

## **КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Историко-астрономические исследования, вып. XXVI,

с. 152-169, Москва, Наука, 2001

*Е.Г. Ерошенко*

### **ИСТОРИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КОСМОСЕ**

#### **Введение**

До космической эры, начало которой было положено запуском первого советского искусственного спутника Земли (ИСЗ) 4 октября 1957 г., опыт измерения магнитных полей с подвижных платформ - самолетов, кораблей, аэростатов - существовал только в некоторых организациях и институтах. В их числе был и Научно-исследовательский институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Министерства связи СССР (НИЗМИР).

По постановлению Совнаркома СССР институт был создан в 1940 г. Его основными задачами были комплексное исследование явлений земного магнетизма и ионосферы, усовершенствование методов и приборов, необходимых для такого исследования, и научно-методическое руководство магнитной службой СССР. В 1959 г. после перехода в систему Академии наук СССР институт стал именоваться ИЗМИРАН.

С первых дней космической эры, начавшейся 4 октября 1957 г., институт принял участие в обработке и анализе радионаблюдений сигналов первого искусственного спутника Земли. В том же году по поручению академика Мстислава Всеволодовича Келдыша ученый секретарь Междуведомственного научно-технического совета по исследованию космического пространства Геннадий Александрович Скуридин обратился к директору ИЗМИРАН Николаю Васильевичу Пушкиву с запросом о возможности изготовления бортового магнитометра для ИСЗ. Дирекция ИЗМИРАН рассмотрела возможность подготовки программы измерений геомагнитного поля с борта ИСЗ и приняла решение изготовить протонный магнитометр и малогабаритные феррозондовые магнитометры для решения этой новой сложной задачи.

История магнитных космических исследований, проводившихся в СССР, уже освещалась до этого в юбилейных научных обзорах (Долгинов, Пушкив, 1968; Долгинов, 1978), где основное внимание было уделено научным результатам, полученным за два первых десятилетия космической эры. В данной статье предпринята попытка взглянуть на историю российских магнитных экспериментов в космосе (от их начала до наших дней) глазами очевидца и их участника, который старался описать не только несомненные успехи и достижения, но и, пожалуй, впервые, отмечает некоторые промахи и "шероховатости", встречавшиеся на тернистом пути отечественных экспериментаторов, исследовавших космос.

#### **Магнитное поле Земли и геомагнитосфера**

К концу 50-х годов в магнитной лаборатории ИЗМИРАН (заведующий - Шмая Шлемович Долгинов) уже был опыт измерений геомагнитного поля с подвижных платформ. На немагнитной шхуне "Заря" с помощью феррозондового магнитометра с самоориентирующейся головкой уже проводились опытные измерения поля. Для спутникового

варианта прибора необходимо было создать малогабаритный транзисторный образец магнитометра.

В то время полупроводниковая техника делала свои первые шаги. Тем не менее ИЗМИРАН совместно с ленинградским ОКБ "Геологоразведка" разработали и изготовили первый бортовой магнитометр для третьего ИСЗ.

Официальной датой начала магнитных исследований в космосе можно считать 15 мая 1958 г., когда впервые в мире на борту третьего ИСЗ начал работать магнитометр. Он позволял измерять все три ортогональные компоненты полного вектора геомагнитного поля. Этот эксперимент предназначался в основном для отработки методики и технологии магнитных измерений на борту космического аппарата.

Третий ИСЗ представлял собой сложный технический агрегат, насыщенный электронной аппаратурой. Ферромагнитные детали конструкции и электрические токи создавали значительные помехи для показаний магнитометра, и хотя чувствительный элемент - датчик магнитометра был отнесен на расстояние около 70 см от основного корпуса ИСЗ, все же внутри герметичного отсека, где был установлен магнитометр, уровень помех достигал 120 нТл (Долгинов и др., 1966).

В целом этот эксперимент оказался достаточно успешным; он позволил провести первую в мире глобальную съемку геомагнитного поля над территорией Советского Союза. На ее основе удалось уточнить положение максимума положительной Восточно-Сибирской мировой аномалии. При сравнении измеренных значений напряженности поля с существовавшей на то время аналитической моделью поля было выполнено разделение внутренних и внешних источников геомагнитного поля (Долгинов и др., 1962).

Следующий этап в изучении магнитного поля Земли - уже на более далеких расстояниях от Земли - открыли измерения на борту космических аппаратов (КА) "Луна-1" и "Луна-2" в 1959 г. Несмотря на то что основной научной задачей этих проектов было исследование физических характеристик Луны и ее окрестностей, по настоянию научных руководителей экспериментов С.Н. Вернова, К.И. Грингауза и Ш.Ш. Долгинова их научная аппаратура была включена сразу после отделения КА от ракеты-носителя и работала на всей трассе перелета Земля-Луна. В результате магнитологам ИЗМИРАН удалось первыми обнаружить неизвестные ранее свойства геомагнитного поля (Долгинов, Пушков, 1959).

Так впервые были измерены магнитные эффекты "кольцевого тока" вокруг Земли на расстояниях  $2,5-3 R_z$  (радиус Земли) от ее центра, проявившиеся в виде ослабления напряженности геомагнитного поля на величину  $\Delta B$  от 800 нТл (КА "Луна-1") до 200 нТл (КА "Луна-2") по сравнению с расчетным полем (рис. 1) (Долгинов и др., 1960).

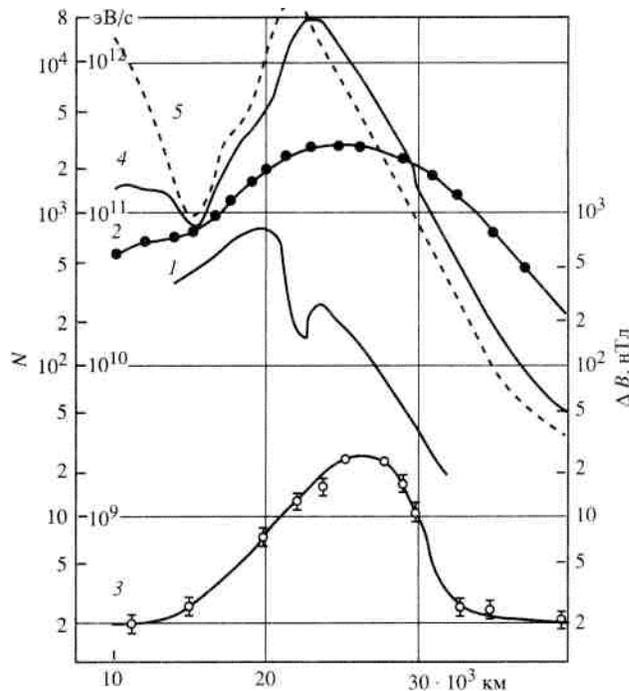


Рис. 1. Изменение интенсивности корпускулярной радиации и аномальной части магнитного поля с удалением от Земли (по данным КА "Луна-1")

1 - разность между вычисленными и измеренными значениями магнитного поля; 2 - суммарная ионизация сцинтилляционного детектора группы С.Н. Вернова; 3 - темп его счета /N электронов и фотонов с энергиями выше 4,5 МэВ; 4 и 5 - темп счета счетчика Гейгера-Мюллера ракеты "Пионер-Ш": при подъеме (4) и падении (5) (Долгинов, Пушков, 1959)

Для обработки и интерпретации результатов, полученных на КА "Луна-1", в ИЗМИРАН в 1959 г. по решению директора института была создана рабочая группа, в которую вошли Н.В. Пушков, Ш.Ш. Долгинов, Ю.Д. Калинин, Н.П. Бенькова, Л.О. Тюрмина и А.Д. Шевнин. Особое внимание было уделено сильному отклонению измеренного поля от расчетного на удалении от центра Земли 20 800-22 000 км. Это отклонение было признано реальным, а не сбоем в работе магнитометра, и отнесено к характерному понижению напряженности геомагнитного поля при переходе через токовый слой (внеионосферный кольцевой ток). Авторами первой публикации этих результатов были Ш.Ш. Долгинов и Н.В. Пушков (Долгинов, Пушков, 1959). Авторы более поздней работы (Анцилевич, Шевнин, 1960) объясняли эту депрессию геомагнитного поля существованием экваториальной токовой системы во время небольшого геомагнитного возмущения типа мировой бури с внезапным началом.

До сих пор вызывает сомнения величина депрессии поля, полученная на КА "Луна-1", поскольку такого большого отклонения поля (- 800 нТл) позже не наблюдалось ни разу ни на отечественных, ни на американских КА в возмущенные и тем более в магнитоспокойные периоды. По мнению автора данной статьи, вполне допустимо, что в этих измерениях могла присутствовать методическая ошибка, вызванная погрешностью как в определении "нуля" магнитометра, так и в его чувствительности либо того и другого вместе. На это указывает характер измеренной кривой, которая на всем протяжении от 2 до 6 R<sub>з</sub> ни разу не пересекает расчетную кривую, т.е. не обнаружено положительной разности ΔВ, которая потом всегда наблюдалась при определении ΔВ в результатах, полученных в 1964-1967 гг. на других отечественных ИСЗ - "Электрон-2" и "Электрон-4" и на американских спутниках "Explorer-12, -14, -18" (в качестве примера на рис. 2 даны

величины  $\Delta V$ , измеренные на спутнике "Электрон-2").

Начало научных исследований на первых ИСЗ и космических ракетах было очень бурным: запуски аппаратов следовали один за другим, по несколько раз в году, при этом многие из них были неудачными. Так, третий ИСЗ был запущен со второй попытки, а "Луна-1" - только с третьей. Шла "космическая гонка" СССР-США. Стоял вопрос, чей аппарат первым достигнет поверхности Луны. В институтах и учреждениях, вовлеченных в космическую программу, подготовка экспериментов шла очень активно, практически без выходных и отпусков. В самом деле, летом 1958 г. в ИЗМИРАН параллельно с подготовкой к запуску третьего ИСЗ уже были развернуты работы по подготовке магнитометров для установки на первых "лунниках". Нужно было быть участником и свидетелем событий того времени, чтобы представить себе взрывную последовательность тех открытий, сомнений, озарений и смелость участников экспериментов брать на себя ответственность за сообщения об абсолютно неизвестных ранее явлениях в космосе, которые противоречили не только прежним представлениям классиков мировой науки, но и иногда даже (на первый взгляд) элементарному физическому смыслу.

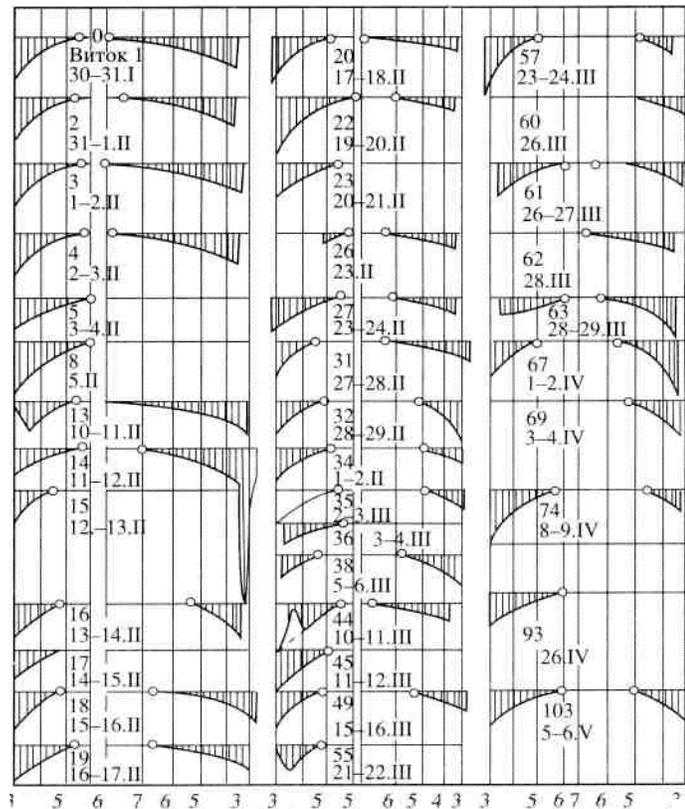


Рис. 2. Разности  $\Delta V$  между измеренными и вычисленными значениями поля на расстояниях 3-6  $R_z$  по данным ИСЗ "Электрон-2" (Долгинов и др., 1965)

Нельзя не отметить без сомнения ведущую роль академика М.В. Келдыша при обсуждении всех без исключения буквально "свалившихся на головы сверху" абсолютно неожиданных открытий с ИСЗ и КА. Казалось бы, ему - математику по образованию - должны были

быть чужды проблемы геофизиков, радиофизиков, специалистов по космическим лучам, верхней атмосфере Земли и ее ионосфере, "солнечников", наблюдателей-астрономов. Однако воистину могучий природный интеллект истинного натурфилософа позволял ему не только быстро вникать в суть возникающих проблем, но и мгновенно оценивать их рациональное зерно, схватывать суть проблемы и после этого допускать на обсуждение и дискуссии зачастую непримиримых оппонентов на знаменитых в конце 50-х - начале 60-х годов XX в. семинарах отделения прикладной математики, называвшихся в народе "келдышатниками". Чего стоят, например, научные "баталии" таких непримиримых оппонентов, как Я.Л. Альперт и К.И. Грингауз, С.Н. Вернов и В.И. Красовский, В.П. Шабанский и В.Д. Плетнев.

Трудно и, пожалуй, даже невозможно себе представить, чтобы когда-либо в будущем не только в космических исследованиях, но и вообще в любой другой области науки за три-четыре года в результате жесточайших (но при этом и конструктивных!) научных "сражений" родилось такое множество истинно научных открытий, которые заложили фундамент новой области науки.

Я вспоминаю, как при обсуждении первой лунной программы на заседании Междудеятельного научно-технического совета (МНТС) в мае 1958 г., выступая с обоснованием научной задачи магнитных измерений на Луне, я - еще совсем неопытный молодой специалист - сослался на предположение известного английского физика П. Блэккетта, что любое вращающееся массивное тело должно обладать магнитным полем (кстати, его собственные лабораторные опыты дали отрицательный результат). И когда кто-то из коллег спросил: "Кто этот Блэккетт и почему он так считает?", председательствовавший на заседании М.В. Келдыш, поддержав меня, бросил: "Мало ли кто что думает. Вот полетим к Луне и определим, есть ли у нее магнитное поле или нет".

В те годы все были захвачены грандиозными и поистине фантастическими планами, раскрытыми перед нами выдающимися учеными и конструкторами - Мстиславом Всеволодовичем Келдышем, Сергеем Павловичем Королевым, Михаилом Клавдиевичем Тихонравовым и многими другими. Программа научных исследований в космосе была теоретически обоснована и понятна: изучение физических характеристик околоземного космического пространства, ближайших к Земле планет и небесных тел, влияние Солнца на земные процессы и т.д. Но темпы выполнения этой программы были настолько велики, что порой не хватало времени на детальное осмысление полученных результатов, тем более что, как уже упоминалось, в эти годы было сделано немало неожиданных открытий.

Продолжая рассказ об изучении магнитосферы Земли, следует отметить, что исследования околоземного космического пространства, называемого сейчас "геокосмосом", позволили дать определение таким его областям, как радиационные пояса, магнитосфера, магнитный хвост, солнечный ветер. Гипотезу о существовании последнего как постоянного истечения солнечной плазмы впервые высказал Л. Бирман в 1953 г. на основе своих наблюдений хвостов комет (Biermann, 1953). Однако только первые измерения на отечественных космических аппаратах в 1959 г. позволили подтвердить его существование, а позже определить кинетические параметры солнечного ветра и установить его определяющую роль в солнечно-земных связях (Грингауз и др., 1960).

После трехлетнего перерыва, связанного с полетами первых в мире советских космонавтов, в 1964-1965 гг. изучение магнитного поля Земли было продолжено на высокоапогейных (до  $11 R_z$ ) советских ИСЗ "Электрон-2" и "Электрон-4". Они работали совместно с запущенными с ними одной ракетой-носителем КА "Электрон-1" и "Электрон-3". На этих спутниках, проработавших по несколько месяцев, были получены теперь уже систематические данные о магнитных полях во внешней магнитосфере, а также впервые были обнаружены признаки проникновения плазмы солнечного ветра в магнитосферу Земли через конфигурацию магнитного поля типа "воронки", названной позже американскими исследователями "каспом" (cusp) (Ерошенко, Антонова, 1970). В "воронке" геомагнитного поля происходит отделение замкнутых в дневной магнитосфере магнитных

силовых линий, сносимых в геомагнитный хвост (Frank, 1971). На основе данных ИСЗ "Электрон" теоретиками Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) МГУ В.П. Шабанским и А.Е. Антоновой была создана первая модель магнитосферы Земли, учитывающая формирование хвоста (Антонова, Шабанский, 1968).

Самое активное участие в разработке и руководстве программой по изучению магнитосферы Земли принимал доктор физико-математических наук Г.А. Скуридин, долгое время работавший ученым секретарем МНТС. Именно по его инициативе была создана группа физиков-теоретиков, которая активно занялась изучением проблемы затекания плазмы солнечного ветра в магнитосферу Земли через полярные "воронки" (Плетнев и др., 1965). В эту группу входили В.Д. Плетнев, В.П. Шалимов, А.И. Ершкович, И.Н. Швачунов, Л.С. Чесалин. При поддержке Г.А. Скуридина в начале 70-х годов было начато систематическое исследование на нескольких (вначале на двух) одновременно работающих высокоапогейных спутниках серии "Прогноз". Впоследствии эта схема запусков ИСЗ к границе магнитосферы Земли была неоднократно использована в европейских проектах. В России последним научным проектом в этой серии запусков из 11 ИСЗ является "Интербол", запущенный в 1995 г. и работавший пять лет.

Более подробные и широкомасштабные изменения магнитного поля в ближнем геосмосе по программе мировой магнитной съемки продолжались до 1970 г. на низкоапогейных спутниках серии "Космос". На этих ИСЗ устанавливались протонные и квантовые магнитометры, разработанные в ИЗМИРАН В.И. Наливайко А.Н. Козловым и изготовленные в научно-производственном объединении "Арсенал" под руководством М.М. Чинчевого.

### Магнетизм Луны

Как уже упоминалось выше, первые прямые измерения магнитного поля Луны были осуществлены в ходе полета КА "Луна-2", достигшего поверхности Луны 2 сентября 1959 г. (Долгинов и др., 1960). По результатам этого эксперимента, напряженность магнитного поля на поверхности Луны не превысила 40 нТл (на пределе точности аппаратуры), что соответствовало верхнему пределу возможного дипольного момента Луны 1СИ по сравнению с магнитным моментом Земли. Когда этот результат, обусловленный реальной погрешностью измерений, мы доложили М.В. Келдышу, присутствовавшему при дешифровке показаний магнитометра, это вызвало у него явное недовольство, поскольку он ожидал более точных результатов.

Уточнение предполагаемого глобального поля Луны было сделано намного позднее, в 70-е годы, в американских экспедициях по проекту "Apollo" (Fuller, 1974). Отечественные магнитометрические эксперименты были продолжены на искусственном спутнике Луны (ИСЛ) "Луна-10" в 1966 г. и на поверхности Луны на борту самоходного аппарата "Луноход-2" в 1973 г. (Долгинов и др., 1975а).

Успехи и неудачи космических исследований в СССР целиком определялись уровнем развития отечественной космической техники, радиоэлектроники, материаловедения и т.п. С самого начала космической эры отечественные аппараты имели гораздо большие размеры и массы, чем американские, и при этом часто уступали последним в "научном КПД", несмотря на то что по основным метрическим параметрам научные приборы, работавшие на отечественных и западных КА, были близки между собой.

Для иллюстрации можно сослаться лишь на один пример, заметно ухудшивший результаты магнитных измерений на ИСЛ "Луна-10" и ИСЗ "Прогноз-1" и "Прогноз-2" из-за необдуманного вмешательства в технологию установки на КА очень чувствительного прибора, каким является магнитометр. Разработчики космических аппаратов, стремясь снизить массу арматуры спутников, стали использовать в некоторых конструктивных элементах (в частности, в штангах магнитометров) более легкие материалы. Так, вместо обычного дюралюминия был применен новый сплав с повышенным содержанием магния. Эта конструктивная "модификация" немедленно

сказалась на чистоте показаний магнитометров. Истинную причину возникших помех удалось определить не сразу, а только после детального обследования в лаборатории всех конструктивных элементов, располагавшихся вблизи датчиков магнитометров. Оказалось, что новый сплав отличался от прежнего повышенной фото- и термоэмиссией электронов, вызываемой перепадом температур при освещении или подогреве Солнцем магниевых штанг магнитометров. В результате фототоки или термотоки создавали вблизи датчика заметные поля, вносящие помехи в показания магнитометра порядка 20-30 нТл. В конечном итоге проблема была решена усилиями магнитологов ИЗМИРАН.

Возможно, подобных "неудобств" можно было избежать, если бы при наземной подготовке космических экспериментов были созданы необходимые условия для проверки аппаратуры на электромагнитную совместимость (ЭМС). Для этого требовались немагнитные камеры или павильоны, позволявшие измерять постоянные и низкочастотные поля в окрестности КА. Практически до сих пор эти условия так и не реализованы в полной мере. Огромные усилия по решению этой проблемы были предприняты заведующим лабораторией Института космических исследований С.И. Климовым. В частности.

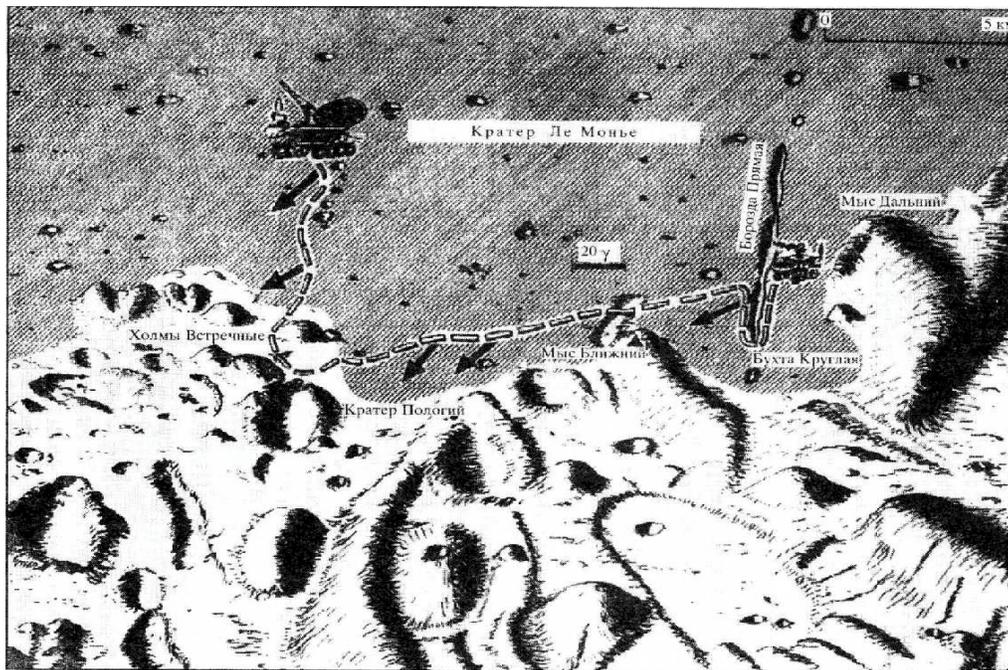


Рис. 3. Маршрут "Лунохода-2"

Стрелками изображена горизонтальная составляющая магнитного поля. В среднем вдоль пути аппарата вектор поля направлен к западу, юго-западу и вверх от поверхности Луны (Ерошенко, 1975)

в конце 80-х — начале 90-х годов XX в. благодаря его настойчивости были официально утверждены нормы и требования по ЭМС, предъявляемые не только к научной, но и к служебной аппаратуре, устанавливаемой на ИСЗ и КА.

Приведенный пример показателен для развития отечественных космических исследований еще и потому, что после кончины С.П. Королева в среде технических работников, создававших и эксплуатировавших космические аппараты, "наука" всегда числилась во "втором эшелоне". Наибольшие привилегии при доставке на борт и

эксплуатации всегда имели служебные системы космических аппаратов. Лишь в редких случаях удавалось добиться выполнения хотя бы минимальных требований ученых. Особенно активно отстаивал интересы научного сообщества К.И. Грингауз - заведующий лабораторией Института космических исследований (ИКИ) АН СССР, выдающийся ученый-экспериментатор в области космических исследований. Но и ему, к сожалению, зачастую приходилось довольствоваться малым: лишней ламелью коммутатора, сотней граммов дополнительного веса или чем-то в этом роде.

Возвращаясь к истории исследований магнетизма Луны, отметим, что, несмотря на то, что только на трех КА проводились магнитные эксперименты: - "Луна-2", "Луна-10" и "Луноход-2", нам все же удалось внести весомый вклад в понимание природы лунных магнитных полей. Конечно, американские коллеги-магнитологи обладали очень качественным материалом, добытым в экспериментах на спутнике "Explorer-35" и в экспедициях "Apollo", но и магнитная лаборатория ИЗМИРАН в 1973 г. в ходе работы самоходного аппарата "Луноход-2" получила уникальные результаты. Они подтвердили существование остаточного намагничивания лунных пород (Долгинов и др., 1975а). Максимальные поля, обнаруженные луноходом, достигали 20—30 нТл (рис. 3). К сожалению, это был последний успешный магнитный эксперимент в отечественной лунной программе.

### **Магнитные поля планет: Марс и Венера**

В отечественной космической программе, сформулированной в окончательном виде М.В. Келдышем, в качестве приоритетной научной задачи было выбрано исследование ближайших к Земле планет - Венеры и Марса. При решении этой задачи были созданы магнитометры и плазменные детекторы, которые устанавливались на первых автоматических межпланетных станциях (АМС) - "Марс" и "Венера", направленных к этим планетам. С их помощью предполагалось обнаружить собственные магнитные поля планет и явления, возникающие при взаимодействии солнечного ветра с газовыми оболочками планет.

Первыми попытками "подобраться" к Венере и Марсу стали полеты АМС "Венера-1" (1961) и "Марс-1" (1962), которые, к сожалению, закончились неудачей. Благодаря усилиям М.В. Келдыша и С.П. Королева запуски АМС настойчиво продолжались. Использовались почти все астрономические "окна" для полетов к Марсу и Венере. Однако только спустя 10 лет российским экспериментаторам впервые удалось обследовать окрестности Марса при сближении с ним АМС "Марс-2" и "Марс-3" в 1971-1972 гг. (Долгинов и др., 1972). Несколько ранее, в 1967 г., была обнаружена отошедшая головная ударная волна Венеры при пролете мимо нее АМС "Венера-4" (Долгинов и др., 1968).

У Марса, помимо головной ударной волны, было открыто усиление напряженности магнитного поля в его лобовой подсолнечной зоне, подобное тому, которое существует на дневной границе земной магнитосферы. В 1974 г. данные КА "Марс-2" и "Марс-3" были дополнены новыми результатами с КА "Марс-5" (Долгинов и др., 1975б). Однако для создания полной картины обтекания Марса солнечным ветром полученных данных было недостаточно.

Вопрос о существовании собственного магнитного поля Марса решался авторитетной экспертной комиссией, один из членов которой, С.И. Брагинский, не согласился с итоговым выводом, что Марс обладает собственным магнитным полем, дипольный момент которого равен  $2,5 \cdot 10^{22}$  Гс  $\cdot$  см<sup>-1</sup>, что соответствует напряженности магнитного поля на поверхности планеты порядка 60 нТл (для сравнения у Земли  $M_z = 8 \cdot 10^{25}$  Гс  $\cdot$  см<sup>3</sup>). Активный сторонник вывода о существовании собственного поля Марса Ш.Ш. Долгинов настаивал не только на этом, но и на определенной, по его мнению, ориентации марсианского диполя, противоположной таковой у земного диполя. Он считал, что северный

полос марсианского диполя находится в северном полушарии.

Следует напомнить, что к тому времени еще ничего не было известно о существовании у Венеры индуцированной (а не собственной) магнитосферы. Впервые вопрос об образовании такой магнитосферы у планет, не имеющих собственного магнитного поля, но обладающих достаточно плотной атмосферой и ионосферой, возник в 1975 г. при анализе результатов, полученных на первых искусственных спутниках Венеры - российских аппаратах "Венера-9" и "Венера-10". Снова была горячая дискуссия, вновь была создана экспертная комиссия, в которую вошли профессора Б.А. Тверской и И.М. Подгорный. Но на этот раз одному из авторов магнитного эксперимента, Е.Г. Ерошенко, удалось отстоять свою точку зрения и доказать, что у Венеры имеется индуцированный магнитный хвост, подобный хвостам комет (Ерошенко, 1979). Последний вывод был подтвержден затем американскими данными, полученными на КА "Pioneer-Venus-Orbiter" (Russell et al., 1981).

Наконец, результаты последнего отечественного, точнее, международного проекта "Фобос", частично выполненного в 1988-1989 гг., убедительно показали, что Марс, как и Венера, имеет индуцированную магнитосферу и что положение связей силовых линий в его магнитном шлейфе определяется ориентацией поперечной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Этот вывод был сделан на основе данных магнитного эксперимента, подготовленного в кооперации Австрия - ФРГ - Россия (Schwingenschuh et al., 1992).

Формирование индуцированной магнитосферы Марса подтвердили последние результаты, полученные в 1997 г. на американском КА "Mars Global Surveyor" (Acuna et al., 1998a). Кроме того, магнитометром этого аппарата были обнаружены локальные магнитные поля Марса, вызванные, вероятно, остаточной намагниченностью его горных пород, подобные тем, что наблюдались на поверхности Луны (Acuna et al., 1998b). Новые данные американских магнитологов по магнетизму Марса были доложены в 1998 г. в Институте космических исследований в Москве на международном симпозиуме "Исследование космической плазмы прямыми и дистанционными методами", посвященном 80-летию К.И. Грингауза.

### **Межпланетные магнитные поля**

В силу многих отмечавшихся выше технических ограничений отечественные исследования межпланетного космического пространства, в том числе и изучение ММП, проводились в довольно ограниченном диапазоне гелиоцентрических расстояний (0,7-1,5 а.е.) на трассах перелета некоторых КА от Земли до Венеры, Марса и кометы Галлея в период с 1962 по 1989 г. Кроме того, измерения ММП эпизодически проводились и на ИСЗ, выходящих за пределы магнитосферы Земли в солнечный ветер. При этом измерялись, как правило, три компоненты магнитного поля. Это позволило выявить секторную структуру ММП, а также изучить некоторые особенности распространения от Солнца межпланетных возмущений (Стяжкин и др., 1994). Были обнаружены также следы дальнего магнитного шлейфа Земли на расстоянии около  $3000 R_3$  на трассе перелета КА "Фобос-1" и "Фобос-2" от Земли до Марса (1988) (Стяжкин и др., 1993).

С 1995 по октябрь 2000 г. данные о структуре ММП поступали магнитологам ИЗМИРАН и их коллегам из других институтов (ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ и др.) с КА "Интербол". Сейчас через сеть Интернет они могут быть использованы всеми заинтересованными "потребителями".

### **Магнитные поля в окрестности малых небесных тел**

В нашем случае мы относим к малым небесным телам кометы, астероиды и малые спутники диаметром от 10 до 100 км. Исследование этих объектов давно интересовало наших ученых. Я хорошо помню, как на одном из совещаний в ИЗМИРАН в конце 70-х

годов директор Института геохимии АН СССР В.Л. Барсуков заявил, что наиболее приоритетной проблемой в изучении происхождения и эволюции Солнечной системы является анализ вещества комет и астероидов, которое представляет собой исходный материал, послуживший основой для формирования планет и образования самой Солнечной системы.

В отечественной кометной программе первым объектом для изучения прямыми методами стала комета Галлея в период прохождения ее перигелия в 1986 г. Оснащенные мощным комплексом научной аппаратуры КА "Вега-1" и "Вега-2" (пролетевшие перед этим мимо Венеры с высадкой научного "десанта") прошли вблизи кометы Галлея в марте 1986 г. В этом уникальном проекте участвовало множество российских и зарубежных институтов. Магнитный эксперимент был подготовлен Австрией и Россией.

Впервые удалось измерить прямыми методами магнитные поля и плазму в головной коме кометы и установить степень усиления поля при "нагревании" и "обволакивании" плотной кометной ионосферы набегающим потоком солнечного ветра с вмороженным в него межпланетным полем. Было установлено, что в коме напряженность магнитного поля повышается в 6-8 раз по сравнению с существующей в свободном солнечном ветре (Ридлер и др., 1986).

Результаты магнитных измерений на КА "Вега-1" и "Вега-2" были подтверждены через два-три дня аналогичными данными, полученными на европейском аппарате "Giotto", пролетевшем мимо кометы еще ближе и пересекшем ионосферную полость, внутри которой напряженность магнитного поля спадала до нуля (Neubauer, 1986). Магнитологи ИЗМИРАН и их австрийские коллеги в ходе этого пролета были огорчены драматическим событием, когда при сближении с кометой КА "Вега-2" в результате столкновения с пылевыми частицами был разрушен один из трех датчиков магнитометра (или кабель, соединявший датчик с блоком электроники), вследствие чего была потеряна очень ценная информация.

Результаты прямых измерений магнитного поля и плазмы у кометы Галлея не только подтвердили некоторые теоретические модели обтекания комет солнечным ветром, но и позволили обнаружить несколько новых явлений. В частности, на КА "Вега-1" и "Вега-2" удалось заметить особый тип возмущений магнитного поля и плазмы, соответствующий механизму зеркальной неустойчивости плазмы (Yeroshenko et al., 1987). Этот результат может приоткрыть загадку природы кометных лучей, уже давно наблюдавшихся наземными оптическими методами.

К исследованиям тел астероидного типа следует отнести измерения в окрестности марсианских спутников Фобоса и Деймоса. Самые первые указания на необычный характер возмущений в солнечном ветре, наблюдавшихся в кильватерном следе Деймоса, были получены А.В. Богдановым по результатам измерений на КА "Марс-5" в 1974 г. (Богданов, 1977). Это открытие было сделано случайно, поскольку в то время еще не было специальной научной программы по изучению малых тел.

Первые комплексные исследования характеристик другого спутника Марса - Фобоса предполагалось провести в ходе экспедиции "Фобос-2" в 1989 г. Однако из-за преждевременной потери КА "Фобос-2" удалось получить весьма ограниченную информацию о характере взаимодействия ближней экзосферы Фобоса с солнечным ветром и индуцированной магнитосферой Марса. По мнению автора, наиболее реальной причиной появления в солнечном ветре необычных возмущений, обнаруженных в конце марта 1989 г, вблизи Фобоса, являются процессы взаимодействия магнитосферы Марса и солнечного ветра с тонким пылевым диском Фобоса (Ерошенко, 2000). До этого эксперимента предполагалось несколько моделей формирования пылевого тора (диска) на орбите Фобоса за счет метеоритной бомбардировки его поверхности. Однако прямые измерения пылевой компоненты так и не удалось провести из-за потери КА "Фобос-2".

По нашему мнению, магнитные и плазменные измерения в случаях, подобных Фобосу и Деймосу, способны выявить некоторые особенности пылевой среды в окрестности малых тел

даже без помощи прямых контактных методов. Кстати, одной из возможных причин преждевременной потери КА "Фобос-2" могло быть воздействие на служебные системы аппарата электростатического заряда в пылевом диске Фобоса.

### Заключение

История отечественных магнитных исследований насчитывает уже более 40 лет. Она показывает, что по метрическим характеристикам бортовых магнитометров на космических аппаратах во многих случаях мы нисколько не уступали зарубежным экспериментаторам. Это позволило нам получить такие важные фундаментальные результаты, сделанные на уровне открытий, как свойства магнитных полей около Земли, в окрестности Луны и на ее поверхности, в плазменных оболочках Марса, Венеры и кометы Галлея, вблизи марсианских спутников и в межпланетной среде.

Разработка и совершенствование магнитометров для измерений в космосе привели к созданию самой современной аппаратуры, в которой применяются новые материалы и технологии, широко используются бортовые микропроцессоры. Наряду с повышением чувствительности и расширением спектрального диапазона были предприняты меры к обеспечению условий помехозащищенной работы магнитометров на борту КА. Некоторые из разработок нашли свое применение в других областях науки и техники: в геологоразведке, биологии и медицине.

Нельзя не отметить большой вклад в развитие отечественной космической магнитологии разработчиков уникальной научной аппаратуры Ю.В. Афанасьева и В.П. Люлика из ленинградской "Геологоразведки": А.А. Заруцкого из Специального конструкторского бюро физического приборостроения в г. Троицке, а также самих организаторов и участников экспериментов - сотрудников ИЗМИРАН Л.Н. Жузгова, В.Б. Бузина, В.А. Стяжкина. В значительной мере успехи отечественных магнитных космических экспериментов обязаны энтузиазму бесценного руководителя этих работ доктора физико-математических наук Ш.Ш. Долгинова, посвятившего более полувека своей жизни созданию и использованию сверхчувствительной магнитометрической аппаратуры. Автор статьи выражает ему свою искреннюю благодарность за предоставленную возможность участвовать в пионерских магнитных экспериментах на протяжении более чем 40 лет - от зари космической эры до таких последних многофункциональных международных проектов, как "Вега-1" и "Вега-2", "Фобос-1" и "Фобос-2". В целом ряде случаев автору в трудных и продолжительных спорах со своим руководителем Ш.Ш. Долгиновым и другими коллегами приходилось отстаивать свою точку зрения по таким фундаментальным проблемам, как обнаружение индуцированных магнитосфер Венеры и Марса или открытие магнитными методами характерных свойств пылевого диска Фобоса.

Все же следует сказать, что возможности российской космической техники и отсутствие Все же следует сказать, что возможности российской космической техники и отсутствие научного лидера масштаба М.В. Келдыша пока не способствуют исследованию Солнечной системы за пределами орбиты Марса. Наши американские коллеги получили в этом отношении значительное преимущество, изучая уже в течение долгого времени (почти 30 лет) со своих межпланетных космических аппаратов не только планеты-гиганты, но и более дальние регионы Солнечной системы.

Остается только надеяться, что если не мы, то хотя бы наши дети и внуки продолжат славные традиции первых отечественных космических магнитологов, раскроют в деталях происхождение магнетизма Марса, Меркурия, крупных астероидов и доберутся до плазменной границы нашей Солнечной системы, ограниченной гелиосферной головной ударной волной, где предполагается прямое столкновение плазмы межзвездной среды с

солнечным ветром.

В заключение автор благодарит А.Д. Шевнина и В.В. Темного за участие и помощь в подготовке некоторых разделов настоящей статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонова А.Е., Шабанский В.П. О структуре геомагнитного поля на больших расстояниях от Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. С. 801.
2. Аницлевиц М.Г., Шевнин А.Д. К вопросу о геомагнитных наблюдениях на первой советской космической ракете // ДАН СССР. 1960. Т. 135, № 2. С. 298-300.
3. Богданов А.В. Некоторые свидетельства возможности сильного взаимодействия спутника Марса - Деймоса с солнечным ветром // Космич. исслед. 1977. Т. 15, № 5. С. 741-746.
4. Грингауз К.И., Шкловский И.С., Курт В.Г., Мороз В.И. Результаты наблюдений заряженных частиц до высот 100 000 км на советских космических аппаратах // Астрон. журн. 1960. Т. 37. С. 716.
5. Долгинов Ш.Ш., Пушков Н.В. Магнитное поле внешней корпускулярной области // ДАН СССР. 1959. Т. 129, № 1. С. 77-80.
6. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. и др. Магнитные измерения на второй космической ракете // Искусств, спутники Земли. 1960. Вып. 5. С. 16-23.
7. Долгинов Ш.Ш., Жузгов Л.Н., Пушков Н.В. и др. Некоторые результаты измерения постоянного магнитного поля Земли с 3-го искусственного спутника Земли над территорией СССР // Геомагнетизм и аэрономия. 1962. Т. 2, №6. С. 1061.
8. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. Исследование магнитосферы Земли в области радиационного пояса (3-6 R<sub>3</sub>) в феврале-апреле 1964 г. // Исследования космического пространства: (Тр. конф.). М.: Наука, 1965. С. 342.
9. Долгинов Ш.Ш., Жузгов Л.Н., Селютин В.А. Магнитометрическая аппаратура третьего советского искусственного спутника Земли // Искусств, спутники Земли. 1966. Вып. 4. С. 135.
10. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. Исследования магнитного поля с межпланетной станции "Венера-4" // Космич. исслед. 1968. Т. 6. С. 469-80.
11. Долгинов Ш.Ш., Пушков Н.В. Исследования магнитных полей Земли и планет // Успехи СССР в исследовании космического пространства: (Первое космическое десятилетие, 1957-1967). М.: Наука, 1968. С. 173-249.
12. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. Магнитное поле в ближайшей окрестности Марса по данным спутников "Марс-2" и "Марс-3" // ДАН СССР. 1972. Т. 207. С. 1296.
13. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. и др. Магнетизм и электропроводность Луны по данным "Лунохода-2" // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 314.
14. Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жузгов Л.Н. Магнитное поле Марса по данным спутников "Марс-3" и "Марс-5" // Космич. исслед. 1975. Т. 13, № 1. С. 108.
15. Долгинов Ш.Ш. Исследование магнитного поля Земли // Успехи Советского Союза в исследовании космического пространства: (Второе космическое десятилетие, 1967-1977). М.: Наука, 1978. С. 135-177.
16. Ерошенко Е.Г., Антонова А.Е. Структура высокоширотной магнитосферы // Космич. исслед. 1970. Т. 8, № 3. С. 397.
17. Ерошенко Е.Г. Магнетизм Луны // Земля и Вселенная, 1975. Вып. 5. С. 26-32.
18. Ерошенко Е.Г. Эффект униполярной индукции в магнитном шлейфе Венеры // Космич. исслед. 1979. Т. 17. С. 93-105.
19. Ерошенко Е.Г. Взаимодействие солнечного ветра и магнитосферы Марса с пылевым диском Фобоса // Там же. 2000. Т. 38, № 2. С. 127-139.
20. Плетнев В.Д., Скуридин Г.А., Шалимов В.П., Швачунов И.Н. Динамика геомагнитной ловушки и происхождение радиационных поясов Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5, № 4. С. 626.
21. Ридлер В., Швингеншу К., Ерошенко Е.Г. и др. Наблюдение магнитного поля в коме кометы Галлея // Письма в "Астрон. журн." 1968. Т. 12. № 8. С. 647-652.

22. *Стяжкин В.А., Иванов К.Г., Ерошенко Е.Г.* Магнитное поле на  $24 \cdot 10$  км вниз по потоку от Земли по измерениям на КА "Фобос-2" в сентябре 1988 г. // *Космич. исслед.* 1993. Т. 31, № 5. С. 137-143.
23. *Стяжкин В.А., Ерошенко Е.Г., Иванов К.Г.* Межпланетное магнитное поле по измерениям на КА "Фобос-2". 1. Гелиофизическая обстановка и секторная структура // *Геомагнетизм и аэрономия.* 1994. Т. 34, № 1. С. 7-14.
24. *Acuna M.H., Connerney J., Wasilewski P.* et al. Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission // *Science.* 1998. Vol. 279. P. 1676.
25. *Acuna M.H., Connerney J., Wasilewski P.* et al. Макс magnetic field: Discovery of paleomagnetic fields due to crustal remnance // Intern, symp. "Space plasma studies by in situ and remote measurements": Book of abstracts. Moscow, 1998. P. 3.
26. *Biermann L.* Physical processes in comet tails and their relation to solar activity // *Li-physique des comets.* Liege, 1953. Vol. 4. (Extr. Mem. Soc Roy. Sci. Ser. B).
27. *Frank L.A.* Plasma in the Earth's polar magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1971. Vol. 76. P. 5202.
28. *Fuller M.* Lunar magnetism // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1974. Vol. 12. P. 23.
29. *Neubauer F.M.* Giotto magnetic results on the magnetic field pile-up region and the cavity boundaries // *Proc. 20th ESLAB symp. On the exploration of Halley's comet.* 1986. P. 35-41. (ESASP-250).
30. *Russell C.T., Luhrmann J.C., Elphic R.C., Scarf F.L.* The distant bow shock and magnetotail of Venus: Magnetic field and plasma wave observations // *Geophys. Res Lett.* 1981. Vol. 8. P. 843-846.
31. *Schwingschuh K., Riedler W., Zhang T.-L.* et al. The Martian magnetic field environment: Induced or dominated by an intrinsic magnetic field? // *Adv. Space Res.* 1992. Vol. 12. P. 213-219.
32. *Yeroshenko Ye.G., Sryashkin V.A., Riedler W.* et al. Fine structure of the magnetic field in comet P/Halley coma // *Astron. and Astrophys.* 1987. Vol. 187. P. 69-72.