

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета на диссертацию Андреевой Варвары Андреевны на тему: «Моделирование земной магнитосферы с помощью радиальных базисных функций», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

**Актуальность темы диссертации** связана с тем, что на функционирование важных спутниковых систем разного назначения оказывают существенное влияние изменения характеристик энергичной плазмы в магнитосфере Земли, связанные с изменениями магнитной конфигурации, которые вызваны как изменениями солнечного ветра, так и внутримангитосферными взрывными процессами. Дальнейшие исследования физической природы возмущений и практические задачи мониторинга космической погоды требуют развития и увеличения точности эмпирических моделей магнитосферного магнитного поля.

**Новизна полученных результатов.** В ряду существенных новых результатов отметим следующие. В работе впервые предложен, опробован и практически реализован метод разложений по радиальным базисным функциям (РБФ) для построения эмпирических моделей магнитосферного поля, который не использует априорную информацию о моделируемой токовой системе. Продемонстрирована высокая точность РБФ моделей при построении глобальных моделей магнитосферы. Показана возможность комбинирования нового подхода с прежним модульным подходом, описывающим явно физические элементы токовой системы, что позволяет устранить недостатки каждого из методов, а также дает исследователям более совершенный инструмент для исследования физики глобальных токовых систем в околоземной плазме. Построена локальная модель магнитного поля в окрестности густонаселенной спутниками геостационарной орбиты. В новых глобальных магнитосферных моделях удалось описать известные эффекты (бифуркация тока в плазменном слое, проникновение  $V_u$  компоненты ММП и диамагнитная депрессия в каспах) которые плохо воспроизводились в прежних моделях.

**Достоверность полученных результатов и выводов** обусловлена огромным объемом используемых архивов экспериментальных данных, подтверждена тестированием на независимых выборках данных и использованием известных статистических методов оценки точности моделей. Результаты обсуждались на 4 международных и 4 всесоюзных конференциях и опубликованы в международных журналах первого ряда..

**Ценность для науки и практики.** Результаты работы показали эффективность разработанного метода, новые модели отличаются большей точностью. Возможность их сопряжения с модульными моделями делает моделирование более гибким, увеличивает точность описания магнитного поля, и дает в руки исследователям новый инструмент для изучения динамики крупномасштабных токовых систем. Предложена усовершенствованная локальная модель магнитного поля в окрестности густонаселенной спутниками геостационарной орбиты.

Работа объемом 103 стр. состоит из введения, 4 глав и заключения, включает список литературы из 91 источника, 5 таблиц, 23 рисунков и 2 приложения. Во введении отмечена особая роль магнитной конфигурации магнитосферы в формировании плазменных оболочек и их изменений, ее существенная изменчивость, особая роль эмпирических магнитосферных моделей магнитного поля как своего рода карт магнитосферной системы и источника информации о многообразных изменениях глобальных токовых систем. Сформулированы цели работы, подчеркнуты ее актуальность, научная и практическая значимость. Приведен список докладов и публикаций автора по данной теме.

В первой главе описаны основы эмпирического подхода к моделированию магнитосферного магнитного поля. Подробно обсуждается модульный подход к моделированию, основанный на выделении отдельных распределенных токовых систем с априорно заданными геометрическими свойствами, способы учета зависимостей от внешних параметров, и варианты его применения. Будучи до последнего времени основным методом, модульный подход имеет ряд существенных недостатков ограничивающих его развитие и точность моделирования. В то же время свободные от априорных ограничений методы, основанные на формальных разложениях потенциалов, не получили пока значительного развития. Дальнейшее их развитие целесообразно ввиду огромного и быстрорастущего объема архива спутниковых измерений в магнитосфере.

В главе 2 описан новый подход, в котором магнитное поле в магнитосфере разложено на сумму тороидальной и полоидальной производящих функций, которые в свою очередь представляются линейными разложениями по скалярным радиальным базисным функциям (РБФ). Обсуждаются достоинства этого метода, в частности, возможность сравнительно легко менять конфигурацию и плотность РБФ центров в зависимости от распределения плотности исходных данных и доступных ресурсов. Выписаны соотношения, позволяющие учесть наклон диполя и свойства симметрии магнитосферного поля для уменьшения количества требуемых РБФ центров и трудоемкости вычислений.

Реализация метода на примере построения глобальной модели магнитосферы рассмотрена в главе 3, являющейся основной в диссертации. Здесь рассмотрены модели для внутренней магнитосферы для 4 выборок, относящихся к разным фазам магнитной бури. Описаны конкретный вариант выбора базисных функций и расположения узлов, учитывающий особенности моделируемого поля, массив используемых спутниковых данных и критерии характеристики состояния на основе сглаженных значений  $SymH$  индекса кольцевого тока и его производной. Проведен тест модели на искусственных данных, созданных на основе модели TA15 при разных пространственных распределениях тестовых данных. Это методическое исследование показало, что в целом известная конфигурация хорошо воспроизводится РБФ моделью, но при этом выявляется проблемная область для РБФ метода в полярных областях на небольших удалениях от Земли, где разрешающая способность принципиально недостаточна.

Применительно к магнитной буре, полученные распределения магнитного поля и восстановленных по нему электрических токов воспроизводят известные особенности депрессии магнитного поля в периоды бурь и основные известные токовые системы

включая: смещение внутрь и усиление токов на главной фазе бури, утро-вечернюю асимметрию кольцевого тока, восточные токи на его внутреннем крае, диамагнитные токи каспов и пр. В ряду выявленных эффектов особо упомянем бифуркацию токов в «рогах» плазменного слоя, которая не воспроизводилась в модульных моделях. Сравнение статистических оценок для полной базы измерений во всей магнитосфере (~0.7 млн. точек) показало заметное увеличение точности прогноза внешнего магнитного поля РБФ моделью в сравнении с недавней модульной моделью TA15.

Особо важную роль в диссертации, на мой взгляд, играет раздел 3.7, в котором предлагается и тестируется возможность объединения двух подходов, т.е. построения гибридной модели, использующей РБФ поправку к части, описываемой модульной моделью. Объединение подходов позволяет использовать сильные их стороны для устранения проблем каждой из моделей (например, при описании продольных токов над ионосферой, проблемной области для РБФ модели), что приводит к заметному уменьшению относительной ошибки. Важно, что гибридный подход позволяет не просто улучшить точность предсказания, но и увидеть проблемные места в модульном описании и указать на необходимые ее усовершенствования, что весьма важно для дальнейшего изучения магнитосферных токовых систем. .

В главе 4 на основе РБФ подхода построена локальная модель магнитного поля в наиболее динамичной, сложной и практически важной области ( $L$  от 5 до 8.4  $R_E$ ) – в окрестности геостационарной орбиты, где сосредоточены сотни действующих космических аппаратов разного назначения. Тестирование по 2 независимым наборам данных и сравнение с известной моделью TS05 показали, что РБФ модель лучше воспроизводит магнитное поле, в частности, учитывает эффект проникновения  $B_y$  компоненты ММП.

В заключение приведены основные результаты диссертационной работы.

В целом рецензируемая диссертация представляет полный цикл исследований: в ней развит новый метод, метод опробован на большом материале и подтверждена его полезность и перспективность, построенные конкретные модели обеспечивают лучшую точность предсказания магнитного поля, полезны для исследования магнитосферной динамики и найдут практическое применение. Работа высокопрофессиональная, статьи отражающие основные ее результаты опубликованы в ведущих международных журналах.

Несмотря на несомненные достоинства работы по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний:

1). В русском тексте имеется ряд опечаток, и неудачных выражений, например:

- на стр.5: «..была эмпирически постулирована деформация...»

- там же: «..глобальная модель воспроизводит все характерные особенности магнитосферной конфигурации» (наверное имеется в виду – все *известные* особенности) и пр

2) Понятно, что текст диссертации близко следует за текстом статей, однако при подготовке диссертации было бы уместно включить дополнительный материал, например:

- в гл.2. диссертации хотелось бы увидеть краткую сводку сведений об основах метода РБФ разложений (общих свойствах, ортогональности, уроках практического применения и пр), приведенная информация фрагментарна и не дает общего впечатления об уровне достижений в этой, новой для геофизики области исследований.

- индекс RE, учитывающий разницу абсолютных значений прогнозируемой и измеряемой величин, широко используемый ныне в качестве меры точности предсказаний моделей, был использован при характеристике модели в разделе 4. Его стоило бы также посчитать и привести при оценке моделей в разделе 3.

Сделанные замечания не умаляют значения и не снижают общей высокой оценки работы

Диссертация Андреевой Варвары Андреевны на тему: «Моделирование земной магнитосферы с помощью радиальных базисных функций» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Андреева Варвара Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — Физика Солнца. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Председатель диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры физики Земли Физического факультета СПбГУ



Сергеев Виктор Андреевич

10.04.2020