

ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1960

Том 135, № 1

К. И. ГРИНГАУЗ и С. М. РЫТОВ

**О СВЯЗИ МЕЖДУ РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ
ЛОВУШЕК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СОВЕТСКИХ
КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТАХ И ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА АМЕРИКАНСКОМ СПУТНИКЕ «ЭКСПЛОРЕР-VI» И РАКЕТЕ
«ПИОНЕР-V»**

(Представлено академиком А. Л. Минцем 15 X 1960)

При описании результатов, полученных в 1959 г. в окрестности Земли с помощью трехэлектродных ловушек заряженных частиц, установленных на советских космических ракетах ⁽¹⁾, указывалось, что на расстояниях 55 000—75 000 км от поверхности Земли обнаружены потоки электронов с плотностью $\sim 10^8$ эл.см⁻².сек⁻¹ и энергиями ≥ 200 эв. Это позволило сделать вывод о существовании самого внешнего пояса заряженных частиц, окружающего Землю ^(2,3), расположенного за радиационными зонами ⁽⁴⁻⁷⁾. Было предположено, что границы этого пояса проходят вдоль силовых линий геомагнитного поля ^(2,3).

В 1960 г. опубликованы предварительные результаты измерений геомагнитного поля, произведенных на спутнике «Эксплорер-VI» (запущенном в США 7 VIII 1959 г. с апогеем 48 800 км, с периодом обращения 12,45 мин. и орбитой в плоскости, наклоненной к географическому экватору под углом 47°) ⁽⁸⁾ и на космической ракете «Пионер-V» (запущенной 11 III 1960 г.) ^(9,10). Эти измерения показали, что на расстояниях от центра Земли, меньших чем 5—6 земных радиусов R_E , наблюдалось хорошее соответствие между измеренными величинами геомагнитного поля и теоретическими значениями, рассчитанными с использованием его значений на поверхности Земли и модели эксцентричного диполя согласно ⁽¹¹⁾.

На больших удалениях от Земли зарегистрированы систематические крупномасштабные отклонения от теоретических значений поля, наблюдаемые постоянно — как в магнитновозмущенные, так и в магнитноспокойные дни, — хотя и несколько меняющиеся во времени. Авторы работ ⁽⁸⁻¹⁰⁾ пришли к выводу, что зарегистрированные на спутнике «Эксплорер-VI» указанные возмущения геомагнитного поля вызываются постоянно существующей системой электрических токов, определенным образом локализованной и лежащей за пределами радиационных зон, возможно — в тороидальной области, окружающей Землю. Для определения характеристики этой токовой системы была рассмотрена гипотетическая модель ее в виде тока, текущего через цилиндр с круглым сечением, центр которого лежит на геомагнитном экваторе, с постоянной по сечению плотностью тока. Было рассчитано суммарное магнитное поле, определяемое геомагнитным полем и магнитным полем токового кольца. Эти расчеты сравнивались с измеренными значениями с целью проверки пригодности выбранной модели токового кольца и определения параметров токовой системы, наилучшим образом удовлетворяющих экспериментальным данным.

Измерения, проведенные на ракете «Пионер-V», которая прошла через другой участок рассматриваемой области, нежели «Эксплорер-VI», и пересекла предполагаемую токовую систему, показали, что на расстояни-

ях от центра Земли в $5 \div 7 R_E$ наблюдались как и на «Эксплорере-VI», пониженные значения геомагнитного поля. На расстояниях же более $13 R_E$ были обнаружены значения, повышенные по сравнению с определяемыми теоретическим законом $1/R^3$. Эти результаты подтвердили гипотезу о существовании токового кольца, вызывающего постоянно существующие возмущения геомагнитного поля на геоцентрических расстояниях $> 5 R_E$.

Результаты расчетов параметров токовой системы, основанных на указанной выше модели, таковы:

а) для «Эксплорера-VI» $R_0 = 60\,000$ км, $I = 5 \cdot 10^6$ а, $a = 3R_E$ (или менее), где R_0 — расстояние от центра Земли до центра круглого сечения цилиндра, I — полная сила тока, a — радиус цилиндра;

б) для «Пионера-V» $R_0 = 50\,000$ км, $I = 5 \cdot 10^6$ а, $a = 3R_E$.

В ⁽¹⁰⁾ отмечено, что соответствия между расчетами, основанными на указанной модели тока, и экспериментальными данными не получается при $a < 3R_E$.

Сопоставление изложенных выше предварительных результатов измерений геомагнитного поля на спутнике «Эксплорер-VI» и ракете «Пионер-V» с опубликованными ⁽¹⁻³⁾ данными об обнаруженном с помощью ловушек заряженных частиц на советских космических ракетах самом внешнем поясе заряженных частиц, содержащем электроны с энергиями $200 \text{ эв} < E < \sim 10^4 \text{ эв}$, представляет несомненный интерес.

Как видно из рис. 3 статьи ⁽³⁾, советские космические ракеты пересекали геомагнитный экватор на высоте $\sim 60\,000$ км от поверхности Земли, т. е. как раз в том районе, где расположен центр токового кольца, существование которого следует из данных американских магнитных измерений. Как видно из рис. 4 ⁽¹⁾, центр области, в которой обнаружены потоки электронов с $E > 200$ эв при полете второй космической ракеты 12 IX 1959 г., находится на высоте $\sim 60\,000 \div 65\,000$ км от поверхности Земли (т. е. вблизи центра сечения «токового кольца» по данным «Эксплорера-VI»). Максимум плотности электронных потоков лежит в области протяженностью $\sim 20\,000$ км (на высотах $55\,000 - 75\,000$ км), а протяженность всей области, в которой обнаружены электронные потоки, $\sim 40\,000$ км, что очень близко к рассчитанному в ⁽¹⁰⁾ диаметру сечения токового кольца $2a \cong 6R_E$.

Плотность тока (потока электронов) по данным опытов с ловушками заряженных частиц увеличивается по мере приближения к центру области их существования и убывает у границ области, в то время как в ⁽¹⁰⁾ она принята неизменной по сечению «токового кольца». Однако в ⁽¹⁰⁾ ясно указано, что подобная модель токового кольца была принята лишь для упрощения расчетов. Средняя плотность тока в «токовом кольце», определенная согласно ⁽¹⁰⁾, составляет $\sim 4 \cdot 10^{-13}$ а/см², тогда как плотность потока электронов в максимуме самого внешнего пояса заряженных частиц, согласно ⁽¹⁻³⁾, $\sim 2 \cdot 10^8$ эл/см²·сек = $3,2 \cdot 10^{-11}$ а/см².

Следует, однако, иметь в виду, что с помощью ловушек в опытах ⁽¹⁾ может быть определена плотность полного потока электронов с $E > 200$ эв, тогда как изменения геомагнитного поля могут создаваться лишь компонентой этого потока, перпендикулярной к силовым линиям геомагнитного поля. Такая компонента должна существовать за счет известного явления дрейфа заряженных частиц в неоднородном магнитном поле (см., например, ⁽¹²⁾).

Для возможности проведения оценок плотности тока дрейфа и тока на ловушку будем считать геомагнитное поле полем диполя и допустим, что распределение электронов по скоростям — максвелловское. Это допущение, конечно, является условным. Максвелловское распределение мы вводим лишь как некоторое эффективное, т. е. дающее тот же ток на ловушку, что и фактически наблюдаемый.

При указанных предположениях из общих формул для дрейфа в неоднородном магнитном поле ⁽¹²⁾ получается следующее выражение для плотности тока дрейфа в плоскости магнитного экватора:

$$j_{др} = \frac{6c\Theta N}{BR} = \frac{6c\Theta NR^2}{B_0 R_E^3},$$

где c — скорость света Θ и N — энергетическая температура и концентрация электронов; R_E — радиус Земли; B_0 — поле на поверхности Земли; B — поле на расстоянии R от диполя. Разумеется, положительные ионы тоже вносят вклад в ток дрейфа (при тепловом равновесии приведенное выражение надо было бы удвоить), но, как видно из дальнейшего, учет этого, в достаточной мере неопределенного добавка не играет роли для последующих оценок.

При тех же предположениях плотность тока на ловушку, отсекающую электроны с энергиями движения по нормали к поверхности коллатора ловушки ниже eV эв, есть

$$j_{л} = eN \sqrt{\frac{\Theta}{2\pi m}} e^{-x}, \quad x = \frac{eV}{\Theta},$$

где e и m — заряд и масса электрона. Разделив $j_{др}$ на $j_{л}$ и выразив при этом Θ через параметр x , получаем

$$\frac{j_{др}}{j_{л}} = \frac{6cR^2}{B_0 R_E^3} \sqrt{2\pi \frac{m}{e}} V \frac{e^x}{\sqrt{x}}.$$

Полагая $R = 10R_E$ ($R_E = 6,4 \cdot 10^8$ см), $B_0 = 0,5$ гаусса. $eV = 200$ эв и подставляя значения остальных констант, находим

$$\frac{j_{др}}{j_{л}} = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{e^x}{\sqrt{x}}.$$

Наблюдаемое соотношение плотностей тока (порядка 10^{-2}), если отбросить корень $x \sim 10^{-7}$, отвечающий непомерно высокой температуре, соответствует $x \cong 9,5$, т. е. $\Theta \cong 21$ эв или $230\,000^\circ$ абс. Заметим, что при таких значениях x величина x очень слабо (логарифмически) зависит от отношения токов, расстояния от диполя и потенциала отсечки на ловушке.

Пользуясь полученным значением Θ , можно из формулы для $j_{л}$ или (что проще) из формулы для $j_{др}$ вычислить значение электронной концентрации N . При $j_{др} \cong 4 \cdot 10^{-13}$ а/см² = $1,2 \cdot 10^{-3}$ CGSE, получаем, что $N \cong \cong 600$ эл/см³.

Полученные оценки показывают, что в рамках сделанных грубых предположений (дипольное поле и максвелловское распределение скоростей электронов) можно разумным образом согласовать между собой величину потока электронов, зарегистрированного ловушками заряженных частиц в самом внешнем поясе, обнаруженного на советских космических ракетах, и величину возмущений геомагнитного поля, наблюдаемых в этой же области в американских опытах. Вместе с тем, если распределение электронов по скоростям действительно близко к максвелловскому, то при уменьшении потенциала отсечки V должно наблюдаться значительное возрастание тока в ловушках, поскольку ловушка с $V = 200$ в работает, как это видно из полученного значения $\Theta \cong 21$ эв, на хвосте эффективного максвелловского распределения. При дальнейшем изучении самого внешнего пояса заряженных частиц весьма важно поэтому выяснить, каков энергетический спектр электронов (например, одновременно применяя ловушки с разными значениями V).

Изложенные соображения дают основания считать, что результаты измерений с помощью трехэлектродных ловушек на советских космиче-

ских ракетах и с помощью магнетометров на спутнике «Эксплорер-VI» и ракете «Пионер-V» согласуются между собой. Таким образом, эти независимые и проведенные различными методами исследования, по-видимому, подтверждают и дополняют друг друга и свидетельствуют о том, что «токовое кольцо», обнаруженное при магнитных измерениях, является не чем иным, как обусловленным неоднородностью геомагнитного поля дрейфовым током в постоянно существующем на высотах ~60 000 км самом внешнем поясе заряженных частиц. Дальнейшие прямые исследования этого пояса позволят уточнить его свойства, в частности его изменимость во времени и пространстве, а также энергетический спектр электронов, создающих эффекты, обнаруженные в советских и американских опытах.

Поступило
14 X 1960

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский, ДАН, 131, № 6, 1301 (1960). ² К. И. Грингауз, В. Г. Курт, В. И. Мороз, И. С. Шкловский, ДАН, 132, № 5, 1062 (1960). ³ К. И. Грингауз, В. Г. Курт, В. И. Мороз, И. С. Шкловский, Астр. журн., 37, № 4, 716 (1960). ⁴ С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков и др., ДАН, 125, № 2, 304 (1959). ⁵ J. Van Allen, L. A. Frank, Nature, Febr., 14 (1959). ⁶ С. Н. Вернов, А. Е. Чудаков и др., ДАН, 130, № 3, 517 (1960). ⁷ J. Van Allen, C. E. McIlwain, C. H. Ludwig, J. Geophys. Res., 64, 271 (1959). ⁸ С. Р. Sonnet, E. J. Smith, D. L. Judge, P. J. Coleman jr, Phys. Rev. Letters, 4, 4, 161 (1960). ⁹ P. J. Coleman jr, C. P. Sonnet, D. L. Judge, D. L. Smith, J. Geophys. Res., 65, 6, 1856 (1960). ¹⁰ E. J. Smith, P. J. Coleman, D. L. Judge, C. P. Sonnet, J. Geophys. Res., 65, 6 (1958). ¹¹ E. H. Vestine, J. Geophys. Res., 58, 127 (1953). ¹² Л. Спитцер, Физика полностью ионизованного газа, гл. I, М., 1957.