

Отзыв на диссертацию В.А.Андреевой
«МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ
РАДИАЛЬНЫХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ»
представленную на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук

Магнитное поле магнитосферы является суммой «постоянного» квазидипольного геомагнитного поля, определяемого процессами в ядре Земли, и переменного поля, определяемого такими токовыми системами, как кольцевые DR-токи, текущие вокруг Земли на удалении от 2 до 8 земных радиусов (R_E), продольные электрические FAC-токи, текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля, токи на магнитопаузе, отделяющей магнитосферу от плазмы солнечного ветра, и токи, текущие в хвосте магнитосферы и др.. Эти токи генерируются в магнитосфере под воздействием солнечного ветра и испытывают, в соответствии с вариациями параметров солнечного ветра, непрерывные временные изменения в диапазоне от секунд до нескольких лет. Вклад постоянного магнитного поля уменьшается при удалении от Земли (пропорционально R^{-3}), и на первый план выходит вклад внешних источников (магнитосферных токов). Для учёта вклада внешних источников обычно используется модульный подход, при котором структура каждого источника (модуля) и характер её изменений задаются априори, исходя из существующих экспериментальных или теоретических представлений. Внешнее поле в этом случае определяется как суммарный эффект всех рассмотренных источников (модулей), зависящих от параметров солнечного ветра или уровня магнитной возмущённости. Естественно, что априорное задание источников (магнитосферных токовых систем) и характера их изменений не обеспечивает надёжного соответствия между результатами модельных расчётов и реальной структурой магнитосферы. В диссертации предлагается новый метод построения эмпирической модели магнитосферы, основанный только на данных спутниковых измерений магнитного поля и свободный от априорных предположений о геометрии и интенсивности магнитосферных токов. Именно в этом заключается новизна и важность результатов, представленных в диссертации В.А.Андреевой.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений, первое из которых содержит описание довольно сложного математического аппарата, использованного в анализе, а второе является перечнем магнитных бурь за 1996–2016 гг., данные о которых послужили экспериментальной основой анализа. Во Введении указывается цель работы и основные задачи исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту, и отмечается практическая значимость и новизна полученных результатов.

Глава 1 представляет обзор различных вариантов традиционного эмпирического моделирования («модульный подход» и «модели с формальной математической структурой»). Отмечается, что «модульный подход», включающий в себя большое число

предположений о геометрии токовых систем, должен учитывать в деталях зависимость этих токовых систем от параметров солнечного ветра (и/или индексов магнитной возмущённости). Поскольку эта зависимость всё ещё недостаточно изучена, модульный подход описывает лишь среднюю геометрию магнитосферного поля и его отклик на изменения параметров солнечного ветра. Существующие же «модели с формальной математической структурой» либо вообще не рассматривают связь токовых структур с параметрами солнечного ветра, либо характеризуют лишь отдельные токовые структуры и, следовательно, также не обеспечивают глобальное моделирование магнитосферы.

Глава 2 содержит описание нового, разработанного диссертантом, метода моделирования земной магнитосферы без априорных предположений о структуре токовых систем. Суть метода состоит в представлении тороидальной и полоидальной составляющих внешнего магнитосферного поля в виде линейных комбинаций векторов, получаемых из радиальных базисных функций (РБФ) – скалярных функций, зависящих только от расстояния между точкой наблюдения и фиксированными узлами (РБФ-центрами), покрывающими всю область моделирования. РБФ-центры располагаются на концентрических сферических поверхностях, окружающих Землю, вдоль равноудаленных по широте окружностей, из которых первая (вырожденная окружность с нулевым радиусом) соответствует северному полюсу, а последняя соседствует с плоскостью экватора. В диапазоне радиальных удалений от 2 до 12 R_E задаётся 8 сферических слоев, при этом расстояние между соседними сферами возрастает с постоянным масштабным коэффициентом. Таким образом, магнитосферное поле представляется как сумма вкладов от распределенных в области моделирования РБФ-источников, при этом суммирование производится по полному трехмерному набору РБФ-центров с использованием для каждого центра 4-х модельных коэффициентов, определение которых является задачей РБФ-метода. Общее число РБФ-центров в одном полушарии равно 680, что соответствует 2720 модельным коэффициентам. Важным преимуществом такого подхода является возможность локально изменять плотность РБФ-центров при необходимости улучшения качества восстановления поля в какой-то определенной области пространства.

Для построения эмпирической модели использовались данные измерений магнитного поля, выполненных на спутниках Polar, Geotail, Cluster, THEMIS и RBSP в 1995-2016 гг. В работе дается описание экспериментального материала, полученного на этих спутниках. В исследовании использовалась только часть этих спутниковых измерений, относящаяся к области внутренней магнитосферы (2–12 R_E), где конфигурация внешних источников поля подчиняется в основном ориентации земного диполя. Вклад внутреннего поля вычитался из спутниковых измерений, все расчёты компонент модельного поля даны в солнечно-

магнитосферной (SM) системе координат. Все данные были подвергнуты визуальному контролю, что обеспечило исключение из рассмотрения некачественных измерений.

Глава 3 является основной в диссертации. Прежде всего, в ней даётся детальное описание набора базисных функций и схемы расположения РБФ центров в области моделирования. Общее число центров в одном полушарии составляло $N=680$, что соответствует числу $680 \times 4 = 2720$ неизвестных коэффициентов в разложении магнитосферного поля по радиальным базисным функциям. Каждая запись в экспериментальном наборе данных по геомагнитному полю была соотнесена с соответствующими параметрами солнечного ветра (B_z ММП и динамическое давление P_{dyn}), представленными в базе данных OMNI. При этом из рассмотрения исключались измерения, сделанные заведомо вне магнитосферы, а также события с достаточно большими пробелами в данных.

Уровень магнитной активности определялся по величине наземного $SymH$ индекса – показателя депрессии геомагнитного поля, обусловленной магнитосферными токами, и его производной $d(SymH)/dt$. По данным о 5-мин значениях параметров $SymH$ и $d(SymH)/dt$ были выделены 6-часовые интервалы, соответствующие 4-м категориям (уровням) магнитосферной возмущённости: магнито-спокойный период (QT), фаза развития магнитной бури (SD), фаза максимума бури (MP), фаза восстановления (RP). Набор спутниковых данных по каждой из этих 4-х категорий содержал не менее 35 000 измерений геомагнитного поля. В работе представлено распределение плотности данных в двумерном пространстве $SymH$ и $d(SymH)/dt$, а также показано, для указанных выше категорий магнитосферной возмущённости, пространственное распределение данных в моделируемой области магнитосферы.

Тестирование новой РБФ-модели выполнялось с использованием эмпирической модели TA15, которая обеспечивает воспроизведение реалистических конфигураций магнитного поля во внутренней магнитосфере при различных внешних условиях. Результаты тестирования РБФ-метода на искусственно сгенерированных «наборах данных» показали, что новый метод успешно воспроизводит основные особенности поведения внешнего геомагнитного поля в ходе магнитосферных возмущений: (1) развитие депрессии магнитного поля в ночном секторе и её распространение на дневную сторону, (2) различную для разных категорий возмущений глубину проникновения диамагнитной депрессии поля в полярные каспы, (3) возврат к симметричной конфигурации магнитного поля на фазе восстановления, (4) асимметрию поля в северном и южном каспах, ярко выраженную при наклоне земного диполя и другие.

Учитывая успешный результат тестирования, РБФ-метод был использован для моделирования магнитосферных токовых систем по данным реальных спутниковых измерений, выполненных в период 1996–2016гг. Как свидетельствуют результаты моделирования, представленные в диссертации, РБФ-метод выявляет без каких-либо

априорных предположений об источниках поля следующие структурные особенности магнитосферных токовых систем: западные токи на ночной стороне со значительным усилением плотности токов на расстояниях $3 < R < 8 R_E$; бифуркацию токов на внутреннем крае ночного токового слоя; сильную утренне-вечернюю асимметрию токов, характерную для главной фазы магнитной бури; сдвиг к Земле внутреннего края западного тока во время развития возмущения; разветвление кольцевого тока на дневной стороне; диамагнитные токи, опоясывающие «воронки» полярных каспов, и другие детали.

При этом системы магнитосферных продольных токов FAC R1 и R2 на низких высотах в авроральной зоне остались невыявленными, так как их поперечный масштаб (не более десятых долей R_E) оказался далеко за пределами пространственного разрешения РБФ модели. Принимая во внимание, что структура продольных токов на низких высотах хорошо воспроизводится в модульных моделях, диссертантом была разработана «гибридная» модель, объединяющая модульный и РБФ методы. В гибридной модели крупномасштабная структура магнитосферы восстанавливается с помощью модульной модели, а затем к ней добавляется РБФ модель, которая играет роль поправки второго порядка и описывает более тонкие структуры, отсутствующие в модульной модели. Сопоставление результатов моделирования систем продольных токов R1 и R2 по данным одного и того же набора данных с использованием РБФ и гибридной модели показало, что обе модели дают тождественное распределение токов на большом удалении ($R > 4R_E$), тогда как тонкие и интенсивные токовые слои на более близких расстояниях ($R < 4R_E$) успешно воспроизводятся гибридной моделью.

Глава 4 посвящена моделированию геомагнитного поля на геосинхронной орбите, которая является границей между внутренней магнитосферой, для которой типична квазидипольная конфигурация, и более удалёнными областями, где преобладает вклад внешних магнитосферных источников. В настоящее время на геосинхронной орбите (ГСО) работает свыше 400 коммерческих и научных спутников и поэтому возможность мониторинга состояния магнитного поля на ГСО представляет особый интерес.

Глава 4 содержит описание особенностей применения РБФ метода в области ГСО: схему расположения РБФ центров, выбор РБФ функций, детали параметризации модели. Экспериментальной базой моделирования послужили данные магнитных измерений в области ГСО ($5.0 < L < 8.4R_E$, где L - дипольный параметр Мак-Илвейна), полученные на спутниках Geotail, Polar, Cluster, THEMIS и RBSP в 1996–2016 гг.. По данным об индексе магнитной активности Dst были отобраны магнитные бури с интенсивностью в пределах от 35 до 150 nT, которым предшествовал магнитоспокойный период длительностью не менее суток. При этом магнито-возмущённые события 2010 и 2014гг. были исключены из рассмотрения с целью их дальнейшего использования в качестве массива независимых данных для валидации методики

моделирования. В итоге, моделирование выполнялось по набору 71 092 средних 5-минутных данных спутниковых измерений в ходе развития 133 магнитных бурь.

Зависимость магнитного поля в области ГСО от внешних условий учитывалась включением в параметры модельных разложений дополнительных слагаемых, описывающих эффект динамического давления солнечного ветра P_{dyn} и реакцию магнитосферных токовых систем на поступление и последующую диссипацию энергии солнечного ветра в магнитосфере. Неизвестные линейные параметры модели определялись решением системы линейных уравнений, полученных из условия минимизации среднеквадратичной ошибки между наблюдаемыми и модельными векторами геомагнитного поля для набора из 71 092 измерений. Соответствующие значения коэффициентов корреляции между измеренными и модельными величинами B_x , B_y , B_z компонент геомагнитного поля оказались равными 0.92, 0.91 и 0.94.

С целью оценки качества новой модели было проведено сопоставление результатов моделирования на основе модульного (модель TS05) и РБФ подходов с использованием незадействованных ранее данных геомагнитных измерений за 2010 и 2014 гг. (в модели TS05 использовались измерения на геостационарном спутнике GOES, но отсутствовали более поздние данные THEMIS). Как показали результаты валидации, модель РБФ лучше воспроизводит поле во внутренней магнитосфере и демонстрирует, в частности, эффект «проникновения» азимутальной B_y компоненты ММП в область замкнутых силовых линий. Сравнение модельных (РБФ) и реально измеренных на спутнике GOES величин B_x , B_y , B_z компонент геомагнитного поля для ряда конкретных спокойных и возмущённых интервалов также свидетельствует об общем соответствии модельного и реального геомагнитных полей в области ГСО. Кроме того, в главе 4 показана возможность использования РБФ модели в качестве инструмента для трассирования магнитных силовых линий с геостационарной орбиты на высоты ионосферы.

Оценивая диссертационную работу В.А.Андреевой, следует отметить, что диссертация является актуальным научным исследованием, выполненным на высоком профессиональном уровне. Сформулированный в работе новый метод моделирования земной магнитосферы с помощью радиальных базисных функций обеспечивает оптимальное моделирование внешнего магнитного поля по данным исключительно спутниковых измерений без каких-либо априорных предположений о структуре токовых систем, ответственных за генерацию этого поля. Большим преимуществом метода, определяющим его высокую перспективность, является возможность создания локальных РБФ-моделей высокого разрешения для любой, представляющей интерес, области магнитосферы, при условии достаточной высокой пространственной плотности покрытия этой области спутниковыми

данными. Диссертантом выполнен анализ гигантского объёма первичных данных спутниковых измерений, разработаны методы и программные средства первичной обработки и научного анализа полученного материала, и обеспечено наглядное представление полученных результатов.

Оценивая перспективы дальнейшего развития метода моделирования земной магнитосферы с помощью радиальных базисных функций, считаю необходимым отметить следующее обстоятельство. При оценке реакции магнитосферных токовых систем на изменение внешних условий диссертант рассматривает данные о B_z компоненте ММП и динамическом давлении солнечного ветра P_{dyn} , которые публикуются на сайте OMNI. Основой этих данных являются измерения параметров солнечного ветра, выполняемые в точке Лагранжа L1 на удалении ~ 1.5 млн км от магнитосферы. Как показывают результаты недавних исследований [Vokhmyanin et al., 2019; Troshichev and Sormakov, 2019] параметры солнечного ветра, зафиксированные в точке Лагранжа, в $\sim 20\%$ событий не соответствуют параметрам реального солнечного ветра, воздействующего на магнитосферу. В работе [Troshichev and Sormakov, 2019] рекомендуется использовать в качестве реального индикатора геоэффективности солнечного ветра индекс магнитной активности PC , который является показателем поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра [Resolution of the XXII IAGA Scientific Assembly, Mexico, 2013] и предопределяет динамику развития магнитосферных суббурь [Troshichev et al., 2014] и магнитных бурь [Troshichev and Sormakov, 2018]. Представляется, что использование PC индекса в качестве индикатора эффективности внешних воздействий на магнитосферные токовые системы (вместо B_z компоненты ММП, индексов магнитной активности $SymH$, Dst и Kp , и гипотетических показателей геоэффективности солнечного ветра) может существенно улучшить моделирование земной магнитосферы с помощью радиальных базисных функций.

Указанное замечание ни в коей мере не умаляет высокую оценку выполненной диссертационной работы, которая является законченным, экспериментально и теоретически обоснованным научным исследованием. Считаю, что В. А. Андреева безусловно заслуживает присвоения учёной степени кандидата физ.-мат. наук.

Главный научный сотрудник ФГБУ ААНИИ
профессор, доктор физ.-мат. наук



Трошичев Олег Александрович
Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38
E-mail: olegtro@aari.ru