

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

Цыганенко Николай Алексеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСФЕРЫ НА БАЗЕ МНОГОЛЕТНИХ  
АРХИВОВ КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ**

Научная специальность  
1.3.1. Физика космоса, астрономия

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2023

## **Введение**

Магнитное поле – фундаментальный фактор, определяющий структуру и свойства Вселенной от субатомных до межзвёздных масштабов. В околоземном пространстве возмущения на Солнце и в межпланетной среде сопровождаются перестройками геомагнитного поля, накоплением и взрывным высвобождением его энергии, аномальным разогревом верхней атмосферы, ускорением частиц в радиационных поясах, полярными сияниями, геомагнитно-индуцированными токами и рядом других явлений, объединяемых термином «космическая погода». Ввиду быстро и неуклонно растущей роли спутниковых технологий, понимание, моделирование и прогноз состояния земной магнитосферы становится всё более насущной задачей.

В последние полвека преимущественное развитие получили два подхода к моделированию геомагнитосферы. Первый из них основан на суперкомпьютерных численных решениях задач магнитной гидродинамики и кинетики плазмы; его успехи прямо обусловлены прогрессом вычислительной техники. Второй подход – эмпирическое моделирование – базируется на уже накопленных и продолжающих быстро расширяться многолетних архивах данных измерений в магнитосфере, в солнечном ветре и на земной поверхности. Оба подхода имеют свои плюсы и минусы; преимущество глобальных МГД-симуляций в том, что они основаны на первых принципах физики и совместно моделируют динамику полей и плазмы, а к недостаткам относятся проблемы с численной диффузией решений, неясности с включением проводимости плазмы и дрейфа частиц во внутренней магнитосфере. Эмпирические же модели основываются на непосредственных измерениях, с конечной целью воспроизводить фактически наблюдаемую, а не вычисляемую магнитосферу, но задача осложняется разновременностью и неоднородностью данных: во всём гигантском пространстве магнитосферы наблюдения проводятся одновременно не более, чем десятком спутников, тогда как для её точной «мгновенной» реконструкции в идеале требуются созвездия из многих сотен аппаратов. Нельзя не отметить разительный контраст с прогнозированием наземной погоды, в котором симуляции динамики атмосферы корректируются в реальном времени данными с десятков тысяч метеостанций. Для космической же погоды аналогичный синтез остаётся пока за пределами возможного.

## **Задачи и предыстория работы**

Работы в области эмпирического моделирования, обозреваемые в этом докладе, представляют созданное автором в сотрудничестве с его коллегами и учениками новое направление солнечно-земных исследований: моделирование магнитосферы на базе многолетних архивов спутниковых данных. Основополагающим толчком стало появление в 1975г. эмпирической модели Mead & Fairfield [1], построенной

по данным спутников серии IMP в виде предельно простого описания внешней части магнитного поля для четырёх уровней наземной возмущённости. Их модель продемонстрировала связь общей конфигурации магнитосферы с геомагнитной активностью, но без всякой детализации её структуры и вне связи с состоянием межпланетной среды.

В начале 1980-х гг. автором была поставлена задача разработать математические представления магнитных полей основных внеземных источников, сочетающие достаточную простоту вычислений с гибкой и реалистичной геометрией токовых систем, собрать их в единое целое и на базе больших наборов данных построить эмпирические модели магнитосферы для количественного анализа космических и наземных явлений мировым сообществом исследователей. Ниже кратко описаны основные аспекты, этапы и результаты этой многолетней работы, промежуточные итоги которой подводились в обзорах [A8, A44, A78, A80].

## **Краткое описание выполненной соискателем работы и её итогов**

Разработка эмпирических моделей включает в себя следующие основные задачи: (1) формулировка и программное воплощение архитектуры моделей, (2) сборка, систематизация и редактирование баз экспериментальных данных, (3) создание и реализация методов параметризации моделей внешними драйверами и наземными индексами и (4) тестирование и дальнейшее совершенствование моделей – как непосредственно на этапе их создания, так и на основе последующего опыта и отзывов от сообщества пользователей. Выполненная соискателем работа кратко описана ниже, примерно следуя четырём перечисленным выше аспектам, начиная с вопросов математической архитектуры моделей. В дополнение, кратко описаны работы автора в сфере применения моделей, в частности, их использование для моделирования других планетных магнитосфер (Меркурия), а также разработка компьютерных программ для модельных исследований.

### **1. Математическое представление поля токового слоя хвоста магнитосферы.**

Токи хвоста магнитосферы простираются приблизительно от синхронной орбиты ( $R \sim 7R_e$ ) до сотен земных радиусов вниз по потоку солнечного ветра и, наряду с магнитопаузой, являются наиболее крупномасштабной токовой системой. По этой причине, ещё на раннем этапе наших работ ей было уделено основное внимание. Так как магнитный момент Земли в среднем нормален к потоку солнечного ветра и токовый слой хвоста располагается вблизи плоскости экватора, была поставлена задача создать компактную и гибкую аналитическую модель поля плоского слоя конечной толщины с варьируемым радиальным профилем токовой плотности. В ходе первых поисков были найдены достаточно простые варианты, положенные в основу ранних моделей TU82 и T87 [A1, A5, A11]. Самая удачная модель из того же семейства [A6] была построена решением уравнения Ампера для векторного потенциала токового диска с помощью двойного интегрального преобразования.

Наиболее ценным и неожиданным оказались предельная простота решения и его обобщение для конечной толщины слоя и разных скоростей убывания тока в хвост магнитосферы. Благодаря этому модель получила широкое распространение в тех работах, где требуются быстрые численные алгоритмы – например, для массовых расчётов траекторий солнечных космических лучей [2] или в оценках положения изотропных границ неадиабатического рассеяния энергичных частиц на токовых слоях [A2, A4, A16, A65]. На данный момент статья [A6] с описанием модели T89 имеет 1413 ссылок, и в своё время [3] попала в список 100 наиболее цитируемых работ по астрофизике. В работе [A13] была предложена дальнейшая модификация метода, расширившая семейство радиальных профилей тока и использованная в разработке следующих моделей T96 [A17, A18] и TS05 [A33]. Ещё позднее [A36] весь подход был кардинально обобщён: введением азимутальных Фурье-гармоник было снято ограничение осевой симметрией, а интегральная свёртка по радиусу заменилась дискретным разложением по волновым числам, что сообщило модели неограниченную (теоретически) степень радиального и долготного разрешения. На этой основе были разработаны модели нового поколения TS07D и SST19 [A38, A70], использующие динамический отбор архивных данных для извлечения из них максимума информации об эволюции магнитосферы в конкретных событиях.

В последней из моделей модульного типа TA15 [A55] источники поля хвоста были представлены токовым слоем, составленным из набора перекрывающихся колец конечной толщины, с варьируемой скоростью убывания токов в антисолнечном направлении, положением внутреннего края слоя и его толщиной как функции координат. Во всех вышеописанных моделях учитывалось искривление токового слоя в ходе сезонно-суточных вариаций угла наклона геодиполя к терминатору посредством двукратного преобразования исходной неискажённой конфигурации методом бездивергентной деформации магнитного поля [4, A23], упоминаемого ниже в разделах 4–5.

## **2. Моделирование полей симметричного и частичного кольцевых токов.**

Кольцевой ток с его симметричной и частичной (асимметричной) компонентой наряду с токами хвоста является одним из главных источников низкоширотной магнитной депрессии во внутренней магнитосфере, составляющей вблизи Земли около  $-20$  нТ в спокойных условиях и углубляющейся на десятки и сотни нТ во время главной фазы геомагнитных бурь. В предельно компактной форме его вклад был включён в модели TU82, T87 и T89 [A1, A5, A6] в виде модификации вектор-потенциала точечного диполя, превращающей дипольное поле в поле диффузного токового кольца с варьируемым радиусом. Однако, так как реальный кольцевой ток асимметричен по долготе и частично ответвляется в ионосферу продольными токами, стала очевидной необходимость в разработке более совершенной модели. Следуя подходу [A10], такая модель была создана в [A25] исходя из радиальных профилей давления и анизотропии плазмы по данным спутника AMPTE-CSE [5]. В предположении дипольного фонового магнитного поля и бимаксвелловской

функции распределения захваченных частиц, были вычислены распределения объёмной плотности асимметричного кольцевого тока, включая как азимутальные токи на низких широтах, так и замыкающие их продольные токи. Количественное описание магнитного поля находилось отдельно для симметричного и частичного токов. В первом случае интегрированием вычислялся вектор-потенциал, который затем аппроксимировался деформированием поля двух диффузных токовых колец, соответствующих внутренней (восточной) и внешней (западной) части кольцевого тока. Для частичной компоненты, вследствие трёхмерности задачи, решение было найдено разложением долготной вариации экваториального давления плазмы на первые две Фурье-гармоники, что позволило свести задачу к двумерной и затем найти оптимальную деформацию координат, приводящую к наилучшему согласию модельного поля с результатом прямого интегрирования объёмных токов по Био-Савару. Построенный подобным образом модуль кольцевых токов вошёл в состав моделей T02 [A26, A27], TS05 [A33] и наиболее поздней из моделей данного типа TA15 [A55]. Отметим мимоходом, что разработанное в той работе описание поля токового кольца было использовано в [A58] для учёта эффектов кольцевого тока в МГД-расчётах положения магнитопаузы.

### **3. Моделирование магнитных эффектов магнитопаузы.**

Токи на магнитопаузе имеют наибольший пространственный масштаб и отвечают за формирование всей магнитосферы, т.е. в сумме с полем внутренних источников удерживают основную часть земного магнитного потока внутри кометообразной полости. На этом факте и основано моделирование поля магнитопаузы: поскольку оно безвихревое и порождает в сумме с полем экранируемого источника нулевую нормальную компоненту на границе, то может быть найдено из решения задачи Неймана для скалярного потенциала. В ранних работах эта задача решалась лишь для трёх осесимметричных поверхностей: параболоида [6], эллипсоида [A7] и составной магнитопаузы [7] из полусферы и цилиндра. Ни одна из них не давала удовлетворительного описания магнитопаузы в глобальном масштабе. В работе Schulz & McNab [8] было предложено отказаться от аналитических поверхностей и, обобщив таким образом класс границ, осуществлять экранировку приближённо, минимизируя магнитный поток через магнитопаузу. Этот подход был реализован нами [A17] в композитной модели, составленной из полуэллипсоида в долунной области, гладко переходящего в цилиндр в удалённом хвосте. В более поздних моделях, начиная с [A46], использовалось ещё более совершенное эмпирическое описание магнитопаузы [9], полученное из данных её пересечений спутниками и параметризованное не только давлением солнечного ветра, но и межпланетным магнитным полем (ММП). Ещё одна проблема заключалась в том, что самые крупномасштабные источники магнитосферного поля – приэкваториальный токовый слой хвоста и продольные токи системы 1 – простираются вплоть до магнитопаузы и вносят частичный вклад в экранирующие токи. Сложность состояла здесь в необходимости соблюсти сразу два требования – экранировки суммарного поля и замкнутости токов. Как было показано в [A15], проблема

решается посредством любого непрерывного продления токов за пределы магнитосферы, с одновременным добавлением достаточно гибкого безвихревого поля экранировки таким образом, чтобы минимизировать поток через границу и, вместе с тем, сохранить потенциальность суммарного поля в тех областях, где отсутствуют токи (в долях хвоста). Этот метод многократно применялся в ряде задач и остаётся главным инструментом при разработке моделей модульного типа [A17, A26, A27, A33, A36, A46, A55]; см. также обзор [A78].

#### **4. Моделирование магнитного поля систем продольных токов.**

Продольные токи были обнаружены по низковысотным спутниковым данным в начале 1970-х гг. [10]. В силу их глобальной протяжённости и большой суммарной величины (до первых десятков мегаампер), они играют роль основной «линии энергопередачи» из солнечного ветра, возбуждающей конвекцию в магнитосфере и её отклик на космическую погоду в межпланетном пространстве. Эмпирическое моделирование поля продольных токов затрудняется сложностью их изменчивой геометрии и широким диапазоном поперечного масштаба – от сотни километров у ионосферы до десятка тысяч и более в магнитосфере [A12]; в результате создание адекватных моделей долгое время оставалось «неприступным Карфагеном». Наши начальные опыты в этом направлении фокусировались на поиске простых токовых структур с радиальной геометрией линий тока, сходящихся/расходящихся вблизи ионосферы и в то же время дающих близкую к наблюдаемой долготную вариацию токов и полей. В результате был получен аналитический вариант «конической» модели [A9] с нужной ориентацией и величиной поля над полярными шапками и в то же время обеспечивающий независимость северной и южной частей системы. Первая трудность, однако, состояла в явной нереальности подобной модели за пределами ионосферы и недопустимо малой скорости убывания поля с высотой. Дальнейшие поиски [A18] привели к решению вопроса методом бездивергентной деформации исходного поля конической системы [A26]. Параметры деформации были найдены минимизацией отклонения поля от полученного интегрированием токов по поверхности, близкой к дипольным оболочкам у Земли, но стелющейся по границе плазменного слоя хвоста в удалённой магнитосфере. Этот вариант был положен в основание моделей T02, TS05 и TS07 [A27, A33, A36]. Бездивергентная деформация поля, детально описанная в [4], заслуживает отдельного упоминания как мощный инструмент эмпирического моделирования. Метод этот был впервые предложен как универсальное средство для учёта наклона земного диполя в [A23], использовался для этой цели в большинстве последующих моделей и предлагался для моделирования диамагнитных депрессий поля в полярных каспах [A24], обсуждаемых ниже в разделе 6.

В более поздних разработках, начиная с TA15 [A55], на смену деформированной конической модели продольных токов был принят более гибкий вариант, впервые описанный в [A43] в приложении к задаче построения токовой системы суббури,

рассматривавшейся также в [A20, A47, A48, A54]. В качестве исходного пункта здесь использовалось не магнитное поле, а токовые элементы конечной длины и переменной толщины; из их цепочек строится вектор-потенциал и магнитное поле криволинейных трубок переменного диаметра. Суперпозиции из десятков таких перекрывающихся токовых трубок образуют поверхности с варьируемой формой, из которых и собираются модели продольных токов. Преимущество состоит здесь в том, что деформации токовых поверхностей, в отличие от бездивергентных деформаций магнитного поля, не порождают искусственные вторичные токи и, таким образом, позволяют достичь гораздо большей гибкости моделей. В нашей недавней работе [A66] данный метод был применён для построения модели системы продольных токов системы 1, учитывающей их «перехлест» на дневной стороне под влиянием  $V_y$  компоненты ММП, что проявляется в наблюдениях как «проникновение»  $V_y$  в полярные каспы. Упомянув же этот эффект, нельзя обойти вниманием и другое похожее явление – на этот раз в ночной магнитосфере, где в работе [A32] была найдена необычно сильная связь между  $V_y$  ММП и долготным расхождением авроральных форм в магнитосопряжённых точках – на порядок больше предсказанного моделью T96. Проникновение  $V_y$  ММП в магнитосферу исследовалось нами позднее в [A75] в рамках локального РБФ моделирования, в котором, действительно, было обнаружено существенное усиление проникающего азимутального поля в приэкваториальной части ночного сектора.

## **5. Моделирование эффектов, связанных с сезонно-суточными колебаниями ориентации земной магнитной оси.**

Ось магнитного момента Земли наклонена к её оси вращения на угол  $\sim 10^\circ$ , а сама земная ось отклонена на  $23.44^\circ$  от перпендикуляра к эклиптике. Таким образом, в ходе суточного вращения и годового обращения Земли вокруг Солнца магнитный момент отклоняется от плоскости терминатора на угол  $\psi$  в пределах  $|\psi| \leq \pm 33^\circ$ , что приводит к периодическим деформациям магнитосферы. В ранних моделях [A1, A5] этот эффект учитывался простым смещением токового слоя хвоста от плоскости экватора. Впоследствии было обнаружено, что экваториальные токи деформируются более сложным образом, так что искривлённый слой приобретает форму наклонённой чаши с выпуклой стороной обращённой к Солнцу. Впервые чашеобразная деформация была обнаружена в магнитосфере Сатурна [11], а наши модельные исследования, начатые ранее в [A30] и продолженные в [A49–A50] на расширенных наборах данных подтвердили, что аналогичная деформация имеет место и в земной магнитосфере. Для описания эффекта наклона диполя в моделях был взят метод деформаций [A23], исходящий из представления магнитного поля Эйлеровскими потенциалами [4], но сводящийся в итоге к простому тензорному преобразованию, содержащему лишь компоненты магнитного поля и производные новых координат по старым. С помощью этого метода в работе [A46] и на этой основе в модели TA15 [A55] чашеобразная деформация поля была получена как суперпозиция двух «жёлобообразных» искривлений плоского слоя вокруг осей X (день-ночь) и Y (утро-вечер).

Попутно в работе [A49] был затронут вопрос о физической природе чашеобразной деформации экваториальных токов. Хотя сама форма и ориентация искривлённого слоя могла бы навести на мысль о «сдувании» плоского слоя потоком солнечного ветра, такой вариант заведомо исключается, поскольку ветер не может проникнуть внутрь магнитосферы. Объяснение эффекта было получено простым численным экспериментом: в чисто вакуумной модели с наклонённым диполем, полностью экранированным внутри магнитопаузы, было исследовано распределение вдоль магнитных силовых линий зеркального отношения  $V_{\min}/V$ , которое можно считать локальной мерой способности магнитного поля к удержанию плазмы. Несмотря на полное отсутствие внутренних токов в такой модели, полученные диаграммы оказались удивительно сходны по форме с чашеобразным слоем в магнитосфере Сатурна, что наталкивает на простое объяснение эффекта как результат наложения взаимно перпендикулярных асимметрий: (а) в направлении день-ночь вследствие напора солнечного ветра и (б) в направлении север-юг из-за наклона планетарного диполя.

Следует упомянуть и ещё два эффекта, также относящихся к учёту ориентации геодиполя. Первый связан с частыми отклонениями направления солнечного ветра от строго радиального [A21, A30, A39], что приводит к необходимости учитывать их при расчёте эффективного наклона. Вторым эффектом, независимо обнаруженный в двух работах [A53, A55], заключается в чётко выраженной модуляции углом  $\psi$  полных токов во всех основных токовых системах, так что с возрастанием  $|\psi|$  от нуля до  $30^\circ$  суммарные токи уменьшаются на 10–20%.

## **6. Моделирование магнитной структуры полярных каспов.**

Дневные полярные каспы представляют собой фундаментальную топологическую особенность магнитосферы, проявляющуюся даже в простейших моделях в виде нулевых точек с бифуркацией магнитных силовых линий. Ослабленное поле во внешних каспах менее эффективно задерживает солнечный ветер, что приводит к формированию диамагнитных воронок, довольно глубоко проникающих внутрь магнитосферы. В первом опыте локального эмпирического моделирования каспов по данным спутников IMP и HEOS [A3] были исследованы эффекты их широтного сдвига и долготного вытягивания в зависимости от магнитной возмущённости. В более поздней работе [A24] на основе данных спутника Polar была исследована диамагнитная депрессия в северном каспе и предложен метод её количественного описания бездивергентной деформацией исходного поля, с такой подстройкой её параметров, чтобы достичь наилучшего согласия с измерениями. В следующей работе [A40] на основе более обширной к тому времени базы данных Cluster/Polar был проведен детальный анализ пространственного распределения депрессии и эффекта «проникновения» азимутальной  $V_u$ -компоненты ММП внутрь дневной магнитосферы. Наиболее интересным результатом той работы оказалось хорошее соответствие полученного из измерений коэффициента проникновения  $V_u$  и его



радиального градиента с модельным расчётом, основанным на представлении о перекрывающихся в полуденном секторе антипараллельных продольных токах. Детальное моделирование структуры каспов было проведено также в недавних работах [А64, А66] с использованием кусочно-непрерывной модели продольных токов, перекрывающихся в окрестности дневных каспов, и модели диамагнитных источников, построенной в виде трёхмерной совокупности центров деформации магнитного поля, или «магнитных пузырей».

## **7. Модели с варьируемым пространственным разрешением. Локальное моделирование.**

Как уже отмечалось выше, модульный подход к моделированию предполагает ряд априорных предположений о структуре магнитосферы, что ограничивает гибкость и точность эмпирических моделей. В своё время эти упрощения были оправданы скудостью архивов спутниковых данных, но быстрое их пополнение в последние годы ставит вопрос о пересмотре и обобщении архитектуры моделей. Выше уже вкратце упоминалось о новых вариантах описания поля в модели TS07 введением многовихревой системы экваториальных токов. Наряду с достоинствами, такой подход не свободен от недостатков, основными из которых являются глобальный характер разложений Фурье-Бесселя и ограниченность системы токов двумерным их распределением у плоскости экватора с заданной толщиной слоя. В работах [А57, А60] мы предложили заменить модульное описание магнитной структуры магнитосферы распределённой системой парциальных источников, помещённых в узлы трёхмерной решётки, каждый из которых создает пару магнитных полей с тороидальным и полоидальным типом геометрии. Производящие потенциалы для торо- и полоидальных частей заданы радиальными базисными функциями (РБФ), зависящих только от расстояний между точкой наблюдения и узлами 3D-решётки. Бесспорное преимущество такого подхода состоит в его математической простоте, отсутствии априорных предположений о геометрии токов, а также в возможности фокусировать модель на любой подобласти пространства, содержащей данные, т. е. проводить локальное моделирование. Новый метод был успешно реализован и опробован в ряде последующих работ [А64, А66, А68, А71, А75–А76], в том числе для описания временной эволюции низкоширотного магнитного поля в ходе суббурь [А77].

## **8. Гибридное моделирование как синтез модульного подхода и метода на основе формальных РБФ-разложений.**

При разработке РБФ-метода почти сразу же возникла мысль синтезировать его с модульным так, чтобы максимально использовать преимущества обоих подходов. В такой постановке модельное поле описывается как сумма модульной и РБФ-компоненты, а их свободные параметры находятся из данных поочерёдно в ходе двухшаговой процедуры: на первом шаге РБФ-коэффициенты «замораживаются»

на нулевых значениях, а подгонке подвергаются параметры модульной части. На втором шаге компоненты меняются ролями: модульная часть фиксируется, а РБФ-компонента находится из остаточного поля «невязки» как поправка следующего приближения. Эффективность такого гибридного подхода была оттестирована и подтверждена в работе [А62] на многолетних подвыборках данных, отобранных по признакам их принадлежности к последовательным состояниям магнитосферы в ходе геомагнитной бури. Синтез модульной структуры с РБФ-разложениями не только улучшает точность, но также в значительной степени снимает ограничение, связанное с локальным характером РБФ-описания, т. е. его расходимость в тех областях, где слишком мало или вообще нет данных – прежде всего на высоких широтах вблизи магнитопаузы. Это сохраняет возможность использовать модели в тех приложениях, где важно иметь крупномасштабное описание поля, например, для вычислений полного магнитного потока в долях хвоста [А59]. В одной из последних работ [А79] гибридная модель была использована для исследования глобальных деформаций магнитосферы в ходе магнитной бури 3-4 февраля 2022г., изрядно нашуевшей в СМИ из-за связанной с нею потери 38 спутников Starlink.

## **9. Параметризация эмпирических моделей магнитосферы и методы учёта динамики системы. Моделирование бурь и суббурь.**

Ввиду разновременности и неоднородности спутниковых измерений, ключевая проблема извлечения из них информации заключается в нахождении оптимальных методов распознавания и различения состояний магнитосферы, с целью наиболее точного отбора данных для воссоздания её мгновенных конфигураций. В ранние годы, отсутствие систематического мониторинга межпланетной среды вынуждало ограничиваться индексами наземной геомагнитной активности, а несовершенство их временного разрешения сводило параметризацию моделей к простому отбору спутниковых данных по дискретным интервалам возмущённости [1, А1, А5, А6]. Запуск первых мониторов в точку либрации L1 сделал возможным использовать геоэффективные параметры межпланетной среды в качестве входных драйверов моделей T96 и T02 [А17, А26, А27, А29] в виде средних по предшествующим часовым интервалам и, таким образом, в наиболее простой форме учитывать предысторию внешнего воздействия. В модели TS05 [А33], ориентированной на описание бурь во внутренней магнитосфере, был применён более совершенный метод, в котором амплитуды токов каждого модуля вычислялись как результат конкуренции процессов закачивания магнитного потока извне и внутренней его диссипации. Тестирование модели, многочисленные отзывы пользователей и независимые исследования [А34, А35, А37, А69] подтвердили эффективность подхода. Однако, со временем стала очевидной его определённая ограниченность и необходимость перехода от «универсальной» параметризации с априорно предписанным откликом модулей на внешние воздействия к индивидуальному моделированию конкретных событий на основе максимально глубокого анализа доступных характеристик текущего состояния магнитосферы и солнечного ветра и их временных трендов. Это привело к кардинальной ревизии предшествующей

парадигмы и вывели нас на новый виток диалектической спирали – с формальным возвращением к старому методу сортировки данных в поднаборы, но на основе гораздо более тонких критериев извлечения как можно более полной информации с межпланетных мониторов и наземных станций. Суть подхода состоит в выборе не слишком большого числа достаточно независимых нормированных параметров состояния магнитосферы, отслеживания её траектории в пространстве этих параметров в течение события и отборе на каждом шаге определённого числа экспериментальных точек из всего многолетнего архива – ближайших соседей, по которым находятся модельные коэффициенты для данного шага. К настоящему времени метод апробирован для разных вариантов модельных архитектур и ряда событий, включая как геомагнитные бури в широком диапазоне интенсивностей [A38, A42, A45, A56, A73, A74, A79], так и суббури [A67, A70, A77].

## 10. О точности эмпирических моделей.

Естественный вопрос, возникающий у пользователей любых моделей, состоит в том, насколько велики их ошибки. Имея в виду очень широкую сферу применения моделей магнитосферного поля, такая общая формулировка здесь практически бессмысленна. Прежде всего нужно уточнить какая ошибка имеется в виду: если это погрешность оценки вектора поля, то в какой области и при каких внешних условиях её надо оценивать? Простой параметр, характеризующий согласие модели с данными и играющий роль целевой функции при её оптимизации, это среднеквадратичное отклонение  $Q/\sigma_B$  модельного поля от данных, нормированное на среднеквадратичное значение поля  $\sigma_B$  в выборке (имеется в виду лишь внешняя часть поля без вклада земных источников). Типичные значения  $Q/\sigma_B$  составляют от 25% до 50%, в зависимости от уровня возмущённости, протяжённости области моделирования, числа точек в выборке, архитектуры модели, её параметризации, и т. д. При сравнении моделей друг с другом часто используется другой параметр – prediction efficiency, связанный с  $Q$  простым соотношением  $PE = 1 - Q^2/\sigma^2$ . В частности, в работе [A63] для РБФ-модели геосинхронного поля при её валидации на независимых подвыборках для 2010 и 2014гг. с числом точек ~35000 и ~46000 получены значения PE равные, соответственно, 0.76 и 0.77.

Гораздо сложнее обстоит дело с оценкой погрешности проектирования силовых линий поля между низкоширотной магнитосферой и ионосферой, а именно этот аспект чаще других интересует пользователей моделей. В работе [A19] нами был предложен метод приближённой оценки надёжности проектирования, основанный на интегрировании вдоль модельных силовых линий средних локальных угловых отклонений наблюдаемых векторов поля от модельных. Построенные диаграммы широтных и долготных ошибок проектирования основывались на модели T89 и, в соответствии с ожиданиями, показали, что они стремятся к нулю во внутренней магнитосфере, но существенно возрастают (до первых градусов широты) во внешней части области применимости модели.

## **11. Модели характеристик магнитосферной плазмы и их связь с моделями магнитного поля.**

С физической точки зрения, структура и динамика внешнего геомагнитного поля неотделима от характеристик магнитосферной плазмы. В МГД и кинетических моделях эти два аспекта самосогласованным образом увязаны друг с другом через единую систему уравнений, тогда как в эмпирическом подходе магнитное поле и плазма рассматриваются порознь, и возникает естественный вопрос, в какой степени их модели взаимно совместимы? В нашей работе [A28] на основе данных спутника Geotail (1994–1998гг.) была построена статистическая модель плотности, температуры и давления протонов плазменного слоя хвоста магнитосферы на удалениях от 10 до 50 $R_E$ , как функций динамического давления солнечного ветра и величины/ориентации ММП. Было показано, что в пределах погрешностей радиальные профили модельного давления согласуются с распределением поля в долях хвоста, полученным для тех же внешних условий из модели магнитного поля T96. В силу высокого перигея Geotail ( $R \approx 10R_E$ ), данное исследование не затрагивало внутреннюю магнитосферу. В более поздней работе [A41] был сделан анализ совместимости нескольких моделей магнитного поля с радиальными распределениями экваториального давления плазмы, в рамках допущения о квазистатическом балансе между силами, связанными с градиентом/анизотропией плазменного давления и магнитным натяжением, вычисленным из модельного поля. Радиальные профили давления плазмы и степени анизотропии вычислялись из имеющихся моделей магнитного поля для полуночного меридиана и показали неплохое соответствие с прямыми данными измерений на AMPTE/CSE и Geotail. В гораздо более поздней работе [A74] на основе модели SST19, оценки давления делались вплоть до геоцентрических расстояний 2–3 $R_E$  и проводились методом прямого интегрирования силы Ампера из удалённых точек по различным путям, считая давление полностью изотропным. Результаты сопоставлялись с данными анализаторов частиц на спутниках Van Allen Probes, для двух геомагнитных бурь: 13.07–15.07 2013г. и 17.03–19.03 2015г. (“Saint-Patrick” storm), с пиковыми SymH, соответственно, –75 и –220nT. В области апогеев для обеих бурь было получено удовлетворительное согласие модельного давления с данными; вблизи перигеев модель сильно зависила давление, что интерпретировалось неприменимостью изотропного приближения при  $R \leq 3-4R_E$ .

## **12. Базы экспериментальных данных и программные средства.**

Многолетние архивы спутниковых и наземных данных, хранящиеся в мировых центрах, содержат богатейшую информацию о динамике околоземной среды в широчайшем спектре состояний магнитосферы и являются основным источником экспериментальных сведений для создания эмпирических моделей. Подавляющая часть данных для наших исследований была получена в последние десятилетия из

архива CDAWEB мирового центра NSSDC и включает в себя как магнитосферные измерения разных лет с десятков спутников, так и данные мониторов солнечного ветра и наземные индексы активности с серверов базы OMNI. Магнитосферные данные сильно различаются временным разрешением; в первых сформированных и использованных нами базах [A14] оно варьировало в пределах от 10–25 минут; позднее был принят 5-минутный стандарт, примерно соответствующий пределу точности временного пересчёта межпланетных параметров из точки L1 к лобовой точке магнитосферы и порядку временного разрешения моделей. Исходные же данные отдельных миссий имеют гораздо более высокое разрешение, от периода вращения спутника (первые секунды), до десятых долей секунды (напр., MMS или RBSP). Обычные процедуры подготовки наборов данных для моделирования включают в себя удаление главной части поля из полных векторов, пересчёт в необходимую систему координат и осреднение по 5-минутным интервалам. Данные по эфемеридам спутников часто предоставляются отдельно, с гораздо более низким временным разрешением; тогда слияние с исходными данными по полю проводится квадратичной или кубичной интерполяцией, чтобы обеспечить необходимую точность вычитания вклада земных источников вблизи перигеев. Редактирование данных осуществляется последовательным просмотром суточных вариаций компонент магнитосферного поля, положения спутника и параметров солнечного ветра, с вырезанием дефектных интервалов. К настоящему времени имеющиеся у нас базы данных включают в себя порядка  $\sim 10^7$  5-минутных записей магнитосферного поля и около  $\sim 3 \cdot 10^6$  записей межпланетных параметров. Для их создания, а также для тестирования и визуализации моделей, автором уже давно разработан и систематически обновляется пакет фортран-подпрограмм, известный как Georack-2008; см. <https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>. На этом же сайте выложены модельные программные средства, реализующие описанные здесь разработки; см. также <https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/empirical-models/>.

### **13. Вековой дрейф аврорального овала в свете магнитосферных моделей.**

Одним из интересных приложений моделей магнитосферного магнитного поля явился недавний анализ векового смещения овала полярных сияний за истекшие полвека [A72], выполненный с использованием модели TA15 для внешней части поля и набора моделей IGRF для эпох с 1965 по 2020г. Мотивом к данной работе послужило неожиданно быстрое смещение северного магнитного полюса, точнее, точки с нулевой горизонтальной компонентой главной части поля с севера Канады в сторону моря Лаптевых, обнаруженное в последнее десятилетие и породившее слухи в СМИ о предстоящем аналогичном смещении аврорального овала на север российской Сибири. Сделанные нами расчёты показали, что (а) фактически дрейф овала сияний много меньше, чем можно было бы заключить из смещения полюса и (б) пресловутый «спурт» магнитного полюса относится только к точке на земной поверхности со строго вертикальной ориентацией поля (т. н. «dip pole») и вызван вековой эволюцией высших недипольных гармоник в IGRF-разложении, чей вклад

в общее поле велик только на малых высотах, но лишь незначительно сказывается на положении овала сияний.

#### **14. Моделирование магнитосфер других планет (Меркурия) на основе опыта с земной магнитосферой.**

Все планеты солнечной системы, обладающие магнитным полем с существенной величиной низших гармоник, имеют собственные магнитосферы, размер которых варьирует в широких пределах, в зависимости от величины магнитного момента и давления солнечного ветра, определяемого расстоянием планеты от Солнца. При наличии достаточного объёма спутниковых данных, разработанные нами методы эмпирического моделирования геомагнитосферы применимы и для магнитосфер других планет, при надлежащем масштабировании модельных параметров. Одна из первых таких попыток [A22] была основана на модификации модели T96 для анализа данных пролёта Mariner 10 через магнитосферу Меркурия и имела целью предложить интерпретацию наблюдаемых быстрых вариаций магнитного поля как следствие прямого проникновения ММП, в противовес гипотезе суббуревого их происхождения. В преддверии запуска аппарата MESSENGER в 2004г. с помощью ранних данных Mariner 10 и масштабированной модели T96 в [A31] была сделана оценка ожидаемой точности расчётов главной части магнитного поля Меркурия, а после успешного выведения аппарата на орбиту вокруг планеты и накопления нужного объёма данных открылась возможность создать эмпирическую модель её магнитосферы. Модульная база была разработана в [A52] по ранее созданным нами прототипам для земных моделей. Именно, экваториальная токовая система была построена из токового диска, аналогичного моделям [A13, A33], и более протяжённого слоя на основе обобщённого вектор-потенциала для модели типа Харриса [12]. Поле токов магнитопаузы было задано для каждого из модулей в виде набора «коробочных» гармоник, экранирующих поле внутренних источников на границе и полностью аналогичных используемым в моделях земной магнитосферы [A44]. Модель была использована для анализа низковысотных данных MESSENGER, полученных на последних витках перед гибелью аппарата в апреле 2015г. В результате работы была выявлена остаточная намагниченность коры Меркурия [A51] и установлен возраст её формирования. В последней работе из этой серии [A61] был построен уточнённый вариант модели магнитосферы Меркурия, учитывающий вариации динамического давления солнечного ветра вследствие эксцентricности орбиты планеты.

## **Основные положения, выносимые автором на защиту:**

Создано новое направление солнечно-земных исследований: «Эмпирическое моделирование магнитосферы на основе многолетних архивных данных», воплощённое в нижеследующих результатах:

1. Построена серия эмпирических моделей магнитосферы Земли с модульной архитектурой, широко используемых международным сообществом специалистов по космической геофизике на протяжении более трёх десятилетий [A1, A5, A6, A17, A26, A27, A33, A46, A55].
2. Предложены и воплощены в конкретных моделях новые немодульные методы описания магнитосферы с переменной степенью разрешения и возможностью локальной фокусировки на отдельных областях [A57, A60, A63, A64, A66, A68, A75–A77]. Сформулирован и реализован гибридный подход, объединяющий модульную архитектуру модельного магнитного поля и его формальное описание с высоким пространственным разрешением [A62, A79].
3. Разработаны и воплощены в конкретных моделях методы их параметризации геоэффективными драйверами и индексами наземной активности, включая
  - (а) «универсальный» подход с заданной формой управляющих параметров [A27, A33, A35, A55, A60, A63, A68] и
  - (б) метод «ближайших соседей», ориентированный на моделирование конкретных событий [A38, A42, A45, A56, A67, A70, A73, A74, A76, A77, A79].
4. Разработаны методы и модели, описывающие деформации магнитосферных структур, связанных с наклонами геодиполя и азимутальной компонентой ММП [A23, A30, A49, A50]. Предложено объяснение чашеобразной деформации токового слоя в магнитосферах Сатурна и Земли [A49].
5. На базе созданного нами арсенала методов, исследована магнитная структура дневных полярных каспов, включая диамагнитную депрессию, её зависимость от внешних и внутренних факторов и проникновение азимутальной компоненты ММП в каспы [A24, A40, A64, A66].
6. С помощью эмпирической модели магнитосферы получена оценка скорости сдвига авроральных зон в сравнении с вековым дрейфом геомагнитных полюсов. Опровергнуты слухи о скором перемещении северного овала полярных сияний на территорию северной Сибири [A72].
7. На базе данных спутника Geotail построена статистическая модель характеристик плазмы в хвосте магнитосферы как функций параметров межпланетной среды [A28]. Предложен метод реконструкции (анизотропного) давления плазмы из моделей поля по распределению тензора магнитных сил [A41].

8. В сотрудничестве с зарубежными коллегами осуществлено моделирование магнитосферы Меркурия по данным спутника MESSENGER, позволившее выявить остаточную намагниченность коры планеты и оценить возраст её формирования [A51, A52, A61].

9. Разработаны и периодически обновляются вебсайты с описанием эмпирических моделей магнитосферы, предоставляемых научному сообществу в виде фортран-программ, включая популярный с давних пор пакет Georack-2008:

<https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>

<https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/empirical-models/>

### Список публикаций автора в хронологическом порядке

A1. **Tsyganenko, N. A.**, Usmanov, A. V. (1982), Determination of the magnetospheric current system parameters and development of experimental geomagnetic field models based on data from IMP and HEOS satellites, *Planetary and Space Science*, v.30, pp.985–998, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90148-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90148-9).

A2. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (1982), Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model, *Planetary and Space Science*, v.30, pp.985–998, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90149-0).

A3. **Tsyganenko, N. A.**, Usmanov, A. V. (1984), Effects of the dayside field-aligned currents in location and structure of polar cusps, *Planetary and Space Science*, v.32, pp.97–104, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(84\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(84)90045-X).

A4. Popielawska, B., Szalinska-Piechota, E., **Tsyganenko, N. A.** (1985), On the non-adiabatic particle scattering in the Earth's magnetotail current sheet, *Planetary and Space Science*, v.33, pp.1433–1437, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(85\)90118-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90118-7).

A5. **Tsyganenko, N. A.** (1987), Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels, *Planetary and Space Science*, v.35(11), pp. 1347–1358, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90046-8).

A6. **Tsyganenko, N. A.** (1989), A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet, *Planetary and Space Science*, v.37(1), pp. 5–20, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90066-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90066-4).

A7. **Tsyganenko, N. A.** (1989), A solution of the Chapman-Ferraro problem for an ellipsoidal magnetopause, *Planetary and Space Science*, v.37(9), pp. 1037–1046, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90076-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90076-7).



- A8. **Tsyganenko, N. A.** (1990), Quantitative models of the magnetospheric magnetic field: Methods and results, *Space Science Reviews*, v.54, 75–186, <https://doi.org/10.1007/BF00168021>.
- A9. **Tsyganenko, N. A.** (1991), Methods for quantitative modeling of the magnetic field from Birkeland currents, *Planetary and Space Science*, v.39(4), pp. 641–654, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(91\)90058-I](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90058-I).
- A10. **Tsyganenko, N. A.** (1993), A global analytical representation of the magnetic field produced by the Region 2 Birkeland currents and the partial ring current, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.98(4), pp.5677–5690, <https://doi.org/10.1029/92JA02002>.
- A11. Peredo, M., Stern, D. P., **Tsyganenko, N. A.** (1993), Are existing magnetospheric models excessively stretched? *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.98(9), pp.15343–15354, <https://doi.org/10.1029/93JA01150>.
- A12. **Tsyganenko, N. A.**, Stern, D. P., Kaymaz, Z. (1993), Birkeland currents in the plasma sheet, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.98(11), pp.19455–19464, <https://doi.org/10.1029/93JA01922>.
- A13. **Tsyganenko, N. A.**, Peredo, M. (1994), Analytical models of the magnetic field of disk-shaped current sheets, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(1), pp.199–205, <https://doi.org/10.1029/93JA02768>.
- A14. Fairfield, D. H., **Tsyganenko, N. A.**, Usmanov, A. V., Malkov, M. V. (1994), A large magnetosphere magnetic field database, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(6), pp.11319–11326, <https://doi.org/10.1029/94JA00255>.
- A15. Sotirelis, T., **Tsyganenko, N. A.**, Stern, D. P. (1994), Method for confining the magnetic field of the cross-tail current inside the magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(10), p.19393–19402, <https://doi.org/10.1029/94JA01656>.
- A16. Sergeev, V. A, Pulkkinen, T., Pellinen, R., **Tsyganenko, N. A.** (1994), Hybrid state of the tail magnetic configuration during steady convection events, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(12), pp.23571–23582, <https://doi.org/10.1029/94JA01980>.
- A17. **Tsyganenko, N. A.** (1995), Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.100(4), pp.5599–5612, <https://doi.org/10.1029/94JA03193>.

A18. **Tsyganenko, N. A.**, Stern, D. P. (1996), Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.101(12), pp.27187–27198, <https://doi.org/10.1029/96JA02735>.

A19. Pulkkinen, T. I., **Tsyganenko, N. A.** (1996), Testing the accuracy of magnetospheric model field line mapping, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.101(12), pp.27431–27442, <https://doi.org/10.1029/96JA02489>.

A20. **Tsyganenko, N. A.** (1997), An empirical model of the substorm current wedge, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.102(9), pp.19935–19941, <https://doi.org/10.1029/97JA01904>.

A21. **Tsyganenko, N. A.**, Karlsson, S. B. P., Kokubun, S., Yamamoto, T., Lazarus, A. J., Ogilvie, K. W., Russell C. T., Slavin, J. A. (1998), Global configuration of the magnetotail current sheet as derived from Geotail, Wind, IMP 8 and ISEE 1/2 data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.103(4), pp.6827–6841, <https://doi.org/10.1029/97JA03621>.

A22. Luhmann, J. G., Russell, C. T., **Tsyganenko, N. A.** (1998), Disturbances in Mercury's magnetosphere: Are the Mariner 10 “substorms” simply driven? *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.103(5), p.9113–9119, <https://doi.org/10.1029/97JA03667>.

A23. **Tsyganenko, N. A.** (1998), Modeling of twisted/warped magnetospheric configurations using the general deformation method, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.103(10), pp.23551–23563, <https://doi.org/10.1029/98JA02292>.

A24. **Tsyganenko, N. A.**, Russell, C. T. (1999), Magnetic signatures of the distant polar cusps: Observations by Polar and quantitative modeling, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.104(11), pp.24939–24955, <https://doi.org/10.1029/1999JA900279>.

A25. **Tsyganenko, N. A.** (2000), Modeling the inner magnetosphere: The asymmetric ring current and Region 2 Birkeland currents revisited, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.105(12), pp.27739–27754, <https://doi.org/10.1029/2000JA000138>.

A26. **Tsyganenko, N. A.** (2002), A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 1. Mathematical structure, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.107(8), pp.SMP 12-1-SMP 12-15, <https://doi.org/10.1029/2001JA000219>.

A27. **Tsyganenko, N. A.** (2002), A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 2. Parameterization and fitting to observations, *Journal of Geophysical*

*Research Space Physics*, v.107(8), pp.SMP 10-1-SMP 10-17,  
<https://doi.org/10.1029/2001JA000220>.

A28. **Tsyganenko, N. A.**, Mukai, T. (2003), Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.108(3),  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009707>.

A29. **Tsyganenko, N. A.**, Singer, H. J., Kasper, J. C. (2003), Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.108(5), <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>.

A30. **Tsyganenko, N. A.**, Fairfield, D. H. (2004), Global shape of the magnetotail current sheet as derived from Geotail and Polar data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.109(3), <https://doi.org/10.1029/2003JA010062>.

A31. Korth, H., Anderson, B. J., Acuna, M. H., Slavin, J. A., **Tsyganenko, N. A.**, Solomon, S. C., McNutt, R. L. (2004), Determination of the properties of Mercury's magnetic field by the MESSENGER mission, *Planetary and Space Science*, v.52(8), pp.733–746, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2003.12.008>.

A32. Ostgaard, N., **Tsyganenko, N. A.**, Mende, S. B., Frey, H. U., Immel, T. J., Fillingim, M., Frank, L. A., Sigwarth, J. B. (2005), Observations and model predictions of substorm auroral asymmetries in the conjugate hemispheres, *Geophysical Research Letters*, v.32(5), <https://doi.org/10.1029/2004GL022166>.

A33. **Tsyganenko, N. A.**, and Sitnov, M. I. (2005), Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.110 (A3), A03208, <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>.

A34. Sazykin, S., Spiro, R. W., Wolf, R. A., Toffoletto, F. R., **Tsyganenko, N. A.**, Goldstein, J., Hairston, M. R. (2005), Modeling inner magnetospheric electric fields: Latest self-consistent results, in: *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*, AGU Geophysical Monograph Series, v.155, Eds. T. I. Pulkkinen, N. A. Tsyganenko, & R. H. W. Friedel, <https://doi.org/10.1029/155gm28>.

A35. Qin, Z., Denton, R. E., **Tsyganenko, N. A.**, Wolf, S. (2007), Solar wind parameters for magnetospheric magnetic field modeling, *Space Weather*, v.5(11),  
<https://doi.org/10.1029/2006SW000296>.

A36. **Tsyganenko, N. A.**, Sitnov, M. I. (2007), Magnetospheric configurations from a high-resolution data-based magnetic field model, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 112(A6), A06225, <https://doi.org/10.1029/2007JA012260>.

- A37. Huang, C.-L., Spence, H. E., Singer, H. J., **Tsyganenko, N. A.** (2008), A quantitative assessment of empirical magnetic field models at geosynchronous orbit during magnetic storms, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 113(4), A04208, <https://doi.org/10.1029/2007JA012623>.
- A38. Sitnov, M. I., **Tsyganenko, N. A.**, Ukhorskiy, A. Y., Brandt, P. C. (2008), Dynamical data-based modeling of the storm-time geomagnetic field with enhanced spatial resolution, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.113(7), A07218, <https://doi.org/10.1029/2007JA013003>.
- A39. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Angelopoulos, V. (2008), Dynamical response of the magnetotail to changes of the solar wind direction: an MHD modeling perspective, *Annales Geophysicae*, v.26, pp.2395–2402, <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2395-2008>.
- A40. **Tsyganenko, N. A.** (2009), Magnetic field and electric currents in the vicinity of polar cusps as inferred from Polar and Cluster data, *Annales Geophysicae*, v.27, pp.1573–1582, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1573-2009>.
- A41. **Tsyganenko, N. A.** (2010), On the reconstruction of magnetospheric plasma pressure distributions from empirical geomagnetic field models, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.115(7), A07211, <https://doi.org/10.1029/2009JA015012>.
- A42. Sitnov, M. I., **Tsyganenko, N. A.**, Ukhorskiy, A. Y., Anderson, B. J., Korth, H., Lui, A. T. Y., Brandt, P. C. (2010), Empirical modeling of a CIR-driven magnetic storm, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.115(7), A07231, <https://doi.org/10.1029/2009JA015169>.
- A43. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Smirnov, M. V., Nikolaev, A. V., Singer, H. J., Baumjohann, W. (2011), Magnetic effects of the substorm current wedge in a “spread-out wire” model and their comparison with ground, geosynchronous, and tail lobe data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.116(7), A07218, <https://doi.org/10.1029/2011JA016471>.
- A44. **Tsyganenko, N. A.** (2013), Data-based modelling of the Earth’s dynamic magnetosphere: a review, *Annales Geophysicae*, v.31, pp.1745–1772, <https://doi.org/10.5194/angeo-31-1745-2013>.
- A45. Stephens, G. K., Sitnov, M. I., Kissinger, J., **Tsyganenko, N. A.**, McPherron, R. L., Korth, H., Anderson, B. J. (2013), Empirical reconstruction of storm time steady magnetospheric convection events, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.118(10), pp.6434–6456, <https://doi.org/10.1002/jgra.50592>.

A46. **Tsyganenko, N. A.** (2014), Data-based modeling of the geomagnetosphere with an IMF-dependent magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.119(1), pp.335–354, <https://doi.org/10.1002/2013JA019346>.

A47. Sergeev, V. A., Nikolaev, A. V., **Tsyganenko, N. A.**, Angelopoulos, V., Runov, A. V., Singer, H. J., Yang, J. (2014), Testing a two-loop pattern of the substorm current wedge (SCW2L), *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.119(2), pp.947–963, <https://doi.org/10.1002/2013JA019629>.

A48. Sergeev, V. A., Nikolaev, A. V., Kubyshkina, M. V., **Tsyganenko, N. A.**, Singer, H. J., Rodriguez, J. V., Angelopoulos, V., Nakamura, R., Milan, S. E., Coxon, J. C., Anderson, B. J., Korth, H. (2014), Event study combining magnetospheric and ionospheric perspectives of the substorm current wedge modeling, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.119(12), pp.9714–9728, <https://doi.org/10.1002/2014JA020522>.

A49. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., On the “bowl-shaped” deformation of planetary equatorial current sheets (2014), *Geophysical Research Letters*, v.41(4), pp.1079–1084, <https://doi.org/10.1002/2014GL059295>.

A50. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Gordeev, E. I. (2015), Internally and externally induced deformations of the magnetospheric equatorial current as inferred from spacecraft data, *Annales Geophysicae*, v.33(1), pp.1–11, <https://doi.org/10.5194/angeo-33-1-2015>.

A51. Johnson, C. L., Phillips, R. J., Purucker, M. E., Anderson, B. J., Byrne, P. K., Denevi, B. W., Feinberg, J. M., Hauck, S. A., Head, J. W., Korth, H., James, P. B., Mazari-co, E., Neumann, G. A., Philpott, L. C., Siegler, M. A., **Tsyganenko, N. A.**, Solomon, S. C., (2015), Low-altitude magnetic field measurements by MESSENGER reveal Mercury’s ancient crustal field, *Science*, v.348(6237), <https://doi.org/10.1126/science.aaa8720>.

A52. Korth, H., **Tsyganenko, N. A.**, Johnson, C. L., Philpott, L. C., Anderson, B. J., Al Asad, M. M., Solomon, S. C., McNutt, R. L. (2015), Modular model for Mercury’s magnetospheric magnetic field confined within the average observed magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.120(6), pp.4503–4518, <https://doi.org/10.1002/2015JA021022>.

A53. Kubyshkina, M., **Tsyganenko, N.**, Semenov, V., Kubyshkina, D., Partamies, N., Gordeev, E. (2015), Further evidence for the role of magnetotail current shape in substorm initiation, *Earth, Planets and Space*, v.67:139, <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0304-1>.

- A54. Nikolaev, A. V., Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Kubyshkina, M. V., Opge-noorth, H., Singer, H., Angelopoulos, V. (2015), A quantitative study of magnetospheric magnetic field line deformation by a two-loop substorm current wedge, *Annales Geophysicae*, v.33(4), pp.505–517, <https://doi.org/10.5194/angeo-33-505-2015>.
- A55. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., (2015), A forecasting model of the magnetosphere driven by an optimal solar wind coupling function, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.120(10), pp.8401–8425, <https://doi.org/10.1002/2015JA021641>.
- A56. Stephens, G. K., Sitnov, M. I., Ukhorskiy, A. Y., Roelof, E. C., **Tsyganenko, N. A.**, Le, G. (2016), Empirical modeling of the storm time innermost magnetosphere using Van Allen Probes and THEMIS data: Eastward and banana currents, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(1), pp.157–170, <https://doi.org/10.1002/2015JA021700>.
- A57. Andreeva, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (2016), Reconstructing the magnetosphere from data using radial basis functions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(3), pp.2249–2263, <https://doi.org/10.1002/2015JA022242>.
- A58. Samsonov, A. A., Gordeev, E., **Tsyganenko, N. A.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., Simunek, J., Sibeck, D. G., Toth, G., Merkin, V. G., Raeder, J. (2016), Do we know the actual magnetopause position for typical solar wind conditions? *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(7), pp.6493–6508, <https://doi.org/10.1002/2016JA022471>.
- A59. Shukhtina, M. A., Gordeev, E. I., Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Clausen, L. B. N., Milan, S. E. (2016), Magnetotail magnetic flux monitoring based on simultaneous solar wind and magnetotail observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(9), pp.8821–8839, <https://doi.org/10.1002/2016JA022911>.
- A60. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2016), An empirical RBF model of the magnetosphere parameterized by interplanetary and ground-based drivers, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(11), pp.10786–10802, <https://doi.org/10.1002/2016JA023217>.
- A61. Korth, H., Johnson, C. L., Philpott, L., **Tsyganenko, N. A.**, Anderson, B. J. (2017), A dynamic model of Mercury’s magnetospheric magnetic field, *Geophysical Research Letters*, v.44(20), pp.10147–10154, <https://doi.org/10.1002/2017GL074699>.
- A62. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2017), A hybrid approach to empirical magnetosphere modeling, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.122(8), pp.8198–8213, <https://doi.org/10.1002/2017JA024359>.
- A63. Andreeva, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (2018), Empirical modeling of the quiet and storm time geosynchronous magnetic field, *Space Weather*, v.16(1), pp.16–36, <https://doi.org/10.1002/2017SW001684>.

- A64. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Building the magnetosphere from magnetic bubbles (2018), *Geophysical Research Letters*, v.45(13), pp.6382–6389, <https://doi.org/10.1029/2018GL078714>.
- A65. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Angelopoulos, V., Runov, A. V., Singer, H. (2018), Magnetotail configuration during a steady convection event as observed by low-altitude and magnetospheric spacecraft, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.123(10), pp.8390–8406, <https://doi.org/10.1029/2018JA025867>.
- A66. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2018), Empirical modeling of dayside magnetic structures associated with polar cusps, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.123(11), pp.9078–9092, <https://doi.org/10.1029/2018JA025881>.
- A67. Stephens, G. K., Sitnov, M. I., Korth, H., **Tsyganenko, N. A.**, Ohtani, S., Gkioulidou, M. (2019), Global empirical picture of magnetospheric substorms inferred from multimission magnetometer data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(2), pp.1085–1110, <https://doi.org/10.1029/2018JA025843>.
- A68. Andreeva, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (2019), Empirical modeling of the geomagnetosphere for SIR and CME-driven magnetic storms, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(7), pp.5641–5662, <https://doi.org/10.1029/2018JA026008>.
- A69. Kubyshkina, M., Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Zheng, Y. (2019), Testing efficiency of empirical, adaptive, and global MHD magnetospheric models to represent the geomagnetic field in a variety of conditions, *Space Weather*, v.17(5), pp.672–686, <https://doi.org/10.1029/2019SW002157>.
- A70. Sitnov, M. I., Stephens, G. K., **Tsyganenko, N. A.**, Miyashita, Y., Merkin, V. G., Motoba, T., Ohtani, S., Genestreti, K. J. (2019), Signatures of nonideal plasma evolution during substorms obtained by mining multimission magnetometer data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(11), pp.8427–8456, <https://doi.org/10.1029/2019JA027037>.
- A71. Chen, W., Wang, X., **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Semenov, V. S. (2019), Reconstruction of local magnetic structures by a modified radial basis function method, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(12), pp.10141–10152, <https://doi.org/10.1029/2019JA027078>.
- A72. **Tsyganenko, N. A.**, Secular drift of the auroral ovals: How fast do they actually move? (2019), *Geophysical Research Letters*, v.46(6), pp.3017–3023, <https://doi.org/10.1029/2019GL082159>.
- A73. Sitnov, M. I., Stephens, G. K., **Tsyganenko, N. A.**, Korth, H., Roelof, E. C., Brandt, P. C., Merkin, V. G., Ukhorskiy, A. Y. (2020), Reconstruction of extreme geo-

magnetic storms: Breaking the data paucity curse, *Space Weather*, v.18(10), e2020SW002561, <https://doi.org/10.1029/2020SW002561>.

A74. Stephens, G. K., Bingham, S. T., Sitnov, M. I., Gkioulidou, M., Merkin, V. G., Korth, H., **Tsyganenko, N. A.**, Ukhorskiy, A. Y. (2020), Storm time plasma pressure inferred from multimission measurements and its validation using Van Allen Probes particle data, *Space Weather*, v.18(12), e2020SW002583, <https://doi.org/10.1029/2020SW002583>.

A75. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2020), Magnetospheric “penetration” of IMF By viewed through the lens of an empirical RBF modeling, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.125(1), e2019JA027439, <https://doi.org/10.1029/2019JA027439>.

A76. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., (2021), Reconstruction of magnetospheric storm-time dynamics using cylindrical basis functions and multi-mission data mining, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.126(2), e2020JA028390, <https://doi.org/10.1029/2020JA028390>.

A77. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., Stephens, G. K., Gjerloev, J. W., Chu, X., Troshichev, O. A. (2021), Reconstructing substorms via historical data mining: Is it really feasible? *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.126(10), e2021JA029604, <https://doi.org/10.1029/2021JA029604>.

A78. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Kubyshkina, M. V., Sitnov, M. I., Stephens, G. K. (2021), Data-Based Modeling of the Earth’s Magnetic Field, in: *Space Physics and Aeronomy Collection Volume 2: Magnetospheres in the Solar System, Geophysical Monograph 259*, American Geophysical Union, Wiley & Sons, Inc., <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch39>.

A79. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., Stephens (2022), Magnetosphere distortions during the “satellite killer” storm of February 3–4, 2022, as derived from a hybrid empirical model and archived data mining *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.127(12), e2022JA031006, <https://doi.org/10.1029/2022JA031006>.

A80. **Tsyganenko N. A.** (2022), A lifetime with models, or toils and thrills of number crunching, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9:934216, <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.934216>.

## Список других цитированных выше статей

1. Mead, G. D., Fairfield, D. H. (1975), A quantitative magnetospheric model derived from spacecraft magnetometer data, *Journal of Geophysical Research*, v.80(4), pp.523–534, <https://doi.org/10.1029/JA080i004p00523>.



2. Boberg, P. R., Tylka, A. J., Adams Jr., J. H., Flueckiger, E. O., Kobel, E. (1995), Geomagnetic transmission of solar energetic protons during the geomagnetic disturbances of October 1989, *Geophysical Research Letters*, v.22(9), pp.1133–1136, <https://doi.org/10.1029/95GL00948>.
3. Abt, H. A. (2000). The most frequently cited astronomical papers published during the past decade. *Bull. Am. Astronomical Soc.*, v.32, pp. 937, <https://adsabs.harvard.edu/full/2000BAAS...32..937A>.
4. Stern, D. P. (1987), Tail modeling in a stretched magnetosphere: 1. Methods and transformations *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.92(5), pp.4437–4448, <https://doi.org/10.1029/JA092iA05p04437>.
5. Lui, A. T. Y., Hamilton, D. C. (1992), Radial profiles of quiet time magnetospheric parameters, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.97(12), pp.19325–19332, <https://doi.org/10.1029/92JA01539>.
6. Alexeev, I. I., Shabansky, V. P. (1972), A model of a magnetic field in the geomagnetosphere, *Planetary and Space Science*, v.20(1), pp.117–133, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(72\)90146-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(72)90146-8).
7. Voigt, G.-H. (1981), A mathematical magnetospheric field model with independent physical parameters, *Planetary and Space Science*, v.29(1), pp.1–20, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(81\)90134-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90134-3).
8. Schulz, M., McNab, M. (1987), Source-surface model of the magnetosphere, *Geophysical Research Letters*, v.14(3), pp.182–185, <https://doi.org/10.1029/GL014i003p00182>.
9. Lin, R. L., Zhang, X. X., Liu, S. Q., Wang, Y. L., Gong, J. C. (2010), A three-dimensional asymmetric magnetopause model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.115(4), A04207, <https://doi.org/10.1029/2009JA014235>.
10. Armstrong, J. C., Zmuda, A. J., (1970), Field-aligned current at 1100 km in the auroral region measured by satellite, *Journal of Geophysical Research*, v.75(34), pp.7122–7127, <https://doi.org/10.1029/JA07i034p07122>.
11. Arridge, C. S., Khurana, K. K., Russell, C. T., Southwood, D. J., Achilleos, N., et al. (2008), Warping of Saturn’s magnetospheric and magnetotail current sheets, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.113(8), A08217, <https://doi.org/10.1029/2007JA012963>.

12. Harris, E. G. (1962), On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field, *Nuovo Cimento*, v.23(1), pp.115–121, <https://doi.org/10.1007/BF02733547>.
13. McCollough, J. P., Gannon, J. L., Baker, D. N., Gehmeyr, M. (2008), A statistical comparison of commonly used external magnetic field models, *Space Weather*, v.6, S10001, <https://doi.org/10.1002/2008SW000391>.

SAINT PETERSBURG STATE UNIVERSITY

*Manuscript copy*

Tsyganenko Nikolai Alekseevich

MODELING OF THE MAGNETOSPHERE BASED ON MULTI-YEAR  
ARCHIVES OF SPACE AND GROUND-BASED DATA

Science specialization  
1.3.1. Space Physics, Astronomy

Scientific report for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Translation from Russian

Saint Petersburg

2023

## **Introduction**

Magnetic field is a fundamental factor determining the structure and properties of the Universe from subatomic to interstellar scales. In the near-Earth space, disturbances on the Sun and in the interplanetary medium are accompanied with the geomagnetic field restructuring, accumulation and explosive release of its energy, anomalous heating of the upper atmosphere, particle acceleration in the radiation belts, polar aurora, geomagnetically induced currents, and a number of other phenomena, unified by the term “space weather”. In view of rapidly and steadily growing role of satellite technologies, understanding, modeling, and forecasting the state of terrestrial magnetosphere becomes an increasingly urgent task.

During the last half century, two prevailing approaches to the geomagnetosphere modeling have been developed. The first one is based on supercomputer numerical solutions magnetohydrodynamic (MHD) and kinetic plasma problems; its success is directly driven by advances of computing technologies. The second approach – the empirical modeling – is based on the already accumulated and continuing to rapidly increase amounts of multi-year archives of data of measurements in the magnetosphere, in the solar wind, and on the Earth’s surface. Both approaches have their own pluses and minuses; an advantage of the global MHD simulations is that they are based on first principles of physics and model both the magnetic field and plasma dynamics, while their deficiencies are related to problems of numerical diffusion in the solutions, inclusion of the plasma conductivity, and particle drifts in the inner magnetosphere. The empirical models, by contrast, are based on direct measurements, with the final goal to reproduce the actually observed, rather than the simulated magnetosphere, but the problem is complicated by the temporal diversity and non-uniformity of archived data: in the entire gigantic space of the magnetosphere, observations are carried out by no more than ten satellites, while one needs a whole constellation of many hundreds of spacecraft, to be able to accurately reconstruct its “instantaneous” configuration. One cannot help but note a striking contrast with the terrestrial weather forecasting, in which computer simulations of atmospheric dynamics are corrected in real time by data from tens of thousands of meteorological stations. For the space weather, a similar synthesis still remains beyond our reach.

## **Goals and background of this work**

Works in the area of empirical modeling reviewed in this report present a new area of solar-terrestrial studies, created by the author in collaboration with his colleagues and students: the magnetosphere modeling based on multi-year archives of satellite data. Its original impetus was the appearance in 1975 of an empirical model by Mead and Fairfield [1], based on data of IMP satellites in the form of an extremely simple description of the external part of the magnetic field for four levels of ground disturbance. In their calculations, the magnetospheric deformation was explored as a function of the

geomagnetic activity, but without any detalization of its internal structure and with no relation to the state of interplanetary medium.

In early 1980s, the author set up a goal to develop mathematical representations for the magnetic fields of principal extraterrestrial sources, combining a sufficient computational simplicity with a flexible and realistic geometry of the current systems, put them together into a unified entity and, based on large sets of data, construct empirical models of the magnetosphere for quantitative studies of space and ground-based phenomena by the worldwide community of researchers. A brief overview is presented below of main aspects, milestones, and principal results of that work of many years, whose intermediate advances were described in reviews [A8, A44, A78, A80].

## **A brief description of the work by the candidate and its outcome**

Development of empirical models includes the following main tasks: (1) formulation and programming implementation of a model's architecture, (2) compilation, systematization and editing of experimental databases, (3) conception and implementation of methods of the model parameterization by external drivers and ground-based indices, and (4) testing and further improvement of the models, both at their creation phase, as well as on the basis of later experience and users' comments. The candidate's work is overviewed below, roughly in line with these four aspects, starting from the issue of model architecture. In addition, a brief synopsis is given of the author's works in the field of using the models, in particular, their applications for modeling other planetary magnetospheres (of Mercury), as well as development of computer codes for the modeling studies.

### **1. Mathematical representation of the field of magnetospheric tail current sheet.**

The magnetospheric tail currents extend from nearly the geosynchronous orbit ( $R \sim 7R_E$ ) up to hundreds of Earth's radii down the solar wind stream; like the magnetopause, they are the largest-scale current system. For that reason, still at the early stage of our work it was paid the most attention. Since the Earth's magnetic moment is on the average normal to the solar wind flow and the tail current sheet resides around the equatorial plane, a problem was set to create a compact and flexible analytical model of the planar current sheet with a finite thickness and variable radial profile of the current density. First surveys resulted in finding sufficiently simple variants that were laid in the base of early TU82 and T87 models [A1, A5, A11]. The best model from that family [A6] was built by solving Ampere's equation for the vector potential of a current disk using a double integral transformation. The most valuable and unexpected finding was the utmost simplicity of the solution and its generalization for the case of finite sheet thickness and different rates of the current decrease down the magnetospheric tail. Because of that, the model got a wide circulation in studies that needed fast numerical algorithms such as, for example, mass calculations of the solar cosmic rays [2] or in the evaluation of isotropic boundaries of non-adiabatic scattering of energetic particles on the current sheets

[A2, A4, A16, A65]. As of this moment, the paper [A6] with the T89 model description has 1413 citations and, in due time [3], was included in the list of 100 most cited papers in astrophysics. In [A13], a further generalization of the method was suggested, which extended the family of radial current profiles and was used in the development of next T96 [A17, A18] and TS05 [A33] models. Even later [A36] the whole approach was cardinally generalized: by introducing azimuthal Fourier harmonics, the axial symmetry limitation was lifted, while the integral convolution in the radial direction was replaced with a discrete expansion in wave numbers, which lent to the model an unlimited (in theory) degree of radial and longitudinal resolution. Based on that, new-generation TS07D and SST19 models [A38, A70] were developed, which used a dynamic selection of archived data to extract maximum information on the magnetosphere evolution in specific events.

In the last of the models of that kind TA15 [A55], the tail field sources were represented by a current sheet, composed of a set of overlapping rings with finite thickness with a variable rate of the current decrease in the antisunward direction, location of the inner edge of the sheet and its thickness as a function of coordinates. All the above models took into account the current sheet distortion in the course of seasonal-diurnal variations of the geodipole tilt to the terminator plane, by means of a two-fold transformation of the original undistorted configuration, using a method of divergenceless magnetic field deformation [4, A23], described below in sections 4–5.

## **2. Modeling the field of symmetric and partial ring currents.**

The ring current, composed of its symmetric and partial (asymmetric) component, as well as the tail currents, is one of principal sources of the low-latitude magnetic depression in the inner magnetosphere, which is roughly equal to  $-20$  nT in quiet conditions and deepens down by tens and hundreds of nT during the main phase of geomagnetic storms. In an utmost compact form, its contribution was included in the TU82, T87, and T89 models [A1, A5, A6] as a modification of the point dipole vector potential, which converts the dipole field into that of a diffuse current ring with a variable radius. However, since the real ring current is asymmetric in longitude and partially bifurcates into the ionosphere by field-aligned currents, a need to develop a more advanced model became evident. Such a model was created in [A25], following the approach [A10] and based on the radial profiles of plasma pressure and anisotropy obtained from AMPTE-CCE satellite data [5]. Using an assumption of a dipolar background magnetic field and a bi-Maxwellian distribution function of trapped particles, volume current density distributions were calculated for the asymmetric ring current, including both the azimuthal currents at low latitudes and their closure field-aligned currents. The quantitative description of the magnetic field was developed separately for the symmetric and partial current. In the former case, a vector potential was calculated by integration, which was then approximated by a deformed field of two diffuse current rings, corresponding to the inner (eastward) and outer (westward) part of the ring current. For the partial component, due to the 3D nature of the problem the solution was found by expanding the

longitudinal variation of equatorial plasma pressure into first two Fourier harmonics, which made it possible to reduce the problem to two dimensions and then find an optimal coordinate deformation that results in best agreement of the model field with that based on direct integration of volume currents by Biot-Savart. Thus constructed ring current module was included in T02 [A26, A27] and TS05 [A33] models, as well as in the most recent TA15 model of that kind [A55]. We note in passing that the representation of the circular current field developed in that work was used in [A58] for taking into account the ring current effects in an MHD calculation of the magnetopause location.

### **3. Modeling the magnetopause magnetic effects.**

The magnetopause currents have the largest spatial scale and are responsible for the formation of the entire magnetosphere, i.e., being summed up with the field of all inner sources, confine the main part of the terrestrial magnetic flux within a comet-like cavity. This fact is at the core of the magnetopause field modeling: since it is curl-free and, being combined with the field of a source to be shielded, gives rise to zero normal component at the boundary, then it can be found as a solution of Neumann's problem for a scalar potential. In early works, that problem was solved only for three axisymmetric surfaces: a paraboloid [6], an ellipsoid [A7], and a composite magnetopause [7] made of a half-sphere and a cylinder. None of them gave a satisfactory description of the magnetopause on a global scale. In a work by Schulz & McNab [8], it was suggested to abandon analytic surfaces and, having thus extended the class of boundaries, assume an approximate shielding by minimizing the magnetic flux across the magnetopause. That approach was implemented [A17] in our composite model, constructed from a half-ellipsoid in the cislunar space, smoothly extended with a cylinder into the distant tail. In later models, starting from [A46], even more advanced empirical representation of the magnetopause [9] was used, derived from its crossings by satellites and parameterized by the interplanetary magnetic field (IMF). One more problem was that the largest-scale sources of the magnetospheric field, the equatorial tail current sheet and Region 1 field-aligned currents, extend up to the magnetopause and partially contribute to the shielding currents. The difficulty was the requirement to simultaneously meet two conditions: shielding of the total field and the current closure. As was shown in [A15], the problem can be solved by any continuous extension of the current beyond the magnetosphere and, at the same time, by adding a sufficiently flexible curl-free shielding field, to minimize the flux across the boundary and, at the same time, leave the total field potential in the regions without currents (in the tail lobes). That method was repeatedly used in many problems and still remains as a principal instrument in the development of models of modular type [A17, A26, A27, A33, A36, A46, A55]; see also a review [A78].

#### **4. Modeling the magnetic field of the field-aligned current systems.**

The field-aligned currents were discovered from low-orbit satellite data in early 1970s [10]. Due to their global extension and large total magnitude (up to a few tens of MA), they play a role of the main “power transmission line” from the solar wind that initiates the convection in the magnetosphere and its response to space weather in the interplanetary medium. Empirical modeling of the field due to the field-aligned currents meets with difficulties caused by the complicated geometry and wide range of their transverse scale: from a hundred kilometers at the ionosphere up to tens of thousands and more in the magnetosphere [A12]; as a result, creation of adequate models remained for a long time as an “impregnable Carthage”. Our initial experiments in that area were focused on a search of simple current structures with a radial geometry of the current flow lines that converge/diverge above the ionosphere and, at the same time, yield a longitudinal variation of the current density close to the observed one. As a result, an analytic version of a “conical” model was obtained [A9] with a needed orientation and magnitude of the field above the polar caps and, at the same time, ensuring the independence of the northern and southern parts of the system. The first problem, however, was obviously unrealistic nature of such a model beyond the ionosphere and a prohibitively slow rate of the field decrease with growing altitude. Further investigations [A16] led us to a solution, based on the method of a divergence-free deformation of the initial field of the conical system [A26]. Deformation parameters were found by minimizing the deviation of the field from that obtained by integrating the currents over a surface, close to the dipolar shells near Earth but aligned with the tail plasma sheet boundary in the distant magnetosphere. That variant was laid in the foundation of the T02, TS05, and TS07 models [A27, A33, A36]. The divergence-free field deformation was described in detail in [4] and deserves to be separately mentioned as a powerful instrument for the empirical modeling. The method was adapted for the first time in order to take into account the terrestrial dipole tilt effects in [A23] and used for that purpose in most of subsequent models, as well as suggested for the modeling of diamagnetic field depressions in the polar cusps [A24], discussed below in section 6.

In later works, starting from TA15 [A55], the deformed conical model of field-aligned currents was replaced by a more flexible variant, first described in [A43] in application to the problem of building the substorm current system, also addressed in [A20, A47, A48, A54]. Its starting point was not the magnetic field, but current elements of finite length and variable thickness; assembling them into chains, one constructs a vector potential and magnetic field of curvilinear tubes of variable diameter. Superpositions of tens of such overlapping tubes form surfaces with a variable shape, which are then used to construct the field-aligned current models. The advantage here is that the current surface deformations, unlike the magnetic field deformations, do not give rise to artificial secondary currents and, hence, allow to greatly enhance the model flexibility. In our recent work [A66], that method was used for building a model of Region 1 field-aligned currents that took into account their overlapping on the dayside due to  $B_y$  component of IMF, which is manifested in observations as a “penetration” of  $B_y$  into the polar cusps.



Having mentioned that effect, one cannot ignore another similar phenomenon, this time in the nightside magnetosphere, where an unusually strong relation was found in [A32] between the IMF  $B_y$  and azimuthal deviation of auroral forms in magnetically conjugate locations, by an order of magnitude larger than that predicted by T96 and T02 models. Later on [A75], we explored the IMF  $B_y$  penetration into the magnetosphere using a local RBF modeling, which indeed revealed a significantly enhanced penetration of the penetrated azimuthal field in the near-equatorial part of the nightside sector.

## **5. Modeling effects associated with seasonal-diurnal variations of the Earth's magnetic axis orientation.**

The terrestrial magnetic moment axis is inclined by an angle  $\sim 10^\circ$  to the Earth's rotation axis, while that axis is offset by  $23.44^\circ$  from perpendicular to the ecliptic plane. Thus, in the course of the Earth's diurnal rotation and its annual revolution around Sun, the magnetic moment deviates from the terminator plane by the angle  $\psi$  in the range  $|\psi| \leq \pm 33^\circ$ , which results in periodical deformations of the magnetosphere. In the first models [A1, A5], that effect was taken into account by simply shifting the tail current sheet away from the equatorial plane. It was found later on that the equatorial currents are deformed in a more complex way, such that the distorted sheet takes on the form of an inclined bowl with its convex side turned toward the Sun. The bowl-like deformation was first observed in the Saturn's magnetosphere [11], and our earlier model investigations, started earlier in [A30] and continued in [A49–A50] on the basis of extended data sets, confirmed that similar deformation takes place in the terrestrial magnetosphere as well. To describe the dipole tilt effects in models, we employed the deformation method [A23], which originates from the Euler potential representation of the magnetic field [4], but is eventually reduced to a simple tensor transformation, which contains only the magnetic field components and derivatives of new coordinates by the old ones. Using that method the bowl-like deformation of the field was obtained in [A46] as a superposition of two trough-like bendings of a planar sheet around X (day-night) and Y (dawn-dusk) axes.

At the same time, in [A49] we addressed a question on the physical nature of the bowl-like deformation of equatorial currents. While the shape and orientation of the deformed sheet might be interpreted as a direct “blowing off” of the planar sheet by the solar wind stream, such a variant should be dismissed offhand, since the wind cannot penetrate in the magnetosphere. An explanation of the effect was obtained by a simple numerical experiment: using a purely vacuum model with a completely shielded tilted dipole inside a magnetopause, we explored the distribution along the field lines of the mirror ratio  $B_{\min}/B$ , which may be viewed as a local measure of the magnetic field ability to hold plasma. In spite of the total absence of internal currents in that model, the obtained diagrams were found to be surprisingly similar in their shape to the bowl-like sheet in the Saturn's magnetosphere, which prompts a simple explanation of the effect as a result of superposition of two mutually perpendicular asymmetries: (a) in the day-night direction due to the solar wind ram pressure and (b) in the North-South direction due to the tilt of the planetary dipole.

Two other effects should also be mentioned here with respect to taking into account the geodipole orientation. The first one is associated with frequent deviations of the solar wind direction from strictly radial [A21, A30, A39], which makes it necessary to include them in calculations of the effective tilt. The second effect, found independently in two works [A53, A55], is a clearly pronounced modulation by the angle  $\psi$  of the full currents flowing in all principal current systems, such that the total currents decrease by 10–20% with  $|\psi|$  growing from zero to  $30^\circ$ .

## **6. Modeling the magnetic structure of polar cusps.**

The dayside polar cusps represent a fundamental topological singularity of the magnetosphere, which appears even in the simplest models as null points with bifurcating magnetic field lines. The weakened field in the outer cusps less effectively blocks the solar wind, which results in formation of diamagnetic funnels, rather deeply penetrating into the magnetosphere. In our first experiments with local empirical modeling of the cusps based on data of IMP and HEOS satellites [A3], an investigation was conducted of their latitudinal shift and longitudinal stretching as a function of geomagnetic disturbance. In a later work [A24] based on Polar satellite data, a study was carried out of the northern cusp diamagnetic depression and a method was proposed of its quantitative description by means of the divergenceless deformation of the initial field, whose parameters were tuned up to obtain the best agreement with measurements. In the next work [A40] based on a more extensive pool of Cluster/Polar data, accumulated by that time, a detailed analysis was carried out of the spatial distribution of the depression and of the effect of “penetration” of the azimuthal  $B_y$  component of IMF inside the magnetosphere. The most interesting result of that work was a good agreement of the measured  $B_y$  penetration coefficient and its radial gradient with the model calculations, based on the notion of overlapped antiparallel field-aligned currents in the noon sector. A detailed modeling of cusp structures was also performed in recent works [A64, A66], using the piecewise-continuous model of field-aligned currents, overlapping in the vicinity of dayside cusps, and a model of diamagnetic sources, constructed as a 3D set of magnetic field deformation centers, or “magnetic bubbles”.

## **7. Models with variable spatial resolution. Local modeling.**

As already noted, the modular approach implies a number of a priori assumptions on the magnetosphere structure, which limits flexibility and accuracy of empirical models. Some time ago, those simplifications were justified by the scarcity of satellite data archives; however, their fast extension in the last years brings forth the issue of the model revision and generalization of their architecture. It was already briefly mentioned above of the new variant of the field representation in the TS07 model, where a multi-vortex system of equatorial currents was introduced. Besides the advantages, this approach is not free of drawbacks, the principal ones being the global nature of Fourier-Bessel expansions and the confinement of the system of currents within their 2D distribution

around the equatorial plane. In the works [A57, A60], we suggested to replace the modular description of the magnetospheric magnetic structure with a distributed system of partial sources, located in the nodes of a 3D grid, each of which creates a pair of magnetic fields with a toroidal and poloidal type of geometry. Generating potentials for the toro- and poloidal parts are defined as radial basis functions (RBF) which depend only on the distances between the observation point and the nodes of the 3D grid. An undoubted advantage of such an approach is its mathematical simplicity, absence of a priori assumptions on the current geometry, and also a possibility to focus the model on any subregion of space containing data, i. e., to make a local modeling. The new method was successfully implemented and tested in a number of the following works [A64, A66, A68, A71, A75–A76], including a description of the temporal evolution of low-latitude magnetic field during substorms [A77].

### **8. Hybrid modeling as a synthesis of the modular approach and method based on formal RBF expansions.**

When developing the RBF method, an idea immediately emerged to synthesize it with the modular one, in order to maximize the advantages of both approaches. In such a setting, the model field is represented as a sum of the modular and RBF components, and their free parameters are derived from data in turns using a two-step procedure: the first step is to “freeze” the RBF coefficients at zero values, while the modular parameters are fitted. At the second step, the components change their roles: the modular part is fixed, while the RBF component is derived from the residual field as a next-order correction. The efficiency of such hybrid approach was tested and confirmed in [A62] using multi-year subsets of data, selected according to their relevance to subsequent magnetospheric states in the course of a geomagnetic storm. The synthesis of the modular structures and RBF expansions not only improves the accuracy, but also significantly alleviates the limitation related to the local nature of RBF description, manifested in its divergence in the regions with too little or no data at all – first of all at high latitudes in the vicinity of the magnetopause. This allows to use the models in applications where it is important to have a large-scale description of the magnetic field, for example, when calculating the full magnetic flux in the tail lobes [A59]. In a recent work [A79], a hybrid model was used to investigate global distortions of the magnetosphere during the magnetic storm of February 3–4, 2022, raising a lot of media attention due to the related loss of 38 Starlink satellites.

### **9. Parameterization of empirical models and methods of including the system’s dynamics. Modeling of storms and substorms.**

In view of different timing and non-uniformity of satellite measurements, the key problem with extracting from them information is to establish optimal methods to identify and discriminate between the states of the magnetosphere, aimed at maximizing the accuracy of data selection for reconstructing its instantaneous configurations. In early years, lack of a systematic monitoring of the interplanetary medium limited us to using

indices of the ground disturbance, whose poor time resolution reduced the model parameterization to a simple selection of the satellite data into discrete disturbance intervals [1, A1, A5, A6]. Launch of the first monitors to the L1 libration point made it possible to use the geoeffective interplanetary parameters as input drivers for T96 and T02 models [A17, A26, A27, A29] in the form of averages over preceding hourly intervals and, thus, include in the simplest form the previous history of external driving. In the TS05 model [A33], intended to be used to describe storms in the inner magnetosphere, a more advanced method was implemented, in which the total current magnitudes in each module were computed as a result of competition between the processes of the magnetic flux external intake and its internal dissipation. Testing the model, as well as comments from its many users' and independent studies [A34, A35, A37, A69] confirmed the efficiency of the approach. However, some of its limitations eventually became evident, which pointed out a need for transition from the "universal" parametrization with an a priori prescribed responses of the modules to external driving to individual modeling of specific events, based on the deepest analysis of available characteristics of the current conditions of the magnetosphere and the solar wind, as well as their temporal trends. That prompted a cardinal revision of the previous paradigm and brought us to the next round of the dialectic spiral: formally, a return to the old method of data selection into subsets, but based on much more sophisticated sorting criteria, with collecting as full as possible information from interplanetary monitors and ground stations. The essence of the approach is to choose a limited number of sufficiently independent normalized parameters of the magnetospheric state, tracking its trajectory in the parametric space in the course of an event, and selecting at each step a certain number of experimental data points from the entire multi-year archive – the nearest neighbors, which are then used to determine the model coefficients for the current step. As of now, the method has been tested for several variants of model architectures and a number of events, including both geomagnetic storms in a wide range of intensities [A38, A42, A45, A56, A73, A74, A79], as well as substorms [A67, A70, A77].

## **10. On the accuracy of empirical models.**

A natural question from users of any model concerns the magnitude of their errors. Keeping in mind a very wide area of applications of the magnetospheric field models, such a general formulation does not make virtually much sense. First of all, one needs to understand, what kind of an error is meant: if this is an error of the model field vector, then what region and under what external conditions it should be evaluated? A simple parameter that quantifies a model's agreement with data and plays the role of a target function during the model's optimization is the r.m.s. deviation  $Q/\sigma_B$  of the model field from data, normalized by the r.m.s. value of the field  $\sigma_B$  over the subset (only external part of the field is meant, i.e., without contributions from terrestrial sources). Typical values of  $Q/\sigma_B$  fall into the range from 25% to 50%, depending on the number of subset data points, spatial extent of the modeling region, the number of data points, model's architecture, way of its parameterization, etc. To compare the models with each other, another parameter is often used, called the prediction efficiency and related to  $Q$  by a

simple relation  $PE = 1 - Q^2/\sigma^2$  [13]. In particular [A63], for an RBF model of the geosynchronous field its validation on independent subsets for 2010 and 2014 with data point numbers  $\sim 35000$  and  $\sim 46000$ , the obtained PE values were found equal to 0.76 and 0.77, respectively.

The situation is much more complicated in regard to estimating the accuracy of field line mapping between the low-latitude magnetosphere and ionosphere; this aspect is just what model users are most often interested in. In [A19] we suggested a method to approximately assess the mapping reliability, based on integration along the model field lines of the average local angular deviations between the observed field vectors and the model ones. The obtained diagrams of latitudinal and longitudinal mapping errors were based on the T89 model and, in line with expectations, showed that they tend to zero in the inner magnetosphere, but significantly increase (up to a few degrees of latitude) in the outer part of the model's validity region.

## **11. Models of the magnetospheric plasma characteristics and their relation to the magnetic field models.**

From the physics viewpoint, the structure and dynamics of the outer geomagnetic field is inseparable from the magnetospheric plasma characteristics. In the MHD and kinetic simulations, these two aspects are self-consistently bound together via unified system of equations, while in the empirical approach the magnetic field and plasma are modeled separately, and a natural question is, to what degree are the models mutually consistent? In [A28] we built a statistical model of the proton density, temperature, and pressure in the magnetospheric tail plasma sheet, as functions of the solar wind dynamic pressure and IMF magnitude/orientation, based on data of Geotail satellite for 1994–1998 taken at distances from 10 to 50Re. It was shown that, within the error limits, the radial profiles of the model pressure agree with the tail lobe magnetic field distributions in the T96 model, obtained for the same external conditions. Due to the high Geotail perigee ( $R \approx 10Re$ ), that study did not address the inner magnetosphere. In a later paper [A41], an analysis was made of the consistency of several magnetic field models with radial distributions of equatorial plasma pressure, based on the assumption of a quasi-static balance between forces related to gradients/anisotropy of plasma pressure and magnetic stresses obtained from the model magnetic field. Radial profiles of plasma pressure and its anisotropy degree were calculated using several available magnetic field models at midnight meridian and showed quite good agreement with data of direct measurements onboard AMPTE/CCE and Geotail. In a much more recent work [A74] based on SST19 model, the pressure estimates were extended inward to geocentric distances 2–3Re and were made by directly integrating Ampere's force from remote locations along different paths, assuming the pressure to be completely isotropic. The results were compared with particle analyzer data taken onboard Van Allen Probes satellites during two geomagnetic storms: 13.07–15.07/2013 and 17.03–19.03/2015 ("Saint-Patrick" storm), with SymH peak values  $-75$  and  $-220$ nT, respectively. Around the apogee, a satisfactory agreement

was obtained between the model pressure and data, whereas in the perigee region the model significantly overestimated the pressure and was interpreted as due to invalid isotropy assumption at  $R \leq 3-4R_E$ .

## 12. Experimental data bases and programming software.

Multi-year archives of satellite and ground-based data stored at world data centers contain ample information on the dynamics of near-Earth space across the widest spectrum of magnetospheric states and serve as the principal source of experimental material for creating the empirical models. The most part of data for our research was obtained during the last decades from the CDAWEB archive of the NSSDC world data center and includes the data of magnetospheric measurements made during different years from tens of satellites, as well as those from the solar wind monitors and the ground activity indices from OMNI database servers. The magnetospheric data are widely different in terms of time resolution; in early databases that we compiled and used [A14] it varied within 10–25 minutes; later on a 5-minute standard was adopted, nearly corresponding to the accuracy limit of the interplanetary parameter propagation from the L1 point to the magnetosphere subsolar point and to an estimate of the models' time resolution. The original data of selected missions, however, have a much higher resolution, from the satellite spin period (first seconds) to tenths of second (e.g., MMS or RBSP). Routine procedures of data set preparation for the modeling include the main field subtraction from full vectors, transformation into a required coordinate system, and the averaging over 5-min intervals. Ephemeris data are often provided separately and at much lower time resolution; in that case, they are merged with the original field data using either quadratic or cubic interpolation, to ensure a sufficient accuracy of subtracting the terrestrial source contributions near perigees. The data editing is carried out by successive day-by-day visual inspection of diurnal variations of the magnetospheric field components, spacecraft position and concurrent solar wind parameters, and removal of defective intervals. As of now, the databases at our disposal include nearly  $\sim 10^7$  5-min magnetospheric magnetic field records and nearly  $\sim 3 \cdot 10^6$  records of interplanetary parameters. For their creation, as well as for testing the models, a package of fortran codes has been developed and systematically updated since long ago by the author, known as Geopack-2008; see <https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>. On the same website, model programming software has been uploaded for implementing the above described products; see also <https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/empirical-models/>.

## 13. Secular drift of the auroral oval in the light of magnetosphere models.

An interesting application of the magnetospheric magnetic field models is a recent analysis of the secular shift of the polar aurora oval that took place during the last half century [A72], carried out by using the TA15 model for the external part of the field and a set of IGRF models for the epochs from 1965 through 2020. The work was motivated by unusually rapid shift of the Northern magnetic pole or, to be precise, of a point with zero horizontal component of the main part of the field from northern Canada towards

Laptev Sea, which stirred rumors in media of an imminent similar shift of the auroral oval to the northern part of Siberia. Our calculations have shown that (a) in fact, the auroral oval drift is much smaller than what could be surmised from the pole displacement and (b) the notorious ‘spurt’ of the magnetic pole refers to only the so-called ‘dip pole’, i.e., to the point at Earth’s surface with strictly vertical field orientation, and is actually due to the secular evolution of higher non-dipole harmonics in the IGRF expansion, whose contribution to the total field is large only at low altitudes, but its influence on the auroral oval position is insignificant.

#### **14. Modeling magnetospheres of other planets (Mercury) on the basis of experience with the terrestrial magnetosphere.**

All the planets in the solar system that have a magnetic field with sufficiently large values of lower harmonics have their own magnetospheres whose size varies within wide limits, depending on the value of the magnetic moment and the solar wind pressure, which is determined by the planet’s distance from Sun. Once a sufficient amount of satellite data is available, our methods for the empirical modeling of the geomagnetosphere can be applied to the magnetospheres of other planets, provided a proper scaling of the model parameters is made. One of such first efforts [A22] was based on a modification of the T96 model to analyze data from Mariner 10 flyby through the magnetosphere of Mercury, whose goal was to suggest an interpretation of the observed fast magnetic field variations as a consequence of the IMF direct penetration, in contrast to the hypothesis of their substorm origin. In anticipation of the MESSENGER spacecraft launch in 2004, an attempt was made to evaluate the expected accuracy of calculating the main part of Mercury’s magnetic field and, as the craft was successfully inserted into an orbit around the planet and accumulated a sufficient amount of data, a possibility was open to create an empirical model of its magnetosphere. The modular framework has been developed [A52] using our earlier created prototypes for the terrestrial field models. Specifically, the equatorial current system was assembled from a current disk similar to the models [A13, A33] and a more extended sheet based on a generalized vector potential following

a Harris-type model [12]. The field of magnetopause currents was set for each module in the form of “box” harmonics, shielding the field of inner sources at the boundary and fully analogous to those used in the Earth’s magnetosphere models [A44]. Thus created model was used to analyze low-altitude data of MESSENGER, taken at its last passes before the craft’s destruction in April of 2015. As a result of that work, the remanent magnetization of Mercury’s crust was discovered [A51] and the age of its formation has been established. In the last work of that series [A61], an upgraded version of Mercury magnetosphere was constructed that took into account variations of the solar wind ram pressure due to the eccentricity of the planet’s orbit.

## **The main statements submitted to the defence:**

A new direction of solar-terrestrial studies has been created, entitled: “Empirical modeling of the magnetosphere based on multi-year data archives”, embodied in the following results:

1. A series of empirical models of the Earth’s magnetosphere with modular architecture was created and has been widely used by the international community of researchers in the field of space geophysics [A1, A5, A6, A17, A26, A27, A33, A46, A55].
2. New non-modular methods to describe the magnetosphere are proposed and embodied in specific models, with a variable degree of resolution and the ability to be locally focused on separate regions [A57, A60, A63, A64, A66, A68, A75–A77]. A hybrid approach is formulated and implemented, unifying the modular architecture of the model magnetic field and its formal description with high spatial resolution [A62, A79].
3. Methods are developed and implemented in specific models to parameterize them by geoeffective drivers and ground activity indices, including
  - (a) a ‘universal’ approach with a given form of driving parameters [A27, A33, A35, A55, A60, A63, A68] and
  - (b) a ‘nearest-neighbor’ method, oriented at the modeling of specific events [A38, A42, A45, A56, A67, A70, A73, A74, A76, A77, A79].
4. Methods and models are developed to describe the deformations of magnetospheric structures, associated with the geodipole tilt and IMF azimuthal component [A23, A30, A49, A50]. An explanation is proposed of the bowl-like deformation of the current sheet in the magnetospheres of Saturn and Earth [A49].
5. Based on the arsenal of methods created in our works, the magnetic structure of the dayside polar cusps is explored, including the diamagnetic depression, its dependence on external and internal factors, and penetration of azimuthal IMF component into the cusps [A24, A40, A64, A66].
6. Using an empirical magnetosphere model, an estimate is obtained of the rate of secular shift of auroral zones, in relation to the secular drift of the Earth’s magnetic poles. Rumors of the imminent relocation of the Northern auroral oval to the northern Siberia are dismissed [A72].
7. Using Geotail spacecraft data, a statistical model was developed of plasma characteristics in the magnetospheric tail as functions of the interplanetary medium parameters [A28]. A method has been proposed to reconstruct the (anisotropic) plasma pressure from the field models, using distributions of the magnetic force tensor [A41].



8. In collaboration with foreign colleagues, modeling of the Mercury's magnetosphere is carried out based on data of MESSENGER spacecraft, which made it possible to find a remanent magnetization of the planet's crust and to assess its formation age.

9. Websites have been developed and periodically updated, dedicated to descriptions of the empirical magnetosphere models provided to the scientific community in the form of fortran codes, including a long-popular Geopack-2008 package:

<https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>

<https://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/empirical-models/>

### **A list of the author's publications in chronological order**

A1. **Tsyganenko, N. A.**, Usmanov, A. V. (1982), Determination of the magnetospheric current system parameters and development of experimental geomagnetic field models based on data from IMP and HEOS satellites, *Planetary and Space Science*, v.30, pp.985–998, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90148-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90148-9).

A2. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (1982), Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model, *Planetary and Space Science*, v.30, pp.985–998, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90149-0).

A3. **Tsyganenko, N. A.**, Usmanov, A. V. (1984), Effects of the dayside field-aligned currents in location and structure of polar cusps, *Planetary and Space Science*, v.32, pp.97–104, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(84\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(84)90045-X).

A4. Popielawska, B., Szalinska-Piechota, E., **Tsyganenko, N. A.** (1985), On the non-adiabatic particle scattering in the Earth's magnetotail current sheet, *Planetary and Space Science*, v.33, pp.1433–1437, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(85\)90118-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90118-7).

A5. **Tsyganenko, N. A.** (1987), Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels, *Planetary and Space Science*, v.35(11), pp. 1347–1358, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90046-8).

A6. **Tsyganenko, N. A.** (1989), A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet, *Planetary and Space Science*, v.37(1), pp. 5–20, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90066-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90066-4).

A7. **Tsyganenko, N. A.** (1989), A solution of the Chapman-Ferraro problem for an ellipsoidal magnetopause, *Planetary and Space Science*, v.37(9), pp. 1037–1046, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90076-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90076-7).

- A8. **Tsyganenko, N. A.** (1990), Quantitative models of the magnetospheric magnetic field: Methods and results, *Space Science Reviews*, v.54, 75–186, <https://doi.org/10.1007/BF00168021>.
- A9. **Tsyganenko, N. A.** (1991), Methods for quantitative modeling of the magnetic field from Birkeland currents, *Planetary and Space Science*, v.39(4), pp. 641–654, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(91\)90058-I](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90058-I).
- A10. **Tsyganenko, N. A.** (1993), A global analytical representation of the magnetic field produced by the Region 2 Birkeland currents and the partial ring current, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.98(4), pp.5677–5690, <https://doi.org/10.1029/92JA02002>.
- A11. Peredo, M., Stern, D. P., **Tsyganenko, N. A.** (1993), Are existing magnetospheric models excessively stretched? *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.98(9), pp.15343–15354, <https://doi.org/10.1029/93JA01150>.
- A12. **Tsyganenko, N. A.**, Stern, D. P., Kaymaz, Z. (1993), Birkeland currents in the plasma sheet, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.98(11), pp.19455–19464, <https://doi.org/10.1029/93JA01922>.
- A13. **Tsyganenko, N. A.**, Peredo, M. (1994), Analytical models of the magnetic field of disk-shaped current sheets, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(1), pp.199–205, <https://doi.org/10.1029/93JA02768>.
- A14. Fairfield, D. H., **Tsyganenko, N. A.**, Usmanov, A. V., Malkov, M. V. (1994), A large magnetosphere magnetic field database, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(6), pp.11319–11326, <https://doi.org/10.1029/94JA00255>.
- A15. Sotirelis, T., **Tsyganenko, N. A.**, Stern, D. P. (1994), Method for confining the magnetic field of the cross-tail current inside the magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(10), p.19393–19402, <https://doi.org/10.1029/94JA01656>.
- A16. Sergeev, V. A, Pulkkinen, T., Pellinen, R., **Tsyganenko, N. A.** (1994), Hybrid state of the tail magnetic configuration during steady convection events, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.99(12), pp.23571–23582, <https://doi.org/10.1029/94JA01980>.
- A17. **Tsyganenko, N. A.** (1995), Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.100(4), pp.5599–5612, <https://doi.org/10.1029/94JA03193>.

A18. **Tsyganenko, N. A.**, Stern, D. P. (1996), Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current systems, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.101(12), pp.27187–27198, <https://doi.org/10.1029/96JA02735>.

A19. Pulkkinen, T. I., **Tsyganenko, N. A.** (1996), Testing the accuracy of magnetospheric model field line mapping, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.101(12), pp.27431–27442, <https://doi.org/10.1029/96JA02489>.

A20. **Tsyganenko, N. A.** (1997), An empirical model of the substorm current wedge, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.102(9), pp.19935–19941, <https://doi.org/10.1029/97JA01904>.

A21. **Tsyganenko, N. A.**, Karlsson, S. B. P., Kokubun, S., Yamamoto, T., Lazarus, A. J., Ogilvie, K. W., Russell C. T., Slavin, J. A. (1998), Global configuration of the magnetotail current sheet as derived from Geotail, Wind, IMP 8 and ISEE 1/2 data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.103(4), pp.6827–6841, <https://doi.org/10.1029/97JA03621>.

A22. Luhmann, J. G., Russell, C. T., **Tsyganenko, N. A.** (1998), Disturbances in Mercury's magnetosphere: Are the Mariner 10 “substorms” simply driven? *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.103(5), p.9113–9119, <https://doi.org/10.1029/97JA03667>.

A23. **Tsyganenko, N. A.** (1998), Modeling of twisted/warped magnetospheric configurations using the general deformation method, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.103(10), pp.23551–23563, <https://doi.org/10.1029/98JA02292>.

A24. **Tsyganenko, N. A.**, Russell, C. T. (1999), Magnetic signatures of the distant polar cusps: Observations by Polar and quantitative modeling, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.104(11), pp.24939–24955, <https://doi.org/10.1029/1999JA900279>.

A25. **Tsyganenko, N. A.** (2000), Modeling the inner magnetosphere: The asymmetric ring current and Region 2 Birkeland currents revisited, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.105(12), pp.27739–27754, <https://doi.org/10.1029/2000JA000138>.

A26. **Tsyganenko, N. A.** (2002), A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 1. Mathematical structure, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.107(8), pp.SMP 12-1-SMP 12-15, <https://doi.org/10.1029/2001JA000219>.

A27. **Tsyganenko, N. A.** (2002), A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 2. Parameterization and fitting to observations, *Journal of Geophysical*

*Research Space Physics*, v.107(8), pp.SMP 10-1-SMP 10-17,  
<https://doi.org/10.1029/2001JA000220>.

A28. **Tsyganenko, N. A.**, Mukai, T. (2003), Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.108(3),  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009707>.

A29. **Tsyganenko, N. A.**, Singer, H. J., Kasper, J. C. (2003), Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.108(5), <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>.

A30. **Tsyganenko, N. A.**, Fairfield, D. H. (2004), Global shape of the magnetotail current sheet as derived from Geotail and Polar data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.109(3), <https://doi.org/10.1029/2003JA010062>.

A31. Korth, H., Anderson, B. J., Acuna, M. H., Slavin, J. A., **Tsyganenko, N. A.**, Solomon, S. C., McNutt, R. L. (2004), Determination of the properties of Mercury's magnetic field by the MESSENGER mission, *Planetary and Space Science*, v.52(8), pp.733–746, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2003.12.008>.

A32. Ostgaard, N., **Tsyganenko, N. A.**, Mende, S. B., Frey, H. U., Immel, T. J., Fillingim, M., Frank, L. A., Sigwarth, J. B. (2005), Observations and model predictions of substorm auroral asymmetries in the conjugate hemispheres, *Geophysical Research Letters*, v.32(5), <https://doi.org/10.1029/2004GL022166>.

A33. **Tsyganenko, N. A.**, and Sitnov, M. I. (2005), Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.110 (A3), A03208, <https://doi.org/10.1029/2004JA010798>.

A34. Sazykin, S., Spiro, R. W., Wolf, R. A., Toffoletto, F. R., **Tsyganenko, N. A.**, Goldstein, J., Hairston, M. R. (2005), Modeling inner magnetospheric electric fields: Latest self-consistent results, in: *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*, AGU Geophysical Monograph Series, v.155, Eds. T. I. Pulkkinen, N. A. Tsyganenko, & R. H. W. Friedel, <https://doi.org/10.1029/155gm28>.

A35. Qin, Z., Denton, R. E., **Tsyganenko, N. A.**, Wolf, S. (2007), Solar wind parameters for magnetospheric magnetic field modeling, *Space Weather*, v.5(11),  
<https://doi.org/10.1029/2006SW000296>.

A36. **Tsyganenko, N. A.**, Sitnov, M. I. (2007), Magnetospheric configurations from a high-resolution data-based magnetic field model, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 112(A6), A06225, <https://doi.org/10.1029/2007JA012260>.

- A37. Huang, C.-L., Spence, H. E., Singer, H. J., **Tsyganenko, N. A.** (2008), A quantitative assessment of empirical magnetic field models at geosynchronous orbit during magnetic storms, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 113(4), A04208, <https://doi.org/10.1029/2007JA012623>.
- A38. Sitnov, M. I., **Tsyganenko, N. A.**, Ukhorskiy, A. Y., Brandt, P. C. (2008), Dynamical data-based modeling of the storm-time geomagnetic field with enhanced spatial resolution, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.113(7), A07218, <https://doi.org/10.1029/2007JA013003>.
- A39. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Angelopoulos, V. (2008), Dynamical response of the magnetotail to changes of the solar wind direction: an MHD modeling perspective, *Annales Geophysicae*, v.26, pp.2395–2402, <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2395-2008>.
- A40. **Tsyganenko, N. A.** (2009), Magnetic field and electric currents in the vicinity of polar cusps as inferred from Polar and Cluster data, *Annales Geophysicae*, v.27, pp.1573–1582, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1573-2009>.
- A41. **Tsyganenko, N. A.** (2010), On the reconstruction of magnetospheric plasma pressure distributions from empirical geomagnetic field models, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.115(7), A07211, <https://doi.org/10.1029/2009JA015012>.
- A42. Sitnov, M. I., **Tsyganenko, N. A.**, Ukhorskiy, A. Y., Anderson, B. J., Korth, H., Lui, A. T. Y., Brandt, P. C. (2010), Empirical modeling of a CIR-driven magnetic storm, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.115(7), A07231, <https://doi.org/10.1029/2009JA015169>.
- A43. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Smirnov, M. V., Nikolaev, A. V., Singer, H. J., Baumjohann, W. (2011), Magnetic effects of the substorm current wedge in a “spread-out wire” model and their comparison with ground, geosynchronous, and tail lobe data, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.116(7), A07218, <https://doi.org/10.1029/2011JA016471>.
- A44. **Tsyganenko, N. A.** (2013), Data-based modelling of the Earth’s dynamic magnetosphere: a review, *Annales Geophysicae*, v.31, pp.1745–1772, <https://doi.org/10.5194/angeo-31-1745-2013>.
- A45. Stephens, G. K., Sitnov, M. I., Kissinger, J., **Tsyganenko, N. A.**, McPherron, R. L., Korth, H., Anderson, B. J. (2013), Empirical reconstruction of storm time steady magnetospheric convection events, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.118(10), pp.6434–6456, <https://doi.org/10.1002/jgra.50592>.

A46. **Tsyganenko, N. A.** (2014), Data-based modeling of the geomagnetosphere with an IMF-dependent magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.119(1), pp.335–354, <https://doi.org/10.1002/2013JA019346>.

A47. Sergeev, V. A., Nikolaev, A. V., **Tsyganenko, N. A.**, Angelopoulos, V., Runov, A. V., Singer, H. J., Yang, J. (2014), Testing a two-loop pattern of the substorm current wedge (SCW2L), *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.119(2), pp.947–963, <https://doi.org/10.1002/2013JA019629>.

A48. Sergeev, V. A., Nikolaev, A. V., Kubyshkina, M. V., **Tsyganenko, N. A.**, Singer, H. J., Rodriguez, J. V., Angelopoulos, V., Nakamura, R., Milan, S. E., Coxon, J. C., Anderson, B. J., Korth, H. (2014), Event study combining magnetospheric and ionospheric perspectives of the substorm current wedge modeling, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.119(12), pp.9714–9728, <https://doi.org/10.1002/2014JA020522>.

A49. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., On the “bowl-shaped” deformation of planetary equatorial current sheets (2014), *Geophysical Research Letters*, v.41(4), pp.1079–1084, <https://doi.org/10.1002/2014GL059295>.

A50. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Gordeev, E. I. (2015), Internally and externally induced deformations of the magnetospheric equatorial current as inferred from spacecraft data, *Annales Geophysicae*, v.33(1), pp.1–11, <https://doi.org/10.5194/angeo-33-1-2015>.

A51. Johnson, C. L., Phillips, R. J., Purucker, M. E., Anderson, B. J., Byrne, P. K., Denevi, B. W., Feinberg, J. M., Hauck, S. A., Head, J. W., Korth, H., James, P. B., Mazari-co, E., Neumann, G. A., Philpott, L. C., Siegler, M. A., **Tsyganenko, N. A.**, Solomon, S. C., (2015), Low-altitude magnetic field measurements by MESSENGER reveal Mercury’s ancient crustal field, *Science*, v.348(6237), <https://doi.org/10.1126/science.aaa8720>.

A52. Korth, H., **Tsyganenko, N. A.**, Johnson, C. L., Philpott, L. C., Anderson, B. J., Al Asad, M. M., Solomon, S. C., McNutt, R. L. (2015), Modular model for Mercury’s magnetospheric magnetic field confined within the average observed magnetopause, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, v.120(6), pp.4503–4518, <https://doi.org/10.1002/2015JA021022>.

A53. Kubyshkina, M., **Tsyganenko, N.**, Semenov, V., Kubyshkina, D., Partamies, N., Gordeev, E. (2015), Further evidence for the role of magnetotail current shape in substorm initiation, *Earth, Planets and Space*, v.67:139, <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0304-1>.

- A54. Nikolaev, A. V., Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Kubyshkina, M. V., Opge-noorth, H., Singer, H., Angelopoulos, V. (2015), A quantitative study of magnetospheric magnetic field line deformation by a two-loop substorm current wedge, *Annales Geophysicae*, v.33(4), pp.505–517, <https://doi.org/10.5194/angeo-33-505-2015>.
- A55. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., (2015), A forecasting model of the magnetosphere driven by an optimal solar wind coupling function, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.120(10), pp.8401–8425, <https://doi.org/10.1002/2015JA021641>.
- A56. Stephens, G. K., Sitnov, M. I., Ukhorskiy, A. Y., Roelof, E. C., **Tsyganenko, N. A.**, Le, G. (2016), Empirical modeling of the storm time innermost magnetosphere using Van Allen Probes and THEMIS data: Eastward and banana currents, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(1), pp.157–170, <https://doi.org/10.1002/2015JA021700>.
- A57. Andreeva, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (2016), Reconstructing the magnetosphere from data using radial basis functions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(3), pp.2249–2263, <https://doi.org/10.1002/2015JA022242>.
- A58. Samsonov, A. A., Gordeev, E., **Tsyganenko, N. A.**, Safrankova, J., Nemecek, Z., Simunek, J., Sibeck, D. G., Toth, G., Merkin, V. G., Raeder, J. (2016), Do we know the actual magnetopause position for typical solar wind conditions? *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(7), pp.6493–6508, <https://doi.org/10.1002/2016JA022471>.
- A59. Shukhtina, M. A., Gordeev, E. I., Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Clausen, L. B. N., Milan, S. E. (2016), Magnetotail magnetic flux monitoring based on simultaneous solar wind and magnetotail observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(9), pp.8821–8839, <https://doi.org/10.1002/2016JA022911>.
- A60. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2016), An empirical RBF model of the magnetosphere parameterized by interplanetary and ground-based drivers, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.121(11), pp.10786–10802, <https://doi.org/10.1002/2016JA023217>.
- A61. Korth, H., Johnson, C. L., Philpott, L., **Tsyganenko, N. A.**, Anderson, B. J. (2017), A dynamic model of Mercury’s magnetospheric magnetic field, *Geophysical Research Letters*, v.44(20), pp.10147–10154, <https://doi.org/10.1002/2017GL074699>.
- A62. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2017), A hybrid approach to empirical magnetosphere modeling, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.122(8), pp.8198–8213, <https://doi.org/10.1002/2017JA024359>.
- A63. Andreeva, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (2018), Empirical modeling of the quiet and storm time geosynchronous magnetic field, *Space Weather*, v.16(1), pp.16–36, <https://doi.org/10.1002/2017SW001684>.

- A64. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Building the magnetosphere from magnetic bubbles (2018), *Geophysical Research Letters*, v.45(13), pp.6382–6389, <https://doi.org/10.1029/2018GL078714>.
- A65. Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Angelopoulos, V., Runov, A. V., Singer, H. (2018), Magnetotail configuration during a steady convection event as observed by low-altitude and magnetospheric spacecraft, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.123(10), pp.8390–8406, <https://doi.org/10.1029/2018JA025867>.
- A66. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2018), Empirical modeling of dayside magnetic structures associated with polar cusps, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.123(11), pp.9078–9092, <https://doi.org/10.1029/2018JA025881>.
- A67. Stephens, G. K., Sitnov, M. I., Korth, H., **Tsyganenko, N. A.**, Ohtani, S., Gkioulidou, M. (2019), Global empirical picture of magnetospheric substorms inferred from multimission magnetometer data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(2), pp.1085–1110, <https://doi.org/10.1029/2018JA025843>.
- A68. Andreeva, V. A., **Tsyganenko, N. A.** (2019), Empirical modeling of the geomagnetosphere for SIR and CME-driven magnetic storms, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(7), pp.5641–5662, <https://doi.org/10.1029/2018JA026008>.
- A69. Kubyshkina, M., Sergeev, V. A., **Tsyganenko, N. A.**, Zheng, Y. (2019), Testing efficiency of empirical, adaptive, and global MHD magnetospheric models to represent the geomagnetic field in a variety of conditions, *Space Weather*, v.17(5), pp.672–686, <https://doi.org/10.1029/2019SW002157>.
- A70. Sitnov, M. I., Stephens, G. K., **Tsyganenko, N. A.**, Miyashita, Y., Merkin, V. G., Motoba, T., Ohtani, S., Genestreti, K. J. (2019), Signatures of nonideal plasma evolution during substorms obtained by mining multimission magnetometer data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(11), pp.8427–8456, <https://doi.org/10.1029/2019JA027037>.
- A71. Chen, W., Wang, X., **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Semenov, V. S. (2019), Reconstruction of local magnetic structures by a modified radial basis function method, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.124(12), pp.10141–10152, <https://doi.org/10.1029/2019JA027078>.
- A72. **Tsyganenko, N. A.**, Secular drift of the auroral ovals: How fast do they actually move? (2019), *Geophysical Research Letters*, v.46(6), pp.3017–3023, <https://doi.org/10.1029/2019GL082159>.
- A73. Sitnov, M. I., Stephens, G. K., **Tsyganenko, N. A.**, Korth, H., Roelof, E. C., Brandt, P. C., Merkin, V. G., Ukhorskiy, A. Y. (2020), Reconstruction of extreme geo-



magnetic storms: Breaking the data paucity curse, *Space Weather*, v.18(10), e2020SW002561, <https://doi.org/10.1029/2020SW002561>.

A74. Stephens, G. K., Bingham, S. T., Sitnov, M. I., Gkioulidou, M., Merkin, V. G., Korth, H., **Tsyganenko, N. A.**, Ukhorskiy, A. Y. (2020), Storm time plasma pressure inferred from multimission measurements and its validation using Van Allen Probes particle data, *Space Weather*, v.18(12), e2020SW002583, <https://doi.org/10.1029/2020SW002583>.

A75. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A. (2020), Magnetospheric “penetration” of IMF By viewed through the lens of an empirical RBF modeling, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.125(1), e2019JA027439, <https://doi.org/10.1029/2019JA027439>.

A76. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., (2021), Reconstruction of magnetospheric storm-time dynamics using cylindrical basis functions and multi-mission data mining, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.126(2), e2020JA028390, <https://doi.org/10.1029/2020JA028390>.

A77. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., Stephens, G. K., Gjerloev, J. W., Chu, X., Troshichev, O. A. (2021), Reconstructing substorms via historical data mining: Is it really feasible? *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.126(10), e2021JA029604, <https://doi.org/10.1029/2021JA029604>.

A78. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Kubyshkina, M. V., Sitnov, M. I., Stephens, G. K. (2021), Data-Based Modeling of the Earth’s Magnetic Field, in: *Space Physics and Aeronomy Collection Volume 2: Magnetospheres in the Solar System, Geophysical Monograph 259*, American Geophysical Union, Wiley & Sons, Inc., <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch39>.

A79. **Tsyganenko, N. A.**, Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., Stephens (2022), Magnetosphere distortions during the “satellite killer” storm of February 3–4, 2022, as derived from a hybrid empirical model and archived data mining *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.127(12), e2022JA031006, <https://doi.org/10.1029/2022JA031006>.

A80. **Tsyganenko N. A.** (2022), A lifetime with models, or toils and thrills of number crunching, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9:934216, <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.934216>.

## A list of other above cited publications

1. Mead, G. D., Fairfield, D. H. (1975), A quantitative magnetospheric model derived from spacecraft magnetometer data, *Journal of Geophysical Research*, v.80(4), pp.523–534, <https://doi.org/10.1029/JA080i004p00523>.

2. Boberg, P. R., Tylka, A. J., Adams Jr., J. H., Flueckiger, E. O., Kobel, E. (1995), Geomagnetic transmission of solar energetic protons during the geomagnetic disturbances of October 1989, *Geophysical Research Letters*, v.22(9), pp.1133–1136, <https://doi.org/10.1029/95GL00948>.
3. Abt, H. A. (2000). The most frequently cited astronomical papers published during the past decade. *Bull. Am. Astronomical Soc.*, v.32, pp. 937, <https://adsabs.harvard.edu/full/2000BAAS...32..937A>.
4. Stern, D. P. (1987), Tail modeling in a stretched magnetosphere: 1. Methods and transformations *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.92(5), pp.4437–4448, <https://doi.org/10.1029/JA092iA05p04437>.
5. Lui, A. T. Y., Hamilton, D. C. (1992), Radial profiles of quiet time magnetospheric parameters, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.97(12), pp.19325–19332, <https://doi.org/10.1029/92JA01539>.
6. Alexeev, I. I., Shabansky, V. P. (1972), A model of a magnetic field in the geomagnetosphere, *Planetary and Space Science*, v.20(1), pp.117–133, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(72\)90146-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(72)90146-8).
7. Voigt, G.-H. (1981), A mathematical magnetospheric field model with independent physical parameters, *Planetary and Space Science*, v.29(1), pp.1–20, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(81\)90134-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90134-3).
8. Schulz, M., McNab, M. (1987), Source-surface model of the magnetosphere, *Geophysical Research Letters*, v.14(3), pp.182–185, <https://doi.org/10.1029/GL014i003p00182>.
9. Lin, R. L., Zhang, X. X., Liu, S. Q., Wang, Y. L., Gong, J. C. (2010), A three-dimensional asymmetric magnetopause model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.115(4), A04207, <https://doi.org/10.1029/2009JA014235>.
10. Armstrong, J. C., Zmuda, A. J., (1970), Field-aligned current at 1100 km in the auroral region measured by satellite, *Journal of Geophysical Research*, v.75(34), pp.7122–7127, <https://doi.org/10.1029/JA07i034p07122>.
11. Arridge, C. S., Khurana, K. K., Russell, C. T., Southwood, D. J., Achilleos, N., et al. (2008), Warping of Saturn’s magnetospheric and magnetotail current sheets, *J. Geophys. Res. Space Physics*, v.113(8), A08217, <https://doi.org/10.1029/2007JA012963>.

12. Harris, E. G. (1962), On a plasma sheath separating regions of oppositely directed magnetic field, *Nuovo Cimento*, v.23(1), pp.115–121, <https://doi.org/10.1007/BF02733547>.
13. McCollough, J. P., Gannon, J. L., Baker, D. N., Gehmeyr, M. (2008), A statistical comparison of commonly used external magnetic field models, *Space Weather*, v.6, S10001, <https://doi.org/10.1002/2008SW000391>.