного угла Солнца. Отсюда делают вывод, что ионизация в этих слоях создается ультрафиолетовой радиацией Солнца.

Установлено также, что электронная концентрация в слоях E и F_1 и поглощение в слое D в низких и средних широтах меняется с циклом солнечной деятельности примерно так же, как и амплитуда спокойных суточных вариаций. Отсюда можно сделать вывод, что слои D, E и F_1 могут быть местом токов, ответственных за спокойные суточные вариации по крайней мере в низких и средних широтах.

Имеется прямое указание, что слой D в дневное время может быть причастен к спокойным суточным магнитным вариациям. Работникам радиосвязи хорошо известны кратковременные прекращения радиосвязи на коротких волнах, которые наблюдаются только на освещенной Солнцем стороне Земли. Эти перерывы связи происходят в периоды вспышек радиации на Солнце. Вспышки приводят к усилению ионизации и, следовательно, поглощения в слое D. Они всегда сопровождаются усилением спокойных магнитных вариаций.

Верхние слои ионосферы в это время бывают нарушены очень слабо и не могут быть одни ответственны за усиление спокойных магнитных вариаций.

В отличие от нижних слоев слой F_2 ионосферы обнаруживает настолько тесную связь с магнитными возмущениями, что о возмущениях в обоих этих явлениях говорят как об едином явлении — магнитно-ионосферном возмущении, или магнитно-ионосферной буре. Наиболее характерными изменениями в слое F_2 во время магнитно-ионосферных возмущений являются значительное увеличение высоты максимума ионизации до 500 км и выше и одновременно уменьшение плотности ионизации в нем.

Кроме того, во время бури нарушается слоистое строение области F_2 , и она распадается на отдельные облачные образования, находящиеся в непрерывном турбулентном, вихревом, движении.

В высоких широтах, особенно в зоне полярных сияний, во время магнитных возмущений нарушаются не только высокие, но и низкие слои атмосферы. Наступление полярных магнит-

ных бурь, а они наблюдаются в полярных областях очень часто, всегда сопровождается усилением поглощения в слое D и образованием интенсивной спорадической (аномальной) ионизации в слое E.

Аномальная спорадическая (нерегулярная) ионизация часто наблюдается во время полярной ночи, когда регулярный (нормальный) слой E обычно отсутствует. Сопоставление магнитных и ионосферных возмущений указывает на то, что источники возмущенных магнитных вариаций находятся в полярных областях во всей толще ионосферы, а вне полярных зон — в верхнем слое.

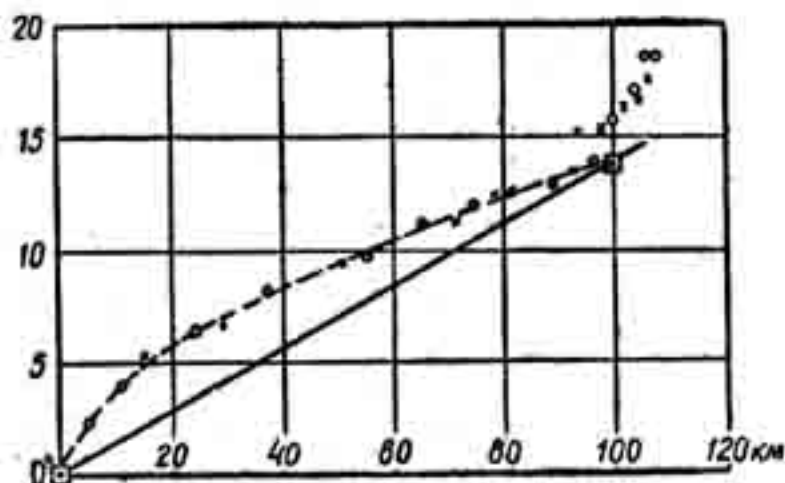


Рис. 8. Измерение магнитного поля на ракете в районе геомагнитного экватора.

Более точных указаний о высоте токовых слоев и их структуре сопоставления дать не могут. Для этого нужны измерения магнитного поля на ракетах, пока ракетные измерения проведены в районе экватора и в зоне полярных сияний.

На рис. 8 представлены результаты первого удачного измерения поля в районе геомагнитного экватора. Измеренные значения полной напряженности поля при подъеме и спуске ракеты показаны соответственно кружками и крестиками. Уменьшение магнитного поля с высотой, если бы оно происходило обратно кубу расстояния от центра Земли, показано сплошной линией, а более точный расчет с учетом магнитной аномалии, имевшейся в месте запуска, представлен прерывистой линией. Обращает на себя внимание скачкообразное изменение поля на высоте 93—105 км, указывающее на существование внешнего поля, созданного электрическими токами в ионосфере.

Три следующих измерения также обнаружили скачкообразные изменения поля, которые могут быть приписаны слоям токов на высотах 100 и 110 км. При одном измерении ракета достигла 120 км, и все же не вышла из токового слоя. Отмечено, что токи в экваториальной области были устойчи-

выми и во всяком случае не менялись от подъема к спуску ракеты, как это имело место в полярной зоне.

Измерения в полярной зоне производились во время Международного геофизического года в форте Черчилль (Канада). Подъем ракет происходил при разных состояниях магнитного поля, ионосферы и полярных сияний. Из предварительных сообщений известно, что и здесь удалось обнаружить существование токов в слое E ионосферы во время полярных сияний. Токи оказались в это время очень изменчивыми.

Преимущество ракетных магнитных измерений в том, что ракета может быть направлена в определенную область неба, например на полярное сияние; недостаток — кратковременность пребывания ракеты в исследуемой области, всего несколько минут.

Ракеты не приспособлены для изучения широтных и долготных изменений поля. Для этой цели и для изучения статистических особенностей переменных явлений более пригодны искусственные спутники.

Наличие токовых систем может быть установлено по скачку в изменении поля при пересечении токового слоя спутником и по сравнению отклонений от нормальных величин поля, измеренных на спутниках и наземных станциях. Такой прием использован при интерпретации магнитных измерений на «Авангарде-3». При этом было зарегистрировано пять умеренных и слабых возмущений магнитного поля. Где могли находиться в это время источники возмущений? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрели 10 моментов времени, когда в магнитных обсерваториях, ближайших к району спутника, наблюдались наибольшие отклонения от спокойного хода. Для этих моментов были найдены разности между значениями поля, измеренными на спутнике, и соответствующими им значениями, вычисленными по формулам сферического гармонического анализа. Эти разности характеризуют магнитные возмущения на высотах. Сопоставление их с данными регистрации поля в обсерваториях показало, что в девяти случаях из десяти знак изменений поля в обсерваториях и на спутниках был один и тот же. Отсюда сделан вывод, что система токов, создавших возмущения, находилась в это время дальше от Земли, чем спутник.

Более точные определения производились на космических ракетах и на спутниках с вытянутыми орбитами.

МАГНИТНЫЕ БУРИ И ВНЕИОНОСФЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ТОКОВ

Кроме периодических суточных вариаций в поле магнитных бурь, наблюдаются еще непериодические (аперiodические) изменения. Они зависят от времени, прошедшего от начала магнитной бури, и называются возмущенными вариация-

ми по времени бури. Наиболее четко они проявляются в низких и средних широтах. Основная их особенность заключается в том, что они протекают повсюду синхронно. Характер изменения магнитных элементов при этих вариациях виден из рис. 9.

Горизонтальная составляющая поля H в первые часы после начала бури бывает обычно больше нормального, затем она быстро уменьшается и через несколько часов начинает возвращаться к своим нормальным значениям, сначала быстро,

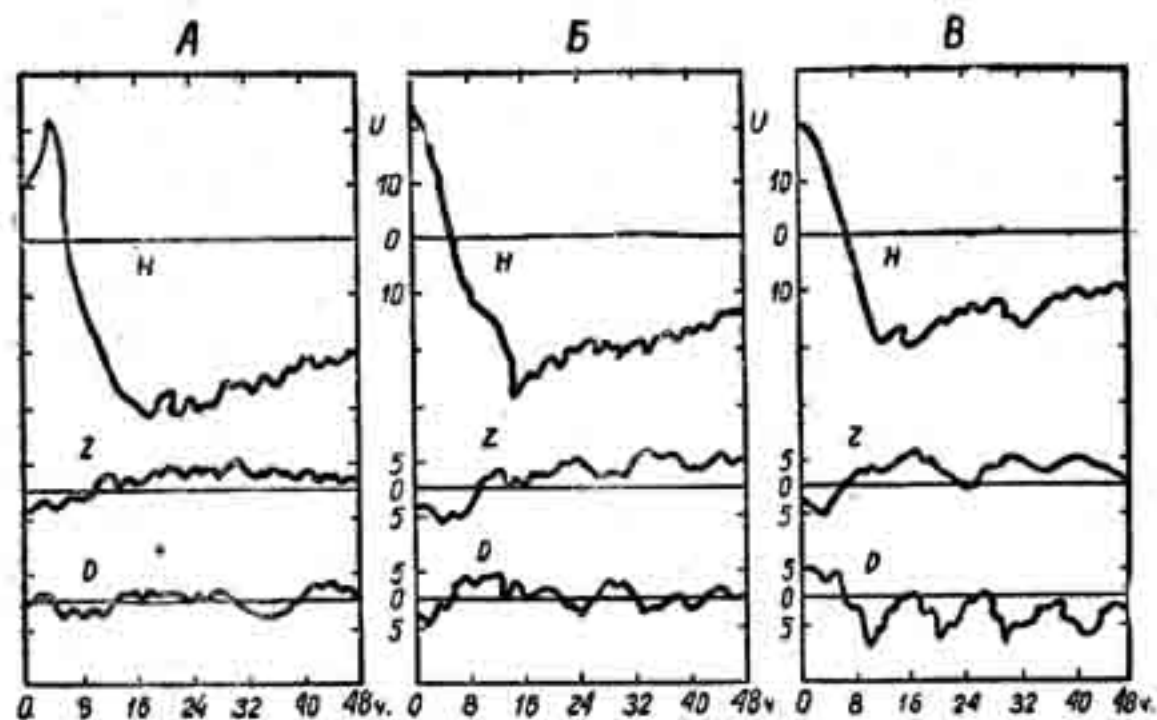


Рис. 9. Изменение магнитных элементов по времени бури на экваторных станциях (А) и станциях средних широт (Б, В).

затем все более медленно. Восстановление нормальных значений H растягивается на очень долгое время и обычно прерывается следующей бурей. Соответственно с этими изменениями различают три фазы магнитной бури: первая фаза — увеличение H , вторая или главная фаза (Б) — уменьшение H и третья фаза — фаза восстановления нормальных значений H . Изменения вертикальной составляющей Z меньше изменений H и протекают с обратной фазой; изменения склонения D очень малы и нерегулярны.

Магнитные бури — очень сложное явление; не менее сложна связь между ними и другими геофизическими явлениями. Известно, например, что интенсивность космических лучей во время магнитных бурь обычно уменьшается. В то же время бывают бури, и притом очень большие, при которых этот эффект не наблюдается.

Тесные связи существуют между магнитными бурями и полярными сияниями. В спокойные в магнитном отношении дни полярные сияния бывают видны только в высоких широтах.

тах в Арктике и в Антарктике. В дни магнитных бурь они как бы стягиваются в более низкие широты и могут быть видны почти у экватора.

Магнитно-ионосферные бури и полярные сияния обнаруживают тесную связь с солнечной деятельностью и проявляют тенденцию к повторению примерно через 27 дней — промежуток времени, близкий к синодическому периоду обращения Солнца вокруг оси.

Тесная связь магнитных возмущений и полярных сияний с солнечной деятельностью уже давно привела к выводу, что оба явления вызываются действием заряженных частиц — корпускул, выбрасываемых из Солнца и захватываемых магнитным полем Земли. Норвежские ученые Биркеланд и Штермер были первыми, кто еще в конце прошлого столетия попытался разработать теорию полярных сияний и магнитных бурь, исходя из указанной предпосылки. Они шли различными путями.

Штермер много лет занимался расчетом траекторий заряженных частиц, внедряющихся в магнитное поле Земли.

Биркеланд проверял гипотезу на опытах. Он помещал сферический электромагнит (тереллу) в большую вакуумную трубку, облучал ее катодными лучами (электронами) и наблюдал, что делается с ними вблизи тереллы.

Штермер показал, что только очень энергичные частицы, обладающие скоростью, близкой к скорости света, например жесткие космические лучи, могут достигнуть поверхности Земли во всех ее частях. Менее жесткие частицы будут либо отклоняться магнитным полем, либо попадать на Землю в узких кольцевых зонах вблизи магнитных полюсов Земли. Здесь они могут полностью поглощаться в атмосфере Земли или приблизиться к Земле на некоторое расстояние и затем повернуть обратно. Расчеты Штермера не указывали на возможность захвата таких частиц магнитным полем и на движение их по спиральям вдоль силовых линий из одного полушария в другое, хотя опытами Биркеланда такие движения частиц были установлены.

В числе рассчитанных Штермером орбит были незамкнутые, почти круговые орбиты в плоскости геомагнитного экватора, при которых частицы облетают большую или меньшую часть Земли, но не становятся еще спутниками. Штермер предположил, что число таких частиц, движущихся вокруг Земли, вблизи экваториальной плоскости, может увеличиваться во время магнитных бурь. Движение заряженных частиц вокруг Земли будет равносильно кольцу тока. Ток станет течь с востока на запад, его магнитное поле будет уменьшать магнитное поле Земли внутри кольца, и благодаря этому произойдет уменьшение горизонтальной составляющей во время бури и перемещение зоны полярных сияний к экватору.

Позднее действию магнитного поля тока приписывалось также изменение интенсивности космических лучей во время магнитных бурь. По расчетам Штермера, кольцевой ток должен образовываться на расстоянии около 100 земных радиусов от центра Земли (радиус Земли равен примерно 6400 км).

Опыты Биркеланда повторялись потом многими учеными с более совершенной техникой. Наблюдения проводились с помощью тонких пучков лучей, в виде нитей, что давало возможность воспроизводить траектории частиц. На рис. 10 приведены снимки траекторий частиц, электронов, наблюдавших-

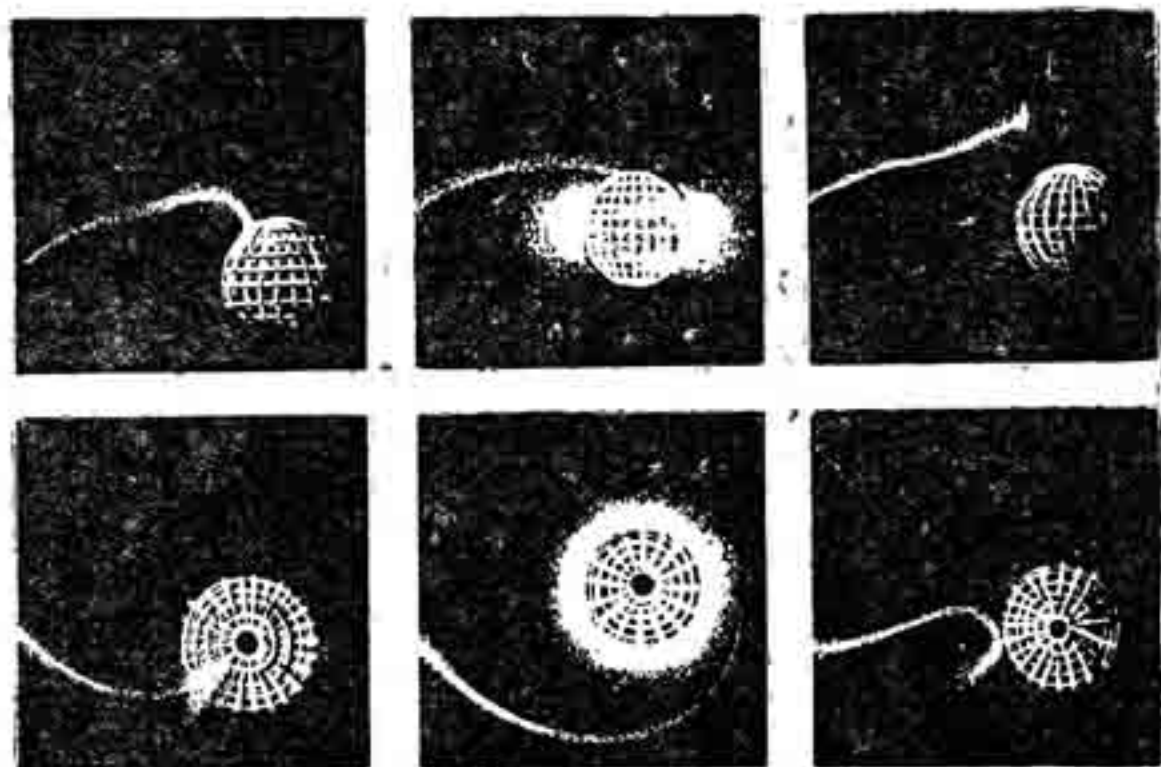


Рис. 10. Движение потоков заряженных частиц в магнитном поле тереллы. Верхние снимки — вид сбоку; нижние — вид сверху, на Северный полюс.

ся на «штермертроне» Беннета. Верхние три фотографии сняты сбоку, нижние сверху, со стороны Северного полюса. Левые снимки изображают поток частиц, захваченных магнитным полем тереллы и направляемых им на ее «ночную» сторону в зону северных полярных сияний. Видно, как многие частицы «отражаются», не доходя до тереллы, и направляются вдоль силовых линий в ее южное полушарие. Правые снимки показывают частицы потока, отклоняемые магнитным полем тереллы, а снимки в середине демонстрируют образование вокруг тереллы радиационной зоны и кольцевого тока.

Согласно теории Биркеланда — Штермера, полярные сияния вызываются свечением воздуха, порождаемого вторжением заряженных частиц в верхние разреженные слои земной

атмосферы, а магнитные бури — непосредственным действием магнитного поля движущихся частиц. Чтобы вызвать большие изменения поля во время магнитных бурь, надо иметь очень плотный поток частиц. Однако при переходе от Солнца к Земле плотный поток, состоящий из частиц одного знака, должен рассеяться из-за взаимного отталкивания частиц. Теория Биркеланда—Штермера оказалась поэтому непригодной для объяснения магнитных возмущений, хотя она осталась в силе для объяснения движения в магнитном поле Земли частиц больших энергий и малых концентраций, подобных космическим лучам.

В последние тридцать лет было предложено довольно много новых теорий полярных сияний и магнитных бурь. Число их со временем не уменьшается, а возрастает, что свидетельствует об интересе к полярным сияниям и магнитным бурям и о недостатке наших знаний о явлениях в космическом пространстве.

Одна такая теория предложена два года назад Десслером и Паркером; другая — в тридцатых годах Чепманом и Ферраро. В настоящее время она разрабатывается Чепманом и Акасафу с учетом последних исследований магнитных явлений и корпускулярных радиаций на спутниках и ракетах.

Теория Чепмана, как и многие другие, более поздние, строится на допущении, что Солнце испускает из активных областей нейтральные потоки, состоящие из нейтральных частиц и из равного числа положительно и отрицательно заряженных частиц. Это предположение соответствует современным представлениям о плазменном состоянии атмосферы Солнца. Далее предполагается, что потоки выбрасываются в виде сравнительно узких пучков и что они достигают Землю на вечерней стороне при ее движении по орбите вокруг Солнца. Скорость частиц в потоке около 1000 км в секунду была определена по времени запаздывания между вспышками радиации на Солнце и началом магнитных бурь на Земле.

На поверхности проводящего потока, обращенной к Земле, при внедрении его в магнитное поле Земли должны возникать электрические токи. Магнитное поле этих токов будет препятствовать силовым линиям земного магнитного поля проникать в глубь потока. Продвигаясь по инерции дальше, поток начнет сжимать силовые линии земного магнитного поля, и скорость его движения к Земле замедлится. При этом сжатие силовых линий земного поля будет отмечено на Земле в виде первой фазы магнитной бури, характеризующейся увеличением горизонтальной составляющей поля.

Встречая сопротивление со стороны магнитного поля, поток начнет обходить Землю, и в нем образуется как бы «дупло». Предполагается, что в то время, как поток будет обходить Землю, часть частиц его может быть захвачена и удержана

силовыми линиями магнитного поля; образуется кольцевой ток, который будет циркулировать, постепенно ослабевая и после выхода Земли из потока. Кольцевой ток ответствен за главную фазу магнитных бурь, а его ослабление порождает последнюю фазу бури — постепенное возвращение поля к нормальным значениям.

Как создается круговой ток — неизвестно. Возможно, что здесь действует механизм, рассмотренный в свое время Альфвеном и использованный несколько лет назад Зингером в его теории магнитных бурь. Предполагается, что заряженные частицы, захваченные магнитным полем Земли, совершают одновременно два движения: перемещаются вдоль силовых линий поля из одного полушария в другое и, кроме того, переносятся вокруг Земли в направлении перпендикулярном полю.

Частицы, перемещающиеся из одного полушария в другое, будут вращаться вокруг силовых линий магнитного поля по спиралям. Электроны и протоны вращаются по спиралям в разных направлениях, так что создаваемое при их вращении поле противоположно земному полю. Радиусы спиралей прямо пропорциональны массам частиц и обратно пропорциональны напряженности поля. Следовательно, радиусы частиц будут уменьшаться при перемещении их в более высокие широты и, кроме того, у протонов они будут в 1840 раз больше, чем у электронов.

Магнитное поле Земли убывает с высотой. Поэтому траектория частиц должна быть более пологой в верхней части спирали и более крутой в нижней части спирали. В результате этого частицы будут смещаться в направлении перпендикулярном полю и его градиенту: протоны — в направлении с востока на запад, электроны — с запада на восток, что создаст дрейфовый ток западного направления. Наиболее сильный ток будет течь в области геомагнитного экватора. Наиболее эффективными частицами, создающими его, окажутся протоны.

Расстояние от центра Земли, на котором поток может создать кольцевой ток, определится кинетической энергией потока. По оценке Чепмана и Акасафу, оно может составить от 3 до 10 земных радиусов. Это расстояние будет уменьшаться при перемещении от геомагнитного экватора в более высокие широты, так как токовый слой будет следовать за силовыми линиями.

Допускается возможность одновременного существования нескольких токовых слоев, созданных на разных расстояниях от центра Земли потоками разной интенсивности, пришедшими в разное время. Под влиянием кольцевых токов земное магнитное поле на расстоянии нескольких земных радиусов от центра Земли будет меняться, но не так, как поле одно-

родного намагничения. Оно может быть в одних местах меньше, в других больше поля однородного намагничивания. Возможны даже места, где поле будет равно нулю.

Считают, что области нулевого поля образуются на ночной стороне, в районе геомагнитного экватора. При одном кольцевом токе будут две области нулевого поля — между кольцевым током и Землей и вторая — внутри кольцевого тока. В первой области собираются электроны и отчасти протоны. Отсюда они поступают вдоль силовых линий земного магнитного поля в полярные области, где вызывают полярные сияния и образуют токи возмущенных суточных вариаций.

Большинство теорий магнитных бурь и полярных сияний рассматривало околоземное пространство как вакуум, начинающийся с некоторого расстояния от ионосферы. Ими не учитывалась также возможность существования магнитного поля в космическом пространстве.

Около восьми лет назад Бирман выдвинул гипотезу о существовании солнечного ветра. Считалось, что этот ветер образуется частицами солнечной плазмы, постоянно испускаемыми Солнцем. Действием солнечного ветра объяснялось ускорение частиц в газовых хвостах комет,

Предполагалось, что солнечный ветер, так же, как и корпускулярные потоки, сжимает силовые линии земного магнитного поля и обтекает Землю, образуя вокруг нее громадное пустое пространство, куда не могут попадать солнечные частицы.

Различные авторы очень по-разному рисовали себе конфигурацию земного магнитного поля, ограниченного солнечным ветром. Они исходили из разных предположений о плотности частиц, скорости ветра и его температуры.

В то время, как одни исследователи рассматривали околоземное пространство как пустое, другие приходили к выводу, что в нем должна быть значительная концентрация электрических заряженных частиц. Стори в 1953 году, пытаясь объяснить распространение атмосферных радиопомех, известных под названием атмосферных свистов, должен был допустить, что на расстоянии двух-трех земных радиусов от центра Земли имеются заряженные частицы плотностью не менее одной тысячи электронов в кубическом сантиметре.

Теперь благодаря измерениям корпускулярной радиации на спутниках и ракетах мы знаем, что атмосфера простирается на десятки тысяч километров от центра Земли и состоит из заряженных частиц.

Исходя из этих новых данных, Десслер и Паркер выдвинули в 1959 году гидромагнитную теорию магнитных бурь. Укажем на основные ее положения,

При сильно разреженном газе, обладающем высокой проводимостью, магнитное поле как бы «замораживается» в газе и составляет с ним одно целое.

Предполагается, что в обычное время, когда нет возмущения, магнитное поле Земли находится под давлением солнечного ветра и простирается не более чем на 6—10 земных радиусов от центра Земли. Приходящий от Солнца корпускулярный поток сжимает магнитное поле на обращенной к Солнцу стороне Земли. Сжатие передается остальным частям поля в виде гидромагнитной волны и отмечается на Земле как внезапное начало магнитной бури.

Сжатие будет продолжаться до тех пор, пока отдельные части потока не прорвут магнитное поле и не распространятся в нем, преимущественно между 3—5 земными радиусами. Когда это произойдет, начнется главная фаза магнитной бури. Частицы потока, распространившиеся внутри поля, будут перемещаться по спиральным траекториям вдоль силовых линий магнитного поля из одного полушария в другое и обратно.

При этом возникают центробежные силы, которые смещают частицы и вместе с ними силовые линии поля в сторону от Земли. Это отмечается уменьшением горизонтальной составляющей на Земле. В создании главной фазы бурь основную роль играют протоны с более высокой энергией. После того как поток пройдет мимо Земли, число таких протонов начнет уменьшаться. Это будет происходить благодаря обмену зарядами между протонами и нейтральными атомами водорода при их столкновениях в точках отражения.

Протоны будут захватывать электроны нейтральных атомов и превращаться в нейтральные атомы, не имеющие связи с магнитным полем. Уменьшение числа протонов повлечет за собой возвращение силовых линий к их нормальному положению, что будет отмечаться на Земле как третья фаза магнитной бури.

Действие заряженных частиц должно проявляться и в других эффектах, но они имеют меньшее значение.

РАДИАЦИОННЫЕ ЗОНЫ ЗЕМЛИ

Измерения корпускулярной радиации на спутниках и ракетах существенно изменили наши представления об окружающем Землю пространстве за пределами ионосферы. Теперь мы знаем, что все это пространство заполнено заряженными частицами протонами и электронами различных энергий. Они образуют радиационную зону или радиационные пояса Земли. Размеры радиационной зоны огромны. Можно думать, что ее поперечник составляет в плоскости геомагнитного экватора не меньше 30 земных радиусов.

Обнаружение радиационной зоны — одно из крупнейших открытий, сделанных с помощью спутников и ракет. Первые указания на существования радиационной зоны были получены советскими учеными С. Н. Верновым и А. Е. Чудаковым и их сотрудниками при измерениях корпускулярной радиации на втором советском спутнике.

Хотя измерений корпускулярной радиации в радиационной зоне было сделано значительно больше, чем магнитных измерений, мы еще очень мало знаем о происхождении частиц, их энергетическом спектре, о распределении частиц внутри зоны и об изменениях структуры и размеров зоны во времени при разных состояниях солнечной и магнитной активности.

Читатель должен иметь в виду, что радиационные измерения значительно труднее магнитных измерений, особенно в случае частиц малых энергий. Исследователям приходится пользоваться различными приборами: ионизационными камерами, одиночными и тройными счетчиками Гейгера-Мюллера, сцинтилляционными счетчиками, ионными ловушками. Эти приборы помещают внутри и вне корпуса ракет и спутников, с различного рода экранами и без экранов. Только сопоставляя результаты различных измерений можно получить более или менее достоверные данные.

Интенсивность корпускулярной радиации может характеризоваться иногда глобальной интенсивностью, а иногда однонаправленной интенсивностью. В первом случае речь идет о числе частиц, проходящих за секунду с разных направлений; во втором случае — о числе частиц, пересекающих площадку в один квадратный сантиметр за секунду времени в расчете на единицу телесного угла — 1 стерадиан. Энергия частиц измеряется электроновольтами (эв) — энергией в один электронвольт будет обладать электрон, ускоренный в электрическом поле с разностью потенциалов в один вольт. Следующие единицы: килоэлектронвольт (Кэв) и мегаэлектронвольт (миллион электронвольт), обозначаемый Мэв . Частицы корпускулярных потоков, движущиеся со скоростью 1000 км в секунду, будут обладать кинетической энергией: протоны — $5,2 \text{ Кэв}$, а электроны — всего $2,8 \text{ эв}$.

Измерения радиации на спутниках и ракетах показывают, что радиационная зона, подобно ионосфере, распадается на ряд поясов. В настоящее время имеются данные о двух поясах, которым присвоены названия внутренний пояс и внешний пояс. Имеются, однако, основания думать, что существует еще один, более далекий пояс. Внутренний пояс простирается в области геомагнитного экватора примерно до двух земных радиусов от центра Земли. Интенсивность радиации в нем по мере удаления от Земли вначале возрастает, а затем, достигнув некоторого максимума, начинает постепенно уменьшаться. По оценкам американского ученого

Ван-Аллена однонаправленная интенсивность радиации в центре внутреннего пояса, на геомагнитном экваторе, на расстоянии 10 000 км от центра Земли, характеризуется следующими цифрами:

число электронов с энергиями более 40 Кэв примерно 10^9 ;

число электронов с энергиями более 600 Кэв примерно 10^7 ;

число протонов с энергиями более 40 Мэв — меньше $2 \cdot 10^4$.

Внутренняя зона почти не меняется со временем и не обнаруживает какой-либо отчетливо выраженной зависимости от солнечной деятельности и состояния магнитного поля Земли.

Наиболее принятое сейчас объяснение происхождения частиц внутренней зоны, высказанное независимо советскими и американскими учеными, приписывает их альbedo космических лучей. Известно, что первичные космические лучи, бомбардируя атмосферу, порождают массу вторичных космических лучей и в том числе какое-то количество свободных нейтронов. Часть их движется к Земле, часть — от Земли. Они не заряжены, и потому магнитное поле на них не действует. Через некоторое время часть свободных нейтронов распадается на протоны и быстрые нейтроны. Эти частицы заряжены; они захватываются силовыми линиями магнитного поля и входят в состав частиц внутренней зоны.

Внешняя зона простирается, в области геомагнитного экватора, от 16 до 40—60 тыс. км. Размеры зоны и интенсивность радиации в ней сильно меняются со временем. Какие большие изменения могут наблюдаться в размерах зоны и в ее интенсивности видно на рис. 11, на котором показаны результаты измерений радиации во внешней зоне на первой и второй космических ракетах, проведенных с помощью одинаковой аппаратуры. Изменения в интенсивности и конфигурации внешней зоны тесно связаны, с одной стороны, с солнечной деятельностью и, с другой, с магнитными бурями и полярными сияниями. Это делает вероятным предположение, что частицы, образующие внешнюю зону, — солнечного происхождения.

Так как интенсивность радиации меняется со временем, то не удивительно, что оценки интенсивности, даваемые разными исследователями, расходятся между собой. Мы приведем здесь цифры Ван-Аллена. Они относятся к 31 марта 1959 года, ко дню, когда наблюдалось умеренное возмущение. Глобальная интенсивность в этот день в центре внешнего пояса, на экваторе, на расстоянии 22 тыс. км от центра Земли, характеризовалась, по Ван-Аллену, следующими цифрами:

число электронов с энергиями больше 40 Кэв было примерно 10^{11} ;

число электронов с энергиями большими 200 Кэв было меньше, чем 10^8 ;

число протонов с энергиями большими 60 Мэв было меньше 10^2 .

Число электронов с энергиями меньшими 40 Кэв и протонов с энергиями меньшими 40—60 Мэв в обоих поясах остается до сих пор неизвестным.

Итак, в радиационных поясах имеются частицы с меньшими энергиями, чем космические лучи, но далеко превосходящие по своим энергиям те, которые можно было бы ожидать

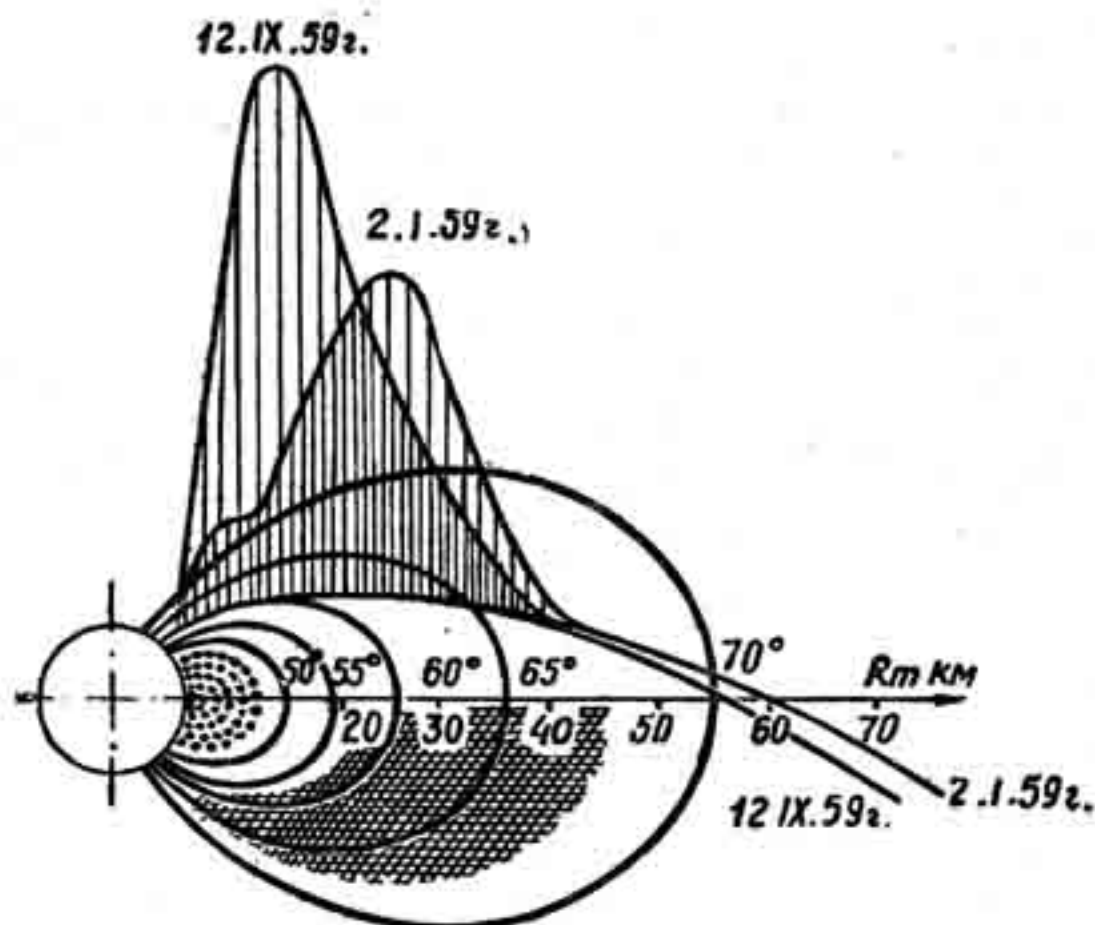


Рис. 11. Сопоставление измерений интенсивности радиации, выполненных первой и второй космическими ракетами.

в простом корпускулярном потоке, движущемся со скоростью 4000 км в секунду. Откуда берутся частицы таких энергий? Можно допустить, и так делают некоторые авторы, что в земном магнитном поле имеется неизвестный нам ускоряющий механизм, который ускоряет частицы корпускулярных потоков до высоких энергий. Существует и иное предположение, а именно, что медленно движущиеся солнечные потоки способны нести с собой «замороженное» магнитное поле Солнца и частицы могут быть захвачены и удерживаться этим полем.

Известны и другие явления, подтверждающие существование высокоэнергичных солнечных частиц. Так, в спектрах полярных сияний очень часто наблюдается доплеровское смещение линий водорода, указывающее на то, что в полярных

сияниях имеются протоны со скоростью до 3000 км в секунду и, следовательно, с энергиями до 45 Кэв.

В период Международного геофизического года в форте Черчилль (Канада) удалось сделать несколько непосредственных измерений на ракетах числа протонов и электронов и их энергий в тех местах неба, где были видны полярные сияния. Они показали, что сияния создаются главным образом электронами с энергиями до 10 Кэв, но в них наблюдаются также протоны с энергиями до 100 Кэв и выше. Интересно, что протоны обнаруживаются также, правда, в меньшем числе, и в области, где не было сияний.

Можно указать еще на один вид высокоэнергичных солнечных частиц — солнечные космические лучи. Когда на Солнце происходят очень сильные хромосферные вспышки, они обычно сопровождаются усилением радиоизлучения высоких и ультравысоких частот. Оно распространяется со скоростью света и отмечается на Земле, практически, во время вспышки. Вслед за этим через промежуток времени от получаса до 6—8 часов в полярных шапках Арктики и Антарктики наблюдается усиление поглощения радиоволн. Оно приводит к уменьшению космического радишума, или, как говорят, неземных радиопомех.

Это явление вызывается приходом в полярные области «солнечных протонов» с энергиями, превосходящими 100—200 Мэв. Эти протоны обнаруживаются также прямым способом при измерениях космических лучей на ракетах и на шарах-зондах, на высотах порядка 30 км. Быстро достигнув некоторого максимума, число протонов начинает затем уменьшаться, вначале быстро, затем все более медленно. Это уменьшение растягивается на несколько дней, и на него не влияют магнитные бури, наступающие обычно через один-два дня после вспышек.

Во время главной фазы магнитных бурь наблюдается новое увеличение числа протонов с энергиями до 300 Мэв, но уже в зоне полярных сияний на геомагнитных широтах между 65 и 75°. Оно также сопровождается усилением поглощения радиоволн. Характерно, что на Земле в это время наблюдается уменьшение интенсивности космических лучей (Форбуш-эффект).

Можно указать шесть случаев, зарегистрированных за последние четверть века, когда хромосферные вспышки сопровождались усилением интенсивности космической радиации на уровне моря на всей земле через 15—100 минут после вспышки.

Такие случаи могут быть объяснены приходом от Солнца очень жестких космических лучей (протонов) с энергиями более миллиона электроновольт. Из того, что было сказано выше, видно, что во время вспышек от Солнца могут выхо-

дить частицы разных энергий и что они могут приходить на Землю через разные промежутки времени. Последнее можно объяснить, по-видимому, если допустить, что какая-то часть высокоэнергичных частиц может опережать основной поток. Если плотность их небольшая, то они могут двигаться как отдельные частицы по Штермерским траекториям и попадать в полярные шапки до начала магнитной бури.

Посмотрим теперь, что происходит во время магнитной бури в радиационной зоне. Измерения на спутниках и ракетах обнаружили здесь интересные, но еще до конца не понятые изменения. Мы проиллюстрируем их на двух рисунках (12 и

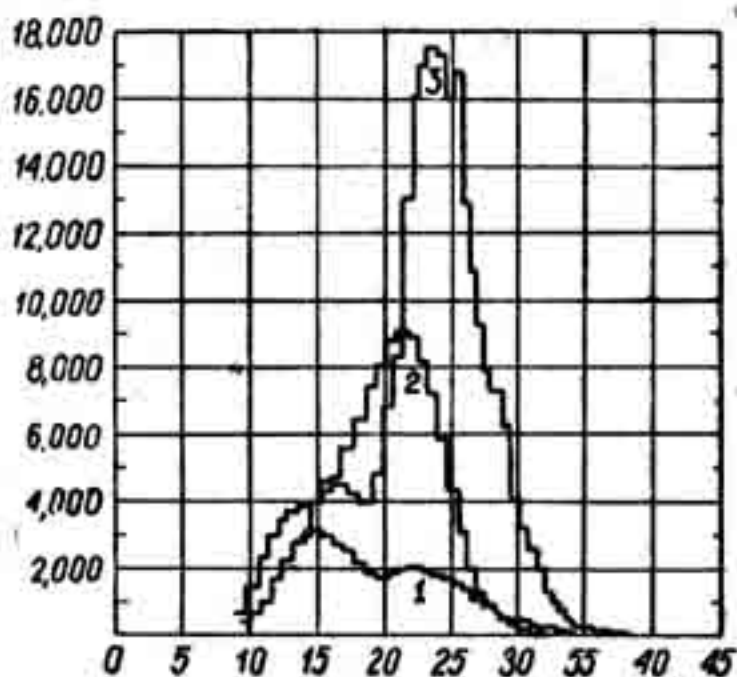


Рис. 12. Изменение интенсивности радиации во время бури 16—20 августа 1959 года по измерениям ионизационной камерой «Эксплорера-6». По горизонтали расстояния от центра Земли в тысячах километров.

13), построенных по данным измерений радиации на «Эксплорере-6» во время магнитной бури 16—20 августа 1959 года. Измерения производились с помощью ионизационной камеры и сцинтилляционного счетчика.

На рис. 12 дано сопоставление результатов измерений интенсивности радиации ионизационной камерой при трех прохождениях спутника через внешнюю зону; ломаная 2 — представляет измерения до начала бури, ломаная 1 — через день после начала бури и ломаная 3 — через два дня после начала бури. Спутник проходил в это время примерно через одну и ту же область внешней зоны, со средней геомагнитной широтой порядка 20°N .

Ионизационная камера может регистрировать электроны, начиная от энергий около 40 Кэв, по рентгеновскому излучению, возбуждаемому ими в оболочке камеры.

Мы видим, что в течение первого дня бури внешняя зона потеряла примерно три четверти своих электронов, зато через два дня, к концу активного периода бури, число их увеличилось по сравнению с нормальным состоянием, предшествующим буре, примерно вдвое. В последующие дни наблюдалось уменьшение числа электронов, но более медленное, чем возвращение к нормальному состоянию магнитного поля Земли после бури.

На рис. 13 приведены данные измерений интенсивности радиации с помощью сцинтилляционного счетчика до начала бури (кривая 1) и сразу же после начала бури (кривая 2).

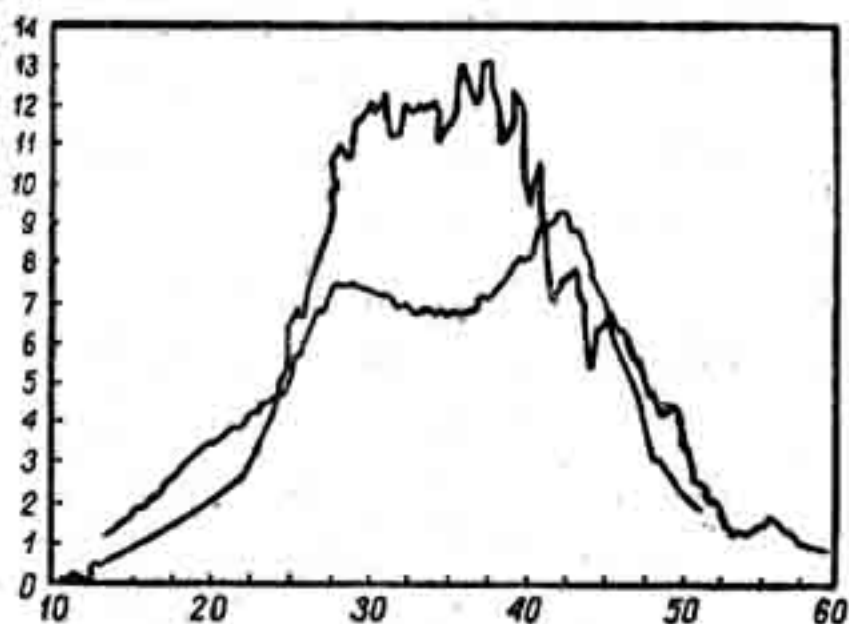


Рис. 13. Изменение интенсивности радиации во время магнитной бури 16—20 августа 1959 г. по измерениям сцинтилляционным счетчиком «Эксплорера—б». По оси абсцисс — расстояние от центра Земли в тысячах километров,

Сцинтилляционный счетчик мог регистрировать электроны с энергиями больше 200 Кэв и протоны с энергиями больше 2 Мэв. Из сопоставления рисунков видно, что в отличие от ионизационной камеры сцинтилляционный счетчик отметил в первый день после начала бури не уменьшение, а увеличение интенсивности радиации на расстоянии от трех до четырех земных радиусов от центра Земли. Это могло быть только в том случае, если счетчик регистрировал не электроны, а протоны.

Отметим попутно еще одно обстоятельство. Из рисунков 12 и 13 видно, что интенсивность радиации в части внешней зоны, лежащей ближе к Земле, меняется сравнительно мало. Можно поэтому предположить, что внешняя зона распадается на две области: одна из них подвержена во время магнитных бурь слабым, а другая — сильным изменениям,

Куда же девались электроны, исчезнувшие из внешней зоны в первый день магнитной бури?

Они могли переместиться вдоль силовых линий магнитного поля в полярные области и вызвать там полярные сияния. Расчет показывает, что в подобном случае сияния должны быть видны в зените между геомагнитными широтами 52 и 62°, т. е. ближе к экватору, чем обычно. В ночь с 16 на 17 августа 1959 года станции визуальных наблюдений полярных сияний действительно отметили очень сильное сияние на геомагнитной широте 57°.

Приведенные примеры показывают, что полярные сияния могут вызываться зарядами, аккумулярованными во внешней радиационной зоне. Наиболее часто полярные сияния в Арктике и Антарктике видны на геомагнитной широте $\pm 70^\circ$. Соответствующие этой широте силовые линии пересекают геомагнитный экватор на расстоянии около 60 тыс. км от центра Земли, т. е. за границей внешней радиационной зоны. Поэтому необходимо допустить, что радиационная зона не кончается на этом расстоянии, а продолжается дальше, только там она образуется частицами с энергиями меньшими 30—40 Кэв, которые не могут быть отмечены большинством приборов.

К такому же выводу приводят измерения радиации ионными ловушками, проведенные К. И. Грингаузом и его сотрудниками на первой и второй космических ракетах. Они отметили на расстояниях от 55 до 75 км от центра Земли потоки электронов с энергиями более 200 эв с интенсивностью порядка $2 \cdot 10^8$ на квадратный сантиметр в секунду времени.

К предположению о существовании частиц за пределами внешней зоны приводят также магнитные измерения на спутниках и ракетах, о чем будет сказано дальше.

Полярные сияния наблюдаются вплоть до геомагнитных полюсов Земли. Они, возможно, вызываются частицами, приходящими непосредственно от Солнца, минуя радиационную зону.

МАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВО ВНЕШНЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗОНЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Исследования во внешней радиационной зоне были произведены во время полетов первой и второй советских космических ракет магнитометрами с зондами насыщения и при полетах ракеты «Пионер» и на спутнике «Эксплорер-6» магнитометрами с зондирующей катушкой. Аналогичные приборы использовались и при последующих измерениях, поэтому мы остановимся на них несколько подробнее.

Магнитометр, использовавшийся на космических ракетах, имел три независимых измерительных датчика, жестко скрепленных с корпусом ракеты и ориентированных по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Каждый датчик измерял проекцию поля на направление его продольной оси, которое менялось при вращении ракеты. Полная напряженность поля определялась как векторная сумма, равная квадратному корню из суммы квадратов показаний трех датчиков. Диапазон измерений у них был значительно меньше, чем у магнитометра третьего спутника.

Первая космическая ракета могла измерять полную напряженность поля до 3500γ с погрешностью около 100γ . Она была запущена, как известно, в сторону Луны и, пройдя мимо Луны на расстоянии около 5—6 тыс. км, стала первой искусственной планетой солнечной системы.

Магнитометр второй ракеты предназначался для измерения магнитного поля Луны; чувствительность его была увеличена примерно в 4 раза, и соответственно с этим его диапазон уменьшился в 2 раза.

Погрешность измерений полной напряженности поля магнитометра второй ракеты была порядка 50γ . Величина погрешности определялась собственным полем ракеты в месте установки датчиков. Она могла быть определена не только в лаборатории, но и в полете по показаниям датчиков за пределами земного поля. Когда магнитометр находился в поле большем его погрешности, в показаниях датчиков отмечались синусоидальные колебания с периодом равным вращению ракеты. Они прекращались, как только магнитометр попадал в более слабое поле.

Одним трехкомпонентным и двумя однокомпонентными магнитометрами с сердечниками насыщения была снабжена также межпланетная станция, посланная советскими учеными к Венере 12 марта 1961 года.

Магнитометр американской ракеты «Пионер-1» предназначался для измерения магнитного поля Луны, но ракета не прошла даже четверти расстояния до Луны и упала обратно на Землю.

Датчиком магнитометра служила зондирующая катушка (соленоид), навитая на сердечник, набранный из тонких пластин железоникелевого сплава большой магнитной проницаемости. Зондирующая катушка крепилась в контейнере ракеты так, чтобы ее ось была перпендикулярна оси собственного вращения контейнера. Контейнеры американских ракет приводятся в быстрое вращение с частотой около двух оборотов в секунду. Вращение и использование прецессионных демпферов позволяют сохранить одну и ту же ориентацию оси вращения контейнера в пространстве и не иметь прецессии.

В зондирующей катушке при ее вращении в магнитном поле возникает электродвижущая сила. Возбужденный в катушке электрический ток усиливается в особом усилителе и передается на радиопередающее устройство.

На контейнере имеется аспект-индикатор — малочувствительный фотоэлемент, который фиксирует моменты, когда он бывает обращен к Солнцу. Зная взаимное расположение индикатора и зондирующей катушки и скорость вращения ракеты, можно по показаниям индикатора определить угол между плоскостью витков катушки и плоскостью, проходящей через ось вращения контейнера и Солнца.

Если измерения проводятся в магнитном поле Земли, можно определить угол, образуемый плоскостью витков катушки с направлением силовых линий поля однородного намагничивания. Отсюда легко вычислить проекцию поля однородного намагничивания на плоскость витков катушки. В тех случаях, когда вычисленная проекция и проекция поля, измеренная катушкой, не совпадают, можно считать, что измеренное поле не сводится к однородному полю и что наряду с ним есть еще какое-то другое поле. На большом расстоянии от Земли это может быть только внешнее поле.

Какова полная напряженность внешнего поля, магнитометр с зондирующей катушкой показать не может, так как он измеряет только проекции поля на плоскость. В этом отношении магнитометр с одной зондирующей катушкой уступает трехкомпонентному магнитометру с зондами насыщения. Однако он имеет и преимущества. Показания его не зависят от собственного магнитного поля контейнера ракеты, поскольку оно вращается вместе с ракетой. Кроме того, трехкомпонентный магнитометр обладает значительно большей чувствительностью, чем магнитометр с зондами насыщения, и может измерять поля в несколько гамм. Верхний предел измерений у «Пионера-1» был порядка 1500γ.

Аналогичные магнитометры, только с большими изменениями диапазона измерения и чувствительности устанавливались также на ракете «Пионер-5» и на спутнике «Эксплорер-6». На «Эксплорере-6» имелся еще и однокомпонентный зонд насыщения. Он был установлен в направлении оси вращения спутника. Если бы зонд работал нормально, спутник мог бы измерять полную напряженность поля. Но собственное поле спутника оказалось больше диапазона измерений зонда, и он не смог измерять земное магнитное поле. Имеются сведения, что 25 марта 1961 года в США была запущена еще одна ракета «Эксплорер-10», на которой были установлены рубидиевый магнитометр и два зонда насыщения. Никаких данных измерений, выполненных этой ракетой, пока нет.

Посмотрим, какие же результаты были получены при из-

мерениях, проведенных магнитометрами во внешней радиационной зоне.

Первые магнитные измерения во внешней радиационной зоне были проведены 11 октября 1958 года на ракете «Пионер-1» в области от 23 до 94 тыс. км от центра Земли. Помимо магнитометра на ракете имелась еще ионизационная камера для регистрации полной интенсивности космической радиации. Она работала на расстояниях от 10 до 42 тыс. км от центра Земли, т. е. во внешней радиационной зоне, и отметила максимум интенсивности на расстоянии от 17 до 20 тыс. км от центра Земли.

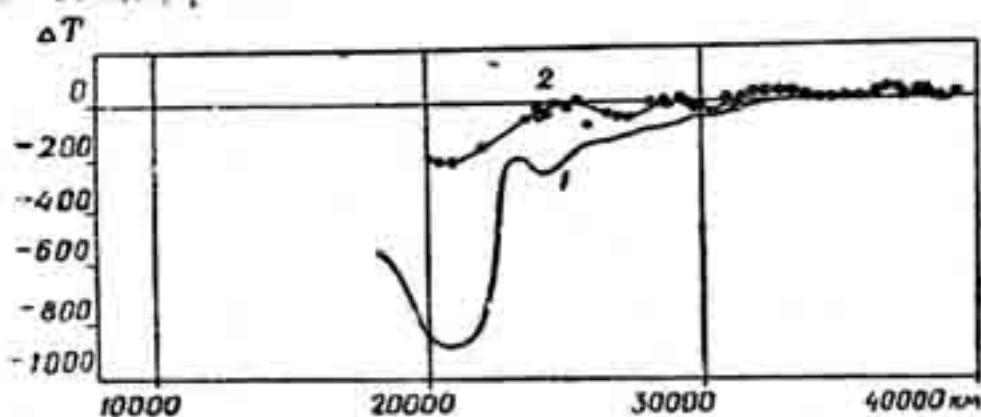


Рис. 14. Разница между измеренными и вычисленными значениями полной напряженности магнитного поля, полученными: 1 — на первой ракете; 2 — на второй ракете.

Наиболее характерной особенностью, обнаруженной «Пионером-1», была неустойчивость поля на расстоянии от 34 до 44 тыс. км от центра Земли.

Спустя три месяца, 12 января 1959 года, внешняя корпускулярная зона была вновь пересечена, на этот раз первой советской космической ракетой. На ней также регистрировались одновременно напряженность магнитного поля и интенсивность космической радиации. Диапазон магнитометра позволил начать измерения полной напряженности поля, начиная с 14700 км, когда ракета была уже во внешней радиационной зоне. Как видно из рис. 14, сравнение измеренных значений поля со значениями поля однородного намагничивания обнаружило значительные расхождения между ними на расстояниях от трех до четырех радиусов от центра Земли и хорошее согласие, в пределах точности измерений, на больших расстояниях.

Наибольшие расхождения, порядка 800γ, или 80% от поля однородного намагничивания, были отмечены на расстояниях от 20 до 23 тыс. км от центра Земли. Они характеризуются уменьшением поля однородного намагничивания и были приписаны С. Ш. Долгиновым и Н. В. Пушкиным внешнему полю, созданному круговым током западного направления, текущим во внешней радиационной зоне. Максимум радиации в зоне наблюдался на расстоянии 26 тыс. км от центра Земли.

Измерения на второй ракете, запущенной 12 сентября 1959 года, снова обнаружили расхождение между измеренными значениями поля и полем однородного намагничивания на расстоянии 18—20 тыс. км от центра Земли, выходящие за пределы погрешности измерения. Расхождения достигали здесь порядка 200γ , но не исключено, что на более близких расстояниях от Земли они могли быть больше.

Дело в том, что измерения радиации на второй ракете, производившиеся с такой же аппаратурой, как и на первой ракете, отметили на этот раз перемещение максимума радиации ближе к Земле на несколько тысяч километров (рис. 11). Измерения полной напряженности поля, наоборот, из-за сокращения диапазона магнитометра могли начаться позже, чем на первой ракете, в результате чего максимум внешнего поля мог быть не зарегистрированным магнитометром.

Много данных о магнитном поле во внешней зоне было получено «Эксплорером-6». Этот спутник предназначался для длительных исследований магнитного поля и корпускулярной радиации во внешней радиационной зоне. Он имел вытянутую орбиту с перигеем в 6780 км и апогеем в 48 800 км. Его орбита была наклонена под углом 47° к экватору, и большая часть ее находилась в южном полушарии. Период обращения «Эксплорера-6» был равен 12 часам 45 минутам. Магнитные измерения на нем продолжались с 7 августа до 6 октября 1959 года. Магнитометр «Эксплорера-6» практически отличался от магнитометра «Пионера-1» только тем, что диапазон измерения полей у зондирующей катушки был расширен в сторону больших значений поля.

Из предварительных сообщений, основанных на обработке наблюдений за небольшое количество спокойных дней, известно, что «Эксплорер-6» не обнаружил на расстоянии 3—4 земных радиусов от центра Земли больших изменений поля, какие были отмечены первой космической ракетой. Наибольшие изменения, отмеченные здесь, составляют около 20—30% от поля однородного намагничивания.

Обращают на себя внимание относительно большие (в процентном отношении) расхождения между измеренными и вычисленными значениями составляющей поля, перпендикулярной к оси вращения ракеты на расстояниях от 36 тыс. км и более от центра Земли, т. е. за пределами максимума радиации во внешней зоне. Они достигают по абсолютной величине порядка 80γ , а в процентном отношении к полю однородного намагничивания порядка 50—75%. Бросается в глаза их большая изменчивость день ото дня.

Некоторые исследователи считают, что зарегистрированные «Эксплорером-6» отступления наблюдаемого поля от поля однородного намагничивания при удалении от центра Земли

на 5—8 земных радиусов вызваны кольцевым током в третьей радиационной зоне.

Предположение о наличии третьей зоны с частицами малых энергий как будто бы подтверждается анализом регистраций магнитного поля и радиации на «Эксплорере-6» во время магнитной бури 16—20 августа 1959 года. Было отмечено, что главная фаза бури началась и сопровождалась быстрыми изменениями в скорости счета частиц сцинтилляционным счетчиком, доходившими иногда до трех порядков величины за несколько минут. «Эксплорер-6» был в это время

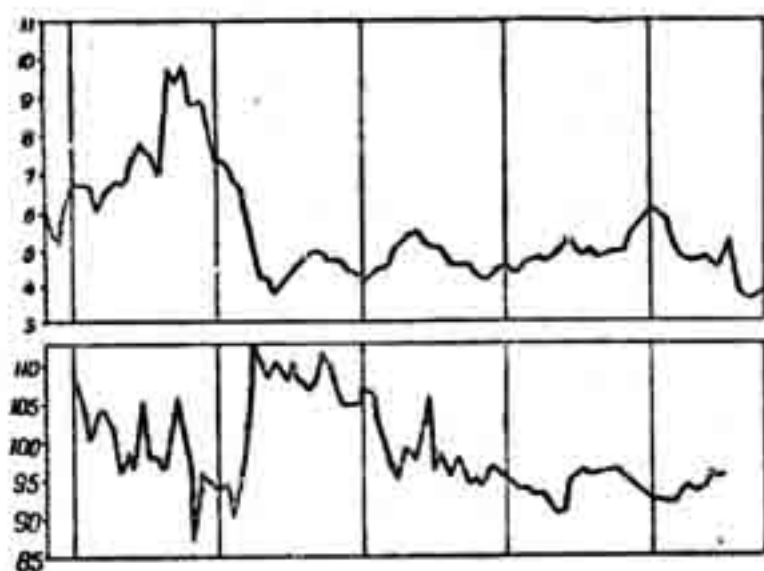


Рис. 15. Одновременные измерения интенсивности радиации и магнитного поля во время магнитной бури.

на расстоянии 42 тыс. и более километров от центра Земли, т. е. на границе и за пределами внешней зоны. Наружная граница внешней зоны находилась при этих прохождениях «Эксплорера-6» где-то посередине между положениями, занимаемыми ею при полетах первой и второй космических ракет (рис. 15).

Число частиц высоких энергий, регистрируемых сцинтилляционным счетчиком, недостаточно для объяснения наблюдаемых изменений магнитного поля. Естественно поэтому допустить существование также большого числа частиц малых энергий, не отмеченных счетчиком, энергия которых ниже порога чувствительности счетчика.

Измерения магнитного поля на «Пионере-1» и «Пионере-6» на расстояниях от 60 до 100 тыс. км от центра Земли показали, что на этих расстояниях в спокойное время имеются небольшие флуктуации поля порядка 2—3γ, во время магнитных возмущений они увеличиваются до 40—50γ. Существует предположение, что эти флуктуации земного магнитного поля вызваны его взаимодействием с межпланетной средой и пред-

ставляют собой гидромагнитные или, точнее говоря, магнитно-акустические волны, образующиеся в магнитном поле под воздействием солнечного ветра.

Магнитные измерения на «Пионере-5» как будто бы указывают на то, что граница земного магнитного поля на дневной стороне во время умеренной магнитной активности находилась на расстоянии 14 земных радиусов от центра Земли, т. е. значительно дальше, чем предполагали Десслер и Паркер.

«Пионер-5» принес первые прямые указания о существовании межпланетного магнитного поля. Измерения показали, что в период спокойного Солнца оно было порядка 3γ , а во время солнечной активности, при прохождении солнечного потока, порядка 50γ .

Укажем еще одно важное открытие, сделанное с помощью измерений на «Пионере-5». До сих пор считалось, что уменьшение интенсивности космических лучей во время магнитных бурь (эффект Форбуша) объясняется влиянием внешнего магнитного поля Земли. Измерения «Пионера-5» показали, что измерения на Земле и на спутнике, на большом расстоянии от Земли, вне ее магнитного поля, примерно одинаковы. Это говорит за то, что Форбуш-эффект связан с солнечными потоками и не имеет отношения к Земле и ее магнитному полю.

Магнитные и радиационные измерения на спутниках и ракетах обогатили нас многими новыми данными, которых не хватало теоретикам при разработке теорий магнитных бурь и полярных сияний. Нужно, однако, дальнейшее накопление данных и выявление новых факторов и явлений. Было бы полезным провести для этого длительные измерения радиации и магнитного поля одновременно на нескольких спутниках с орбитами, отстоящими на расстоянии от нескольких сот километров до нескольких десятков тысяч километров от поверхности земли. На этих спутниках следует установить не по одному, а по несколько магнитометров и счетчиков радиации, способных измерять магнитное поле от единиц до тысяч гамм, а также протоны и электроны больших и малых энергий.

МАГНЕТИЗМ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Исследования магнетизма других космических тел (кроме Земли) при помощи спутников и ракет только начинаются. Здесь можно рассказать пока об одном измерении нашей ближайшей соседки и спутницы — Луны. Оно было произведено учеными Советского Союза на второй космической ракете. Других ракетных измерений космических тел еще не было.

Выяснение существования магнитных полей космических тел имеет непосредственное отношение к разгадке происхождения и природы постоянного магнитного поля Земли.

Несмотря на усилия многих выдающихся ученых физиков, астрофизиков и геофизиков, объяснить происхождение магнетизма на Земле до сих пор не удалось. Имеется много гипотез, но ни одна из них не является достаточной и общепризнанной.

Одно время, например, высказывалась гипотеза, что магнетизм — это общее свойство всех больших вращающихся тел. К этой мысли приводило довольно близкое совпадение магнитной оси и оси вращения Земли. После того как в начале столетия американский астрофизик Хэл обнаружил существование общего магнитного поля Солнца, полюса которого были расположены относительно направления вращения Солнца так же, как и у Земли, эта гипотеза нашла многих приверженцев. Делались попытки проверить ее лабораторными экспериментами, наблюдениями в глубоких шахтах и на больших глубинах моря; но все это не дало решающих результатов. У нас опыты по обнаружению магнетизма вращающихся тел ставились в 1908—1911 годах П. Н. Лебедевым; они не были закончены из-за смерти ученого.

Было несколько попыток объяснить происхождение магнетизма Земли и Солнца в рамках единой теории, пока новые, более точные измерения не показали, что магнитное поле Солнца так же, как и магнитные поля звезд, периодически меняет свою полярность. Последнее изменение произошло в 1956 году, и сейчас магнитные поля Солнца и Земли снова имеют одинаковую полярность.

Напряженность общего поля Солнца в настоящее время около одного эрстеда. На Солнце могут возникать и существовать от нескольких дней до нескольких месяцев более сильные локальные поля в области пятен и флоккулов. У больших пятен поля могут достигать до 3000 эрстед.

Имеются также теории, приписывающие магнетизм Земли и его вековые изменения электрическим токам, якобы текущим внутри металлического жидкого ядра Земли.

Сейсмические данные указывают, что ядро занимает около одной восьмой объема Земли. Вещество в нем должно быть в жидком состоянии и в то же время обладать большой плотностью. Ядро может состоять из смеси железа и никеля в той же пропорции, что и в железных метеоритах, или из смеси железа и камня, находящихся в особом «металлизированном» состоянии.

Предполагают, что ядро может вращаться с несколько другой скоростью, чем оболочка Земли. При наличии хотя бы небольшого межпланетного магнитного поля во вращающемся проводящем ядре могут возникнуть по индукции электрические токи, магнитное поле которых будет усиливать первоначальное поле.

Таким образом, создается процесс, подобный самовозбуж-

дающему динамо, который и приводит к образованию земного магнитного поля Земли.

Считают, что в ядре могут иметь место также конвекционные движения жидкости, связанные с локальными разогреваниями ее при радиоактивном распаде вещества. Эти движения приводят к образованию электрических токов, магнитное поле которых ответственно за вековые изменения.

Предположим, что только что описанная нами теория верна. Какое магнитное поле мы можем ожидать тогда на других планетах, например на Марсе, Венере и на спутнике Земли — Луне?

Исходя из того, что радиус Луны (1700 км) примерно в 4 раза меньше радиуса Земли, масса ее в 81 раз меньше массы Земли и средняя плотность ее составляет около 0,6 средней плотности Земли, считают, что у Луны не может быть внутреннего ядра и, следовательно, у нее не должно быть магнитного поля.

Подобные прикидки указывают, что Марс и Венера могут обладать магнитными полями более слабыми, чем Земля, причем у Венеры поле должно быть сильнее, чем у Марса.

Из приведенного примера видно, что знание магнетизма других планет, с учетом их физического состояния, может помочь сделать выбор между многочисленными теориями постоянного поля и его вековых вариаций. Оно важно также и в другом отношении. Зная, что та или иная планета обладает магнитным полем, мы можем утверждать, что на ней существуют явления, которых не могло бы быть, если бы поле не существовало. Установив, например, магнитное поле у Венеры, мы могли бы с уверенностью решить, является ли отмеченное советским ученым В. А. Козыревым свечение на Венере полярным сиянием, как он предполагает, или нет.

Нас интересует, конечно, не только вопрос, есть ли у планет магнитное поле, но и какова его интенсивность и как расположены магнитные полюса их по отношению к осям вращения планет. Эти сведения можно получать теперь путем непосредственных магнитных измерений на космических ракетах.

Первые измерения магнитного поля Луны уже проведены. Можно не сомневаться, что за ними последуют другие и что, кроме магнитного поля Луны, в ближайшие годы будут измерены магнитные поля Марса и Венеры.

Измерения магнитного поля Луны выполнены с помощью магнитометров, которые были уже описаны. Анализ данных измерений, проведенных на прилунном участке, показывает, что магнитометры работали нормально вплоть до прилунения контейнера. Последние измерения, для которых имеются данные, были сделаны в 50 км от поверхности Луны. Результаты измерений трех магнитометров x , y , z и вычислен-

ных на основе их значений полной напряженности поля T на прилунном участке, на протяжении 4 тыс. км от лунной поверхности, показаны на рис. 16.

Эти измерения не отмечают какого-либо явно выраженного увеличения поля при приближении магнитометров к Луне. Если бы Луна обладала дипольным полем, то полная напряженность поля увеличилась бы на этом участке в 27 раз. Не было отмечено также каких-либо периодических изменений в показаниях отдельных магнитометров, какие могли бы иметь место при их вращении в магнитном поле. На основании этого был сделан вывод, что если Луна и обладает магнитным по-

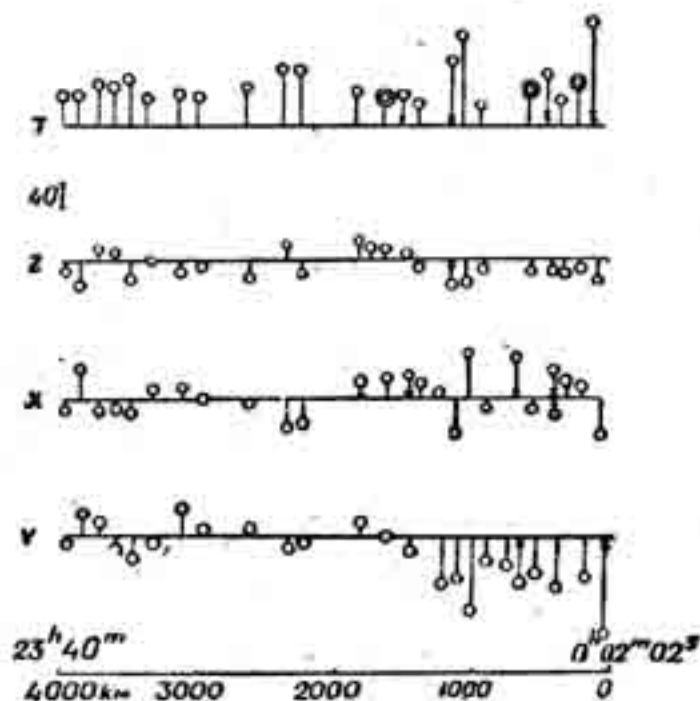


Рис. 16. Измерение магнитного поля вблизи Луны.

лем, то интенсивность его на поверхности Луны не выходит за пределы погрешности измерения, т. е. 50—100 гамм. Сопоставляя его с магнитным полем Земли, мы можем сказать, что интенсивность магнитного поля Луны на ее поверхности должна быть по крайней мере в 400 раз слабее интенсивности магнитного поля на поверхности Земли.

Такое слабое поле не будет оказывать какого-либо заметного влияния на корпускулярные потоки, идущие от Солнца к Земле. Оно не может создать из частиц этих потоков радиационных поясов вокруг Луны. Радиационные пояса, как известно, не были обнаружены при измерениях радиации на второй космической ракете.

До проведения прямых измерений магнитного поля Луны имелось несколько работ, авторы которых приходили к выводу, что у Луны должно быть заметное магнитное поле. Эти выводы основывались на сопоставлениях данных о магнитной активности и интенсивности космических лучей при разных

фазах Луны, т. е. при разном положении Луны относительно Земли и Солнца. Они оказались ошибочными, так как у Луны нет такого поля. Имеет ли Луна вообще какое-либо магнитное поле можно будет сказать, проведя на Луне длительные измерения с чувствительными магнитными приборами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наш рассказ о современном состоянии исследований космических магнитных явлений магнитометрами спутников и ракет подошел к концу. Дополним его только несколькими соображениями общего характера.

Магнитные измерения на спутниках и ракетах находятся еще в самом зачаточном состоянии. Тем не менее они уже обогатили нас рядом новых достоверных и очень ценных сведений о магнитных явлениях в ранее недоступных для измерения местах космоса. Все это говорит о большой эффективности нового метода исследования космических магнитных явлений. Нет сомнения, что он получит в ближайшее время самое широкое применение.

Мы уже сообщали о намерении использовать магнитометры на спутниках для систематической магнитной съемки земного шара. Имеются предложения о создании на спутниках космических магнитных обсерваторий для непрерывной регистрации изменений магнитного поля в магнитосфере и за пределами ее. На таких обсерваториях должны проводиться также непрерывные наблюдения за волновой и корпускулярной радиацией Солнца.

Совместные наблюдения космических и наземных обсерваторий дадут исключительно ценный материал для изучения солнечных воздействий на магнитное поле Земли, ионосферу, полярные сияния, космические лучи и другие геофизические явления, зависящие от солнечной деятельности. Они будут иметь большое значение для разработки научно обоснованных и достоверных теорий этих явлений.

Мы предвидим также и другие возможности. Нам кажется, например, что совместное изучение магнитных возмущений и полярных сияний на Земле и магнитных и корпускулярных бурь во внешней радиационной зоне обнаружит такие связи между ними, что станет возможным, зная, что происходит с бурями и сияниями на Земле, прогнозировать то, что происходит в радиационной зоне и, в частности, где находятся максимумы радиации и какова интенсивность их. Забегая еще дальше, мы предвидим, что когда установят существование магнитных полей и радиационных зон на планетах, можно будет, пользуясь наземными данными, давать такие же прогнозы и для них.