

© 2024 г. А.М. САЛЬНИКОВ (salnikov@ipu.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва;
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва),
А.В. БАТОВ, канд. физ.-мат. наук (batov@ipu.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва;
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва),
И.Э. СТЕПАНОВА, д-р физ.-мат. наук (tet@ifz.ru),
Т.В. ГУДКОВА, д-р физ.-мат. наук (gudkova@ifz.ru)
(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва)

О ВЫБОРКАХ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАРСА¹

Исследуются проблемы формирования выборок данных спутниковых измерений для построения моделей магнитного поля Марса. Предложено и реализовано несколько подходов к построению выборок данных. С помощью регионального метода S-аппроксимаций построены аналитические аппроксимации магнитного поля, представлены аналитические продолжения поля к единой выбранной высоте. Расчеты проведены для области Марса, включающей в себя места посадки космического аппарата миссии InSight и китайского ровера «Чжужун». Моделирование проводилось на основе выборок данных из калиброванных данных insitu.calibrated уровня 2 миссии MAVEN.

Ключевые слова: Марс, магнитное поле, выборки данных, аналитическое продолжение, метод S-аппроксимаций.

DOI: 10.31857/S0005231024100097, EDN: YUNWGZ

1. Введение

Создание магнитометров для спутниковых измерений с целью измерения магнитного поля планеты является очень сложной задачей [1]. Первыми космическими аппаратами, получившими измерения магнитного поля Марса, были автоматические межпланетные станции Mariner 4 (пролетел на расстоянии 9850 км), «Марс-3» (максимальное сближение ~1500 км), «Марс-2», «Фобос», «Фобос-2» (см. обзор [2]). Авторы работы [2] считают, что в начале 1972 г. (примерно за 25 лет до MGS) «Марс-3» обнаружил магнитное поле марсианской коры.

До запуска Mars Global Surveyor (MGS) в 1996 г. о магнитном поле Марса было мало информации, а его происхождение вызывало споры. Предыдущие миссии давали лишь верхнюю оценку значений интенсивности магнитного момента планеты [3].

¹ Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00392, <https://rscf.ru/project/23-27-00392/>).

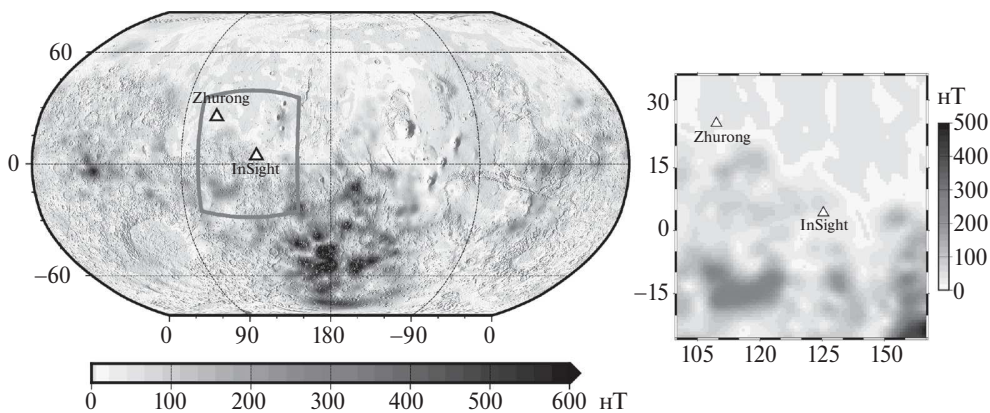


Рис. 1. Модель [12] магнитного поля Марса. Справа показана область, исследуемая в данной работе. Модель описывает поле на высоте 150 км.

Гипотеза о том, что на Марсе нет глобального магнитного поля, подтвердилась благодаря миссии MGS. Космический корабль MGS работал на марсианской орбите с 1997 по 2006 гг. и стал первой миссией, обеспечившей измерения магнитного поля Марса на достаточно малой высоте, чтобы выявить характеристики уникального марсианского магнитного поля. С сентября 1997 г. наблюдения векторного магнитного поля были получены с более чем 1000 эллиптических орбит с точкой наибольшего сближения с планетой на высоте от 85 до 170 км [4].

На планете была обнаружена довольно сильная намагниченность южного полушария. На основе данных MGS было построено много карт и моделей магнитного поля планеты [3, 5–11].

Благодаря миссии Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN), работающей на орбите Марса с осени 2014 г. по настоящее время, поступают новые данные, которые удалось объединить с данными MGS, что позволило улучшить модели магнитного поля планеты [12–14]. На рис. 1 – модель [12] интенсивности магнитного поля Марса на высоте 150 км. На борту космического аппарата MAVEN, как и на MGS, на солнечных панелях установлены два феррозондовых магнитометра. В отличие от MGS аппарат MAVEN имеет неполярную эллиптическую орбиту, его перицентр составляет около 150 км (минимальная высота над эллипсоидом – 117 км).

Хотя вокруг истории и эволюции магнитного поля Марса остается множество вопросов, сейчас общепризнано, что планета когда-то имела мощное глобальное магнитное поле. Это поле создавалось «динамо-машиной», работающей в ядре планеты на протяжении достаточно долгого времени, в результате минералы приобрели сильную намагниченность, сохранившуюся до сих пор и предоставляющую информацию о прошлом Марса [12].

Большинство сегодняшних гипотез об истории и эволюции марсианского магнитного поля строились на моделях, которые были основаны на измерениях магнитного поля космическими аппаратами MGS и MAVEN.

Первые измерения магнитного поля на поверхности планеты были проведены благодаря миссии Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport (InSight), успешно совершившей посадку на поверхность Марса 26 ноября 2018 г. Магнитометр посадочного модуля миссии измерил поле на поверхности, которое оказалось в 7–10 раз сильнее, чем предсказывалось с помощью глобальных моделей на основе орбитальных данных [15]. Это различие в измерениях подчеркивает, что некоторые аспекты магнитного поля, такие как его локальные аномалии или структуры малых масштабов, не могут быть адекватно зафиксированы при наблюдениях с орбиты.

14 мая 2021 г. посадочный модуль китайской миссии «Тяньвэнь-1», на которой находился ровер «Чжужун», совершил мягкую посадку на равнине Утопия, в точке $25^{\circ}03$ северной широты $109^{\circ}55$ восточной долготы. В том же году ровер преодолел путь длиной в один км и измерил очень слабое магнитное поле вдоль своего маршрута. Измеренная интенсивность магнитного поля составила одну десятую от прогнозируемых значений [16]. Данных о магнитных измерениях с орбитального аппарата «Тяньвэнь-1» пока немного, в открытом доступе имеются только дневные данные на малых высотах.

2. Основные подходы к моделированию магнитного поля Марса

Метод эквивалентных диполей ESD (Equivalent Source Dipoles) основан на предположении, что происхождение измеренного магнитного поля может быть смоделировано как сумма вкладов большого количества дипольных источников, равномерно распределенных под поверхностью планеты.

Этот метод обладает рядом достоинств: он менее чувствителен к неравномерности распределения данных; позволяет детально моделировать локальные магнитные аномалии, что особенно важно для анализа магнитного поля планет с неровной поверхностью, такой как Марс. Метод дает возможность использовать как низкоорбитальные, так и высокоорбитальные данные для создания единой модели магнитного поля.

Одним из основных недостатков ESD метода является то, что он не позволяет экстраполировать поле ниже высоты, которая в первом порядке равна среднему расстоянию между соседними диполями.

Метод ESD применялся в нескольких исследованиях для построения моделей, описывающих магнитное поле Марса в глобальном масштабе [3, 10, 12, 17].

В [9] используется метод сферических гармоник для моделирования магнитного поля литосферы Марса. Этот метод основан на разложении магнитного поля на компоненты с использованием функций сферических гармоник, что позволяет представить глобальное поле как сумму вкладов различных гармонических компонент. Для минимизации влияния выбросов использовалась модифицированная норма Хубера. В [14] для построения модели используются данные и MGS, и MAVEN.

В [18] предлагается инновационный подход с использованием метода PINN (Physics-Informed Neural Networks), который интегрирует физические принципы в нейронные сети для создания улучшенной модели магнитного поля марсианской коры. Этот метод применяет объединенные данные из миссий MGS и MAVEN, что позволяет достичь высокой детализации и повысить точность моделирования.

В данной работе был применен метод S-аппроксимаций, который более подробно описан ниже.

3. S-аппроксимации

В данной работе используется метод линейных интегральных представлений, который позволяет аппроксимировать поле через суммирование простых и двойных слоев (теория потенциала), размещенных на определенных носителях ниже заданного рельефа. Одним из вариантов этого метода являются S-аппроксимации [19–21], представляющие в итоге относительно простые аналитические формулы для расчета матричных элементов при решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Метод S-аппроксимаций обладает высокой гибкостью и универсальностью, позволяя не только создавать высокоточные аппроксимации магнитного поля на основе больших объемов спутниковых данных, но и проводить различные преобразования, включая построение аналитических продолжений модельного поля в двух направлениях: от источников к наблюдаемым точкам и от наблюдаемых точек к источникам, позволяя, в частности, приводить данные к одной высоте. Кратко опишем суть S-аппроксимаций. Пусть имеется N измерений ($\geq 10^4$). В первом уравнении отделяем полезный сигнал от помех (шума).

$$(1) \quad f_{i,\delta} = f_i + \delta f_i, \quad i = \overline{1, N},$$

f_i – полезный сигнал, δf_i – шум. Выполняются следующие соотношения:

$$(2) \quad f_i = \sum_{r=1}^R \int_{M_r} \rho_r(\xi) Q_r^{(i)}(\xi) d\mu_r(\xi),$$

где $\rho_r(\xi)$ – неизвестные функции, $Q_r^{(i)}(\xi)$, $r = \overline{1, R}$, $i = \overline{1, N}$ – заданные функции, $\mu_r(\xi)$ – заданные меры на M_r , а M_r – множества ассоциированных точек (в общем случае в R^n , $n \geq 1$). Неизвестные функции $\rho_r(\xi)$ можно трактовать как плотности простого и двойного слоев, расположенных на определенной поверхности, которая может быть представлена плоскостью, двугранным углом или сферой. Эти плотности можно считать проекциями магнитных источников на поддерживаемые магнитные массы, хотя сами массы имеют трехмерную структуру. Основной метод нахождения функций $\rho_r(\xi)$ является итеративным и напоминает метод Ньютона. В ходе каждой итерации в метод линейного интегрального представления вносятся модификации по сравнению с предыдущим шагом. В общем случае метод нахождения $\rho_r(\xi)$ (определение интегральных представлений значений f_i , $i = \overline{1, N}$) заключается в постановке

и решении условно-вариационной задачи. В итоге задача сводится к решению СЛАУ

$$(3) \quad A\lambda = f_\delta, \quad f_\delta = f + \delta f,$$

где λ – вектор-столбец размерности N , который необходимо определить, матрица A – симметричная положительно определенная матрица размерности $N \times N$ с натуральными элементами (положительная на конусе), f_δ – вектор-столбец размерности N , представляющий наблюдаемый магнитный функционал, который выражается как сумма вектора полезного сигнала f и вектора помех δf . Невозможно точно и объективно изолировать ошибки и разделить f_δ на f и δf .

Если $f_{i,\delta}$ представляют собой измеренные значения аномального магнитного поля, то такие значения рассматриваются как интегральное представление аномального поля количественного типа, для описания которого используется термин «метрологический». В одних и тех же натуральных данных можно найти множество метрологических линейных интегральных аппроксимаций. Таким образом, поиск устойчивого приближенного решения СЛАУ является ключевой вычислительной процедурой в S-аппроксимациях.

В данной работе идеализированная модель Марса представлена в виде сферы радиуса R_0 , в то время как реальная замкнутая поверхность S считается незначительно отклоняющейся от данной сферы, оставаясь внутри нее. На поверхности S в определенных точках заданы значения гармонической функции, определенной во внешней области сферы. Эта функция представляет собой потенциал магнитного поля, выраженный через известные компоненты. В качестве таких компонент могут выступать, например, первая вертикальная производная потенциала на заданном рельефе над физической поверхностью Марса или одна из измеренных компонент вектора магнитной индукции.

Для аппроксимации аномального магнитного поля используются модели простого и двойного слоев, распределенных по двум концентрическим сферам, расположенным под поверхностью планеты. Выбор данной модели обусловлен относительной простотой и удобством формата элементов матрицы, что обеспечивает высокую скорость вычислений.

$$(4) \quad \begin{aligned} a_{ij} = a_{ji} &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(Q_i^{(1)}(\xi) Q_j^{(1)}(\xi) + Q_i^{(2)}(\xi) Q_j^{(2)}(\xi) \right) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = \\ &= \frac{2\pi}{r_i r_j \sqrt{h_i h_j}} \left(1 + \frac{1}{4r_i r_j h_i h_j} \right) \times F \left(2 \tan^{-1} \left(\sqrt{h_i h_j} \right), \sqrt{\frac{1 + \cos(\alpha_{ij})}{2}} \right) - \\ &\quad - \frac{\pi \left(3h_i^2 h_j^2 - 4h_i h_j \cos(\alpha_{ij}) + 1 \right)}{r_i^2 r_j^2 h_i h_j \left(\sqrt{1 - 2h_i h_j \cos(\alpha_{ij}) + h_i^2 h_j^2} \right)^3}, \end{aligned}$$

где F – неполный эллиптический интеграл первого рода [22].

Таким образом матрица A интегрирует в себе как геометрию измерений, так и информацию об источниках поля. В этом контексте обработка данных измерений может быть интерпретирована как один из этапов процесса регуляризации. Степень точности, с которой поле может быть восстановлено с помощью S -аппроксимаций, определяется количеством точек наблюдения, их взаимным расположением, рельефом исследуемой территории и прочими факторами.

4. Особенности моделирования магнитного поля Марса

Данные, собранные на различных высотах и в разные периоды времени с помощью разных космических аппаратов, имеют различное разрешение и точность. Неравномерная плотность данных измерений над различными областями создает трудности при построении моделей.

Измерения магнитного поля Марса на спутниковых высотах подвержены воздействию внешних факторов, таких как межпланетное магнитное поле, солнечный ветер, выбросы корональной массы и собственная магнитосфера планеты. Для минимизации искажений, вызванных этими факторами, требуются специальные методы фильтрации и обработки данных.

Определение источников магнитного поля по измерениям на орбите представляет собой обратную задачу с множеством возможных решений. Для выбора среди многозначных решений наиболее вероятной модели применяются методы регуляризации и оптимизации, которые, однако, могут накладывать ограничения и предположения на итоговый результат, в том числе ограничивают возможности трансформации полей.

Построение высокодетализированных моделей требует значительных вычислительных ресурсов.

Топографические особенности Марса также вносят свой вклад в формирование магнитного поля и должны учитываться при моделировании.

5. Выборка данных

В настоящей работе сосредоточено внимание на данных миссии MAVEN. Были использованы калиброванные данные `insitu.calibrated` уровня 2 [23]. Эти данные представлены в физических единицах и усреднены с равномерной частотой. До высоты 500 км данные записаны с частотой одно измерение в 4 с, выше – одно измерение в 8 с. Помимо измерений магнитного поля, времени и положения космического аппарата, в наборе данных `In situ` представлены ключевые параметры и информация об эфемеридах, полученные как в результате самих измерений приборов космического аппарата, так и применения библиотек SPICE, одному измерению соответствует 235 признаков (колонок). Были взяты данные начиная с 18 октября 2014 г., чтобы исключить пропущенные значения измерений. Количество измерений (строк) до 15 мая 2024 г. включительно составило 38 140 693.

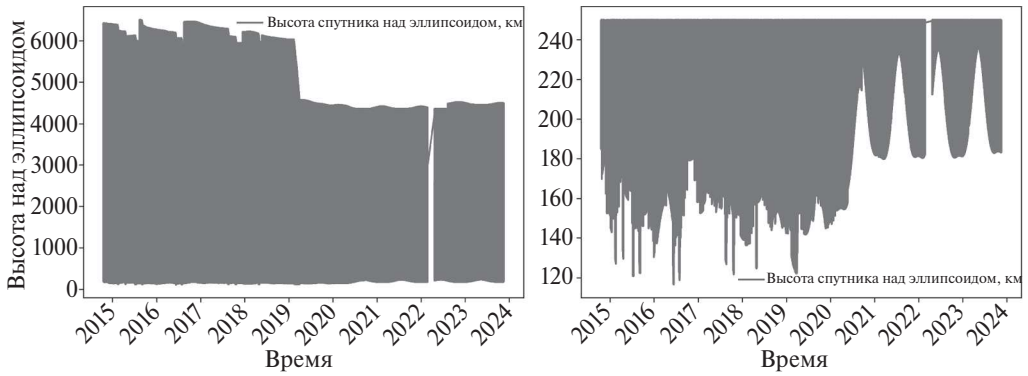


Рис. 2. Высотные профили измерений, полученных аппаратом MAVEN в период с 2014 по 2024 гг. Справа представлен фрагмент данных, ограниченных высотой 250 км.

Космический аппарат MAVEN движется по эллиптической орбите, его высота над поверхностью Марса варьируется в диапазоне от 116 км до 6500 км (см. рис. 2). До 2021 г. удалось собрать данные на более низких орбитах, в среднем менее 150 км. Измерения доступны в диапазоне от 75° южной широты до 75° северной широты.

Наблюдаемые значения магнитного поля представляют собой суперпозицию внешнего магнитного поля и постоянного магнитного поля коры. В [12] предложен подход, основанный на анализе данных, полученных на высотах до 600 км. Учитывая, что частота измерений в наборе данных постоянна до высоты 500 км, и принимая во внимание интерес к изучению магнитного поля в непосредственной близости от планеты, авторы ограничили выборку данных высотой 500 км. Рисунок 3 иллюстрирует зависимость измеренных значений компонент магнитного поля B_x , B_y , B_z от высоты над поверхностью Марса. Наблюдается общая тенденция к уменьшению величины магнитного поля с увеличением высоты. Однако также наблюдается присутствие внешнего магнитного поля, а именно межпланетного магнитного поля, связанного с солнечным ветром. Это внешнее влияние проявляется в виде отклонений от монотонного убывания магнитного поля. Данное наблюдение подчеркивает сложность магнитной среды вблизи Марса и необходимость учета различных источников при интерпретации измерений магнитного поля (см. [24–26]).

Производились выборки данных как на прямоугольной сетке с шагом $0,5^\circ$, так и на равновеликой сетке SREAG [27]. В дальнейших примерах представлены результаты для выборки на прямоугольной сетке.

Для построения аналитической аппроксимации и аналитического продолжения поля была выбрана следующая область: от 25° ю.ш. до 35° с.ш., от 100° в.д. до 160° в.д. Данная область включает в себя место посадки космического аппарата миссии InSight в районе равнины Элизий, $4,502^\circ$ с.ш., $135,623^\circ$ в.д. ([28]), а также место посадки ровера Чжужун на равнине Утопия, $25,066^\circ$ с.ш. $109,926^\circ$ в.д. [29].

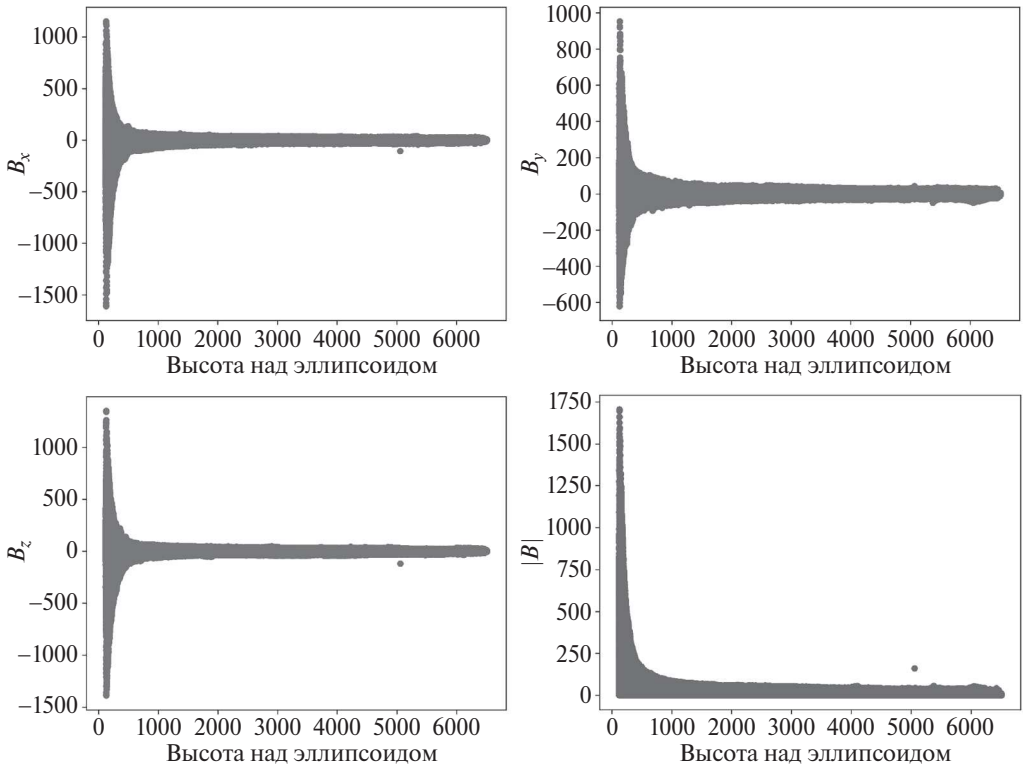


Рис. 3. Высотный профиль компонент магнитного поля. Точечный график иллюстрирует убывание значений компонент магнитного поля B_x , B_y , B_z и интенсивности $|B|$ с увеличением высоты.

Минимальная высота, на которой проводились измерения над исследуемым регионом, составляет 119,4 км. Ограничение выборки исключительно ночными данными оказывает существенное влияние на общую картину и значительно сокращает диапазон наблюдаемых значений. В частности, минимальная высота измерений в некоторых точках превышает 450 км.

Каждое измерение сопоставлялось с узлом прямоугольной сетки, если отклонение его широты и долготы от соответствующих координат узла не превышало $0,25^\circ$. При этом для построения аппроксимации использовались исходные координаты измерений. В данной работе анализировались выборки данных измерений магнитного поля, полученных на минимальных высотах над узлами заданной сетки.

Как видно на рис. 4, на котором представлен пример измерений компоненты B_z , ночные данные демонстрируют значительно меньший уровень шума по сравнению с дневными, поскольку они менее подвержены влиянию внешних магнитных возмущений, что обеспечивает более высокое соотношение сигнал/шум. Это делает ночные данные предпочтительными для моделирования литосферного магнитного поля, так как они предоставляют более точные и надежные результаты.

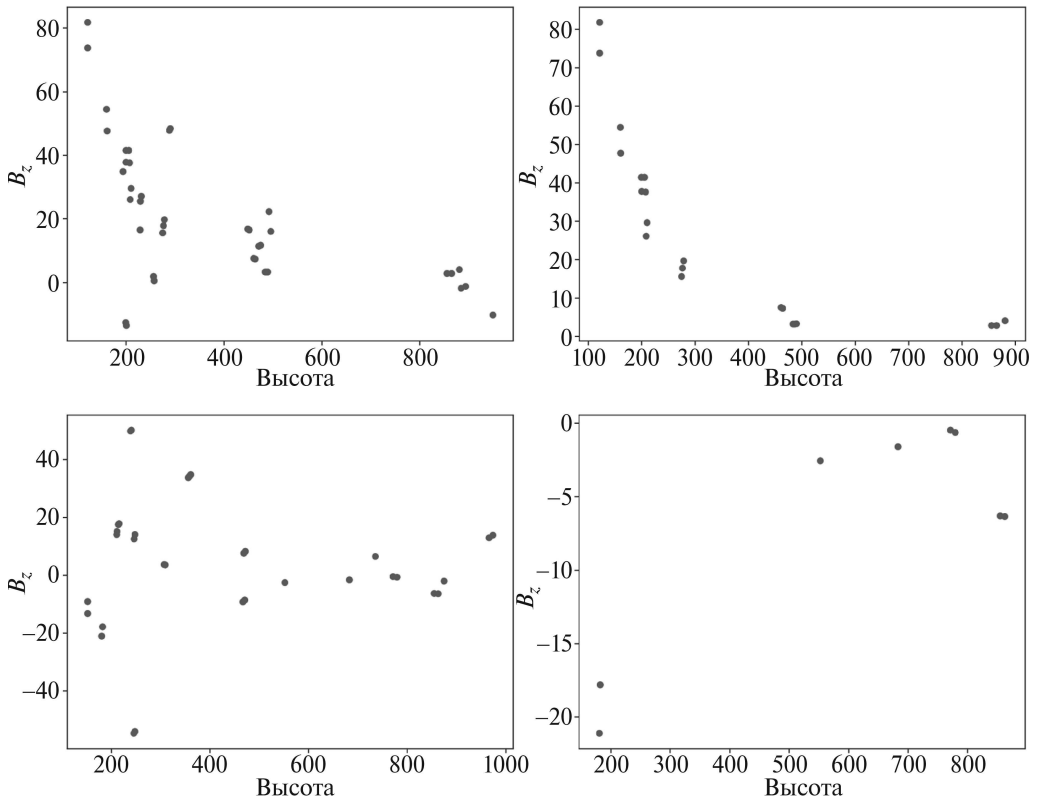


Рис. 4. Сверху – измерения вертикальной компоненты магнитного поля (B_z) над точкой с координатами 0° с.ш., 0° в.д. ($+0,5^\circ$) до высоты 1000 км. Снизу – аналогичные измерения, выполненные над местом посадки миссии InSight. Слева – ночные и дневные измерения, справа – только ночные.

Дневные данные, напротив, могут быть существенно искажены под воздействием солнечной активности, такой как солнечные вспышки. Дополнительный вклад вносят токи, генерируемые в ионосфере Марса под воздействием солнечного излучения. Ограничение выборки ночными данными минимизирует влияние этих факторов.

Следуя рекомендациям, данным в [12], определяем ночные данные как измерения, полученные в период с 19:00 до 5:00 по местному времени космического аппарата. В работе [15], посвященной анализу магнитного поля в месте посадки миссии InSight, авторы используют более узкий временной интервал – с 20:00 до 4:00 – для еще более строгой минимизации вклада внешних полей. Однако использование более узкого временного окна существенно сокращает объем доступных данных, что негативно влияет на статистическую значимость и репрезентативность выборки. В целом, строгая временная селекция может привести к исключению важных измерений на низких высотах, важных для более точного моделирования литосферного магнитного поля.

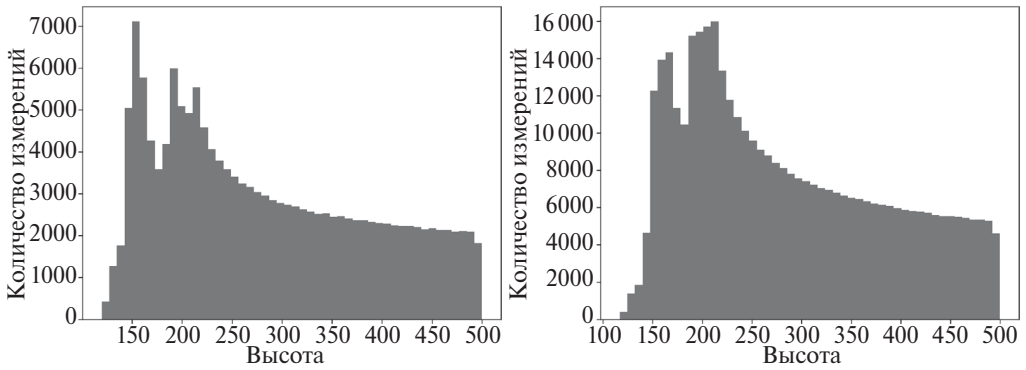


Рис. 5. Частотное распределение высот наблюдений над выбранной исследуемой областью. Слева – для ночных данных, справа – все данные.

В работе приоритет отдается данным, собранным на малых высотах, поскольку они играют ключевую роль в создании высокоразрешающих и точных моделей магнитного поля литосферы Марса. Измерения на низких высотах производятся ближе к источникам магнитного поля, что позволяет более детально выявить и охарактеризовать мелкомасштабные магнитные аномалии и структурные особенности поля.

При формировании выборки с использованием как ночных, так и дневных данных для каждого узла сетки было обнаружено как минимум одно измерение на высоте до 500 км. При ограничении выборки только ночными данными, доля узлов без привязанных значений составила 0,2% (31 из 14 641) для выбранной области.

Из гистограммы на рис. 5 видно, что вследствие эллиптической орбиты космического аппарата MAVEN наибольшая частота измерений в исследуемой области сконцентрирована на высотах, близких к поверхности планеты. Отчетливо выделяются два характерных пика распределения – около 150 и 190 км.

При решении обратной задачи с использованием алгоритма S-аппроксимаций оптимальным является выбор данных измерений, полученных на наиболее близких высотах. С учетом этого требования были сформированы три различные выборки данных: на минимальных зарегистрированных высотах; на высотах, наиболее близких к моде распределения высот над узлами сетки (~150 км); на высотах, соответствующих второму пику частоты измерений, наблюдаемому на гистограмме распределения (~190 км). Рисунок 6 иллюстрирует пространственное распределение высот для каждой из этих выборок. Сверху – распределение минимальных высот, посередине – распределение высот, ближайших к моде распределения 150 км, снизу – распределение высот, ближайших ко второму пику частоты измерений 190 км. Слева – с использованием как ночных, так и дневных данных, справа – с использованием только ночных данных. Данное представление позволяет оценить верти-

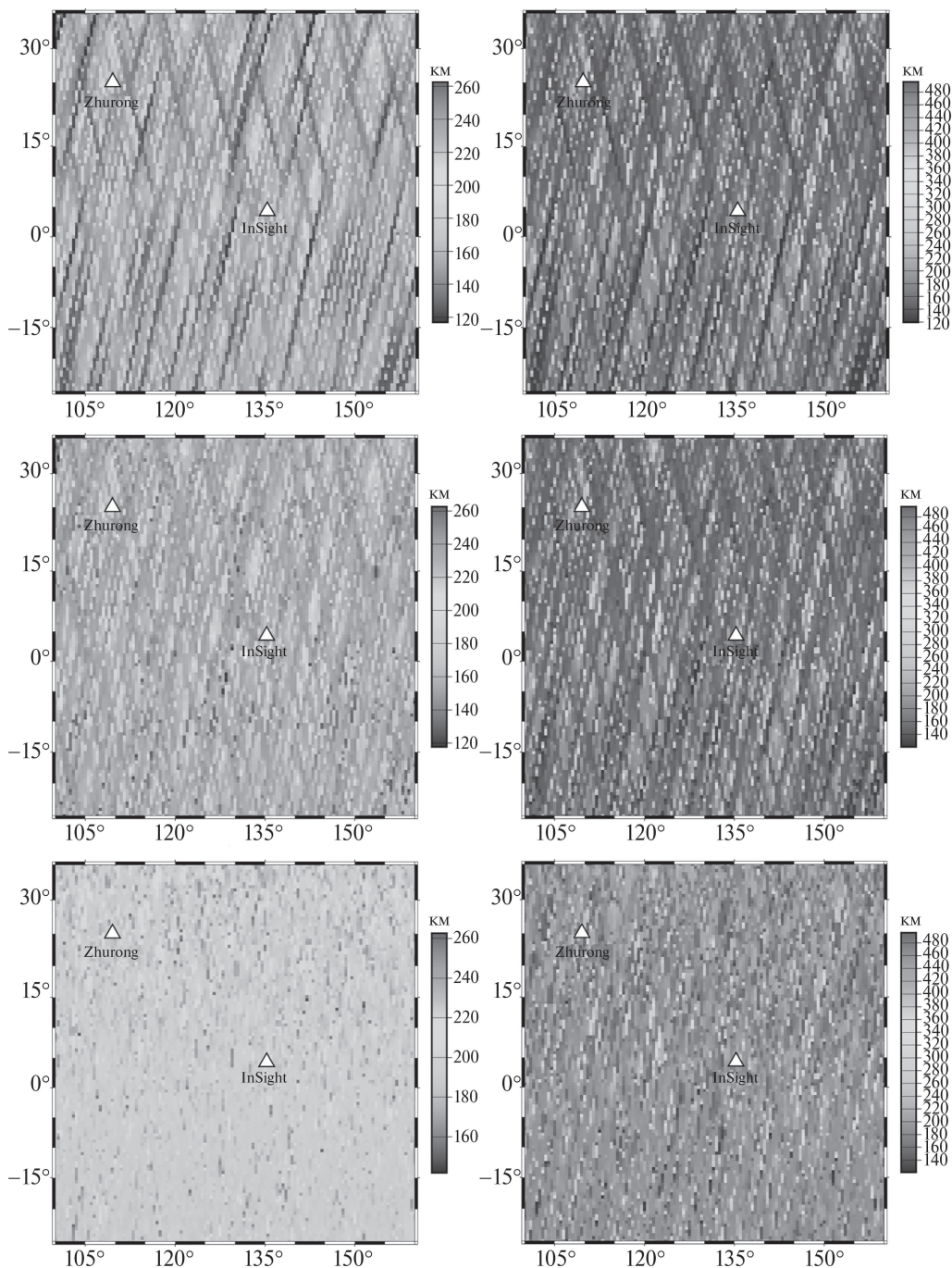


Рис. 6. Карты высот измерений для различных выборок данных.

кальную структуру измерений и ее вариации в зависимости от выбранного критерия селекции данных. Рисунок 7 демонстрирует значения измеренной напряженности магнитного поля на высотах, соответствующих выборкам,

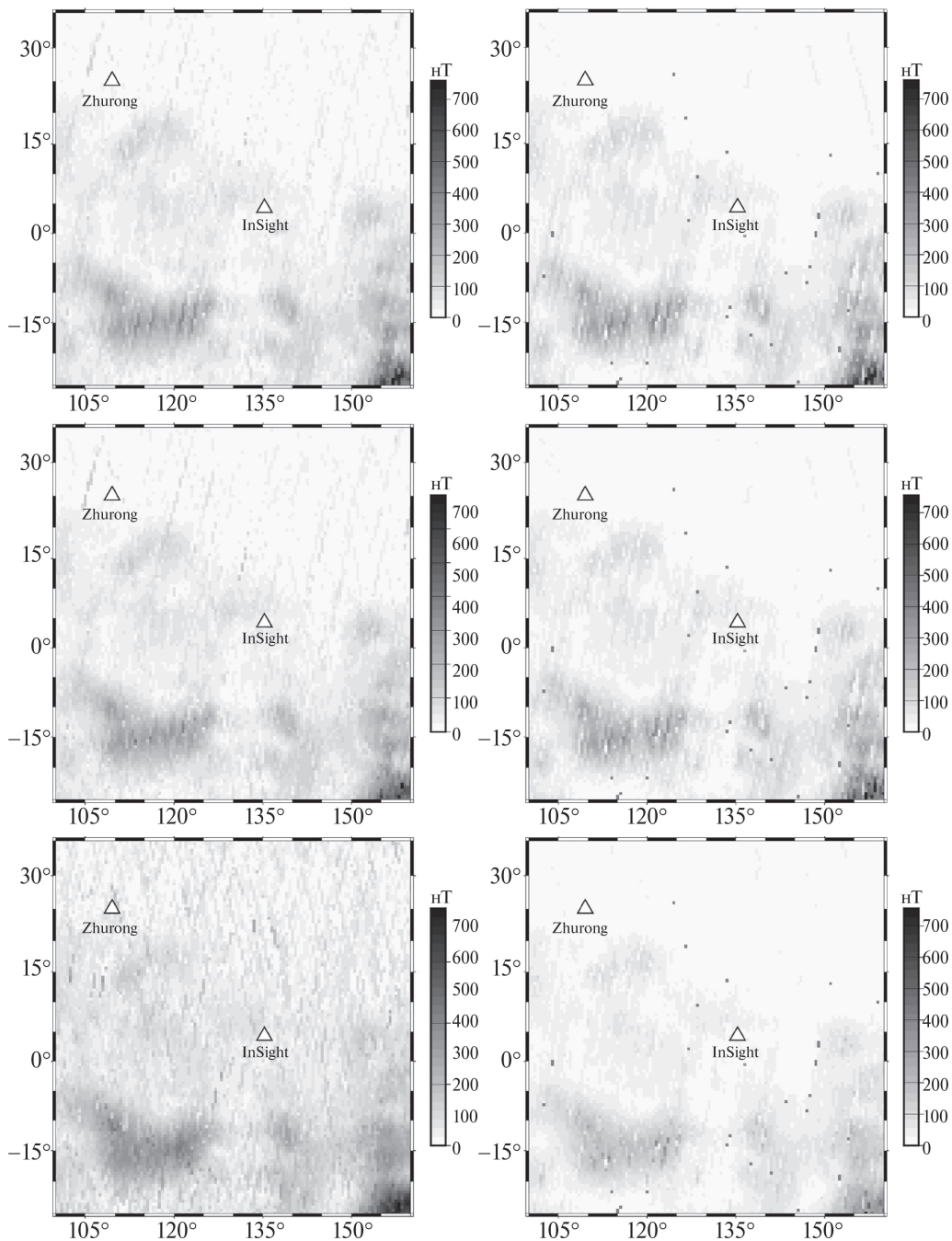


Рис. 7. Интенсивность магнитного поля в зависимости от выбранного критерия высоты измерений.

представленным на рис. 6, с учетом различных критериев отбора по высоте. Это позволяет визуализировать пространственные вариации магнитного поля и оценить влияние высоты измерений на регистрируемые значения. Такой

подход к формированию выборок обеспечивает возможность сравнительного анализа магнитного поля на различных высотных уровнях, что важно для корректной интерпретации данных.

6. Результаты аппроксимации

Ключевыми параметрами, определяющими модель аномального магнитного поля, полученную методом S-аппроксимаций, являлись радиусы аномалии. Эксперименты проводились с варьированием глубины расположения сфер под поверхностью идеализированной сферической планеты радиусом 3393,5 км в диапазоне от 0,1 км до 50,0 км. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о высокой точности аппроксимации аномального магнитного поля методом S-аппроксимаций. В таблице приведены данные результатов аппроксимации для различных выборок, полученных при залегании источников магнитного поля на глубинах 20 и 40 км. В экспериментах с аббревиатурой «DN» использовались как ночные, так и дневные данные, «N» – только ночные данные. Везде индекс качества решения равен

$$\Delta = \frac{\|A\lambda - f_\delta\|}{\|f_\delta\|} < 10^{-8},$$

среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_0 = RMSE = \frac{\|A\lambda - f_\delta\|}{\sqrt{N}} < 10^{-8},$$

$$\sigma_{\min} = \min |A\lambda - f_\delta|,$$

$$\sigma_{\max} = \max |A\lambda - f_\delta|.$$

Здесь $\|f_\delta\|$ – евклидова норма, N – количество точек, σ_{\min} – минимальное абсолютное значение ошибки, σ_{\max} – максимальное абсолютное значение ошибки. Среднеквадратические отклонения данных от аналитической аппроксимации для представленных в таблице выборок приведены на рис. 8. Сверху – для минимальных высот измерений, посередине – для высот, наиболее близких к моде распределения высот над узлами сетки (150 км), снизу – наиболее близких к 190 км. Слева – используются и ночные, и дневные данные, справа – только ночные.

Результат аппроксимации для различных выборок данных

Эксперимент	Число точек N	σ_0	σ_{\min}	σ_{\max}	Δ
DN-min	14641	8,371e-09	1,662e-12	3,211e-08	1,858e-10
DN-150	14641	8,283e-09	6,341e-13	3,489e-08	1,935e-10
DN-190	14641	8,519e-09	1,570e-12	3,480e-08	2,484e-10
N-min	14610	3,902e-09	4,423e-13	1,756e-08	9,839e-11
N-150	14610	4,259e-09	1,065e-13	1,730e-08	1,117e-10
N-190	14610	3,149e-09	1,900e-13	1,423e-08	1,067e-10

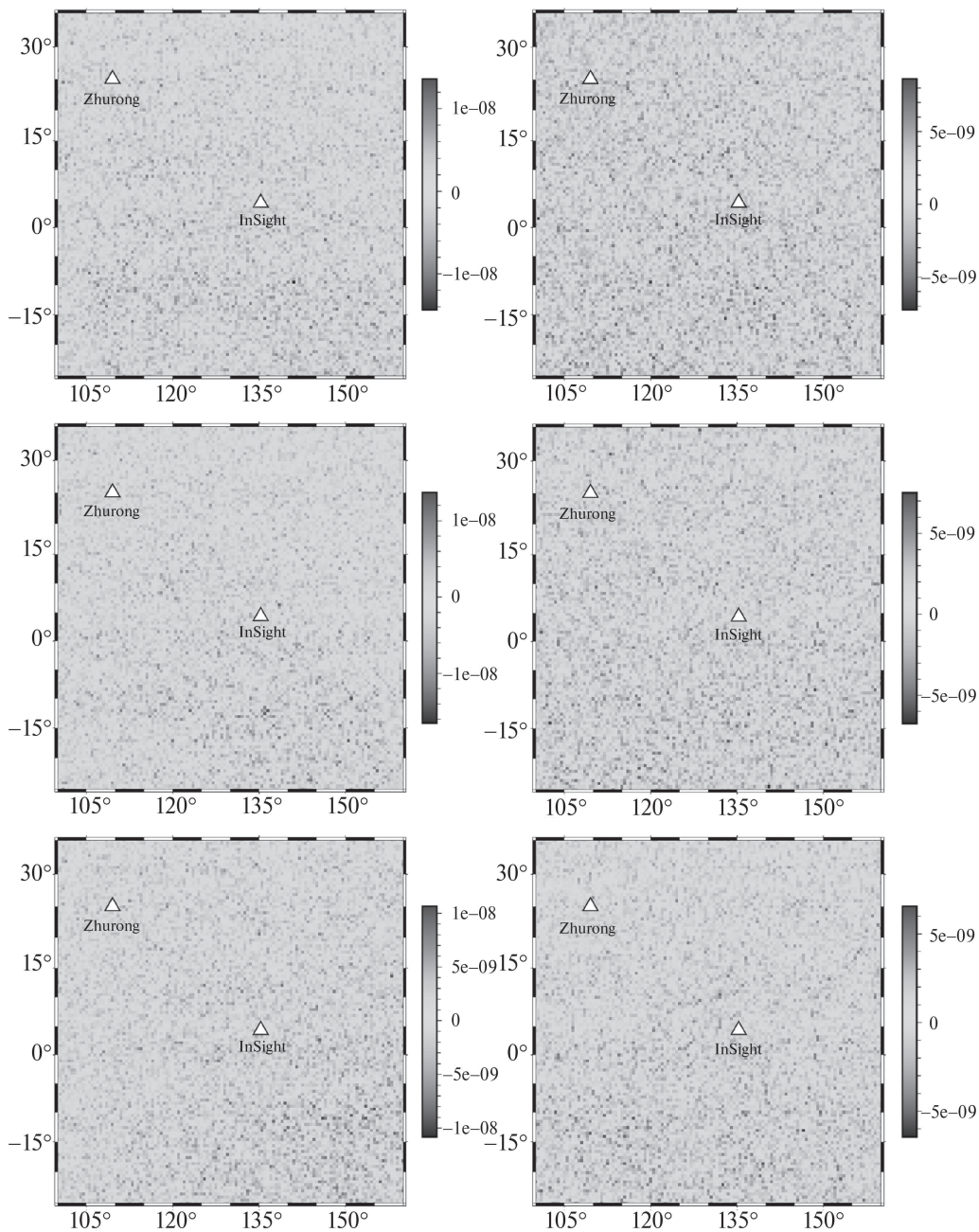


Рис. 8. Среднеквадратические отклонения данных от аналитической аппроксимации для представленных в таблице выборок.

Приведение магнитного поля к единой высоте методом S-аппроксимаций представляет собой сложную, но важную задачу. В данной работе осуществлялось аналитическое продолжение компонент измеренного магнитного поля

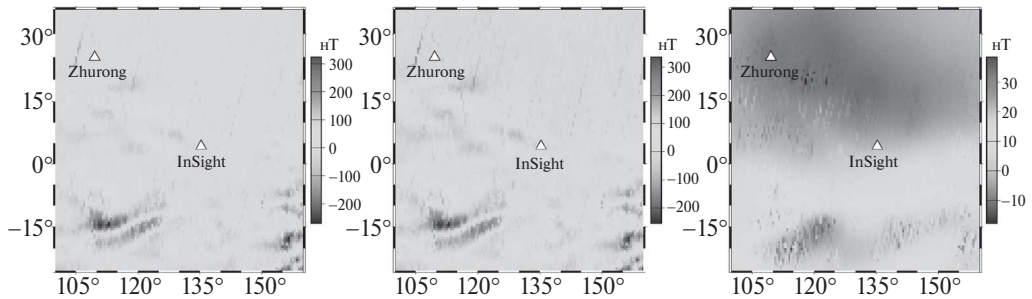


Рис. 9. Сравнение исходных данных и результата аналитического продолжения.

на высотах, близких к моде распределения 150 км, до единой высоты 150 км. Результаты поточечного аналитического продолжения поля на единую высоту 150 км представлены на рис. 9, где также приведено сравнение с моделью, предложенной в [12]. Слева – исходные измерения B_r на высотах, наиболее близких к 150 км, в центре – аналитическое продолжение поля B_r на единую высоту 150 км с помощью регионального метода S-аппроксимаций, справа – разница между исходными данными и результатом продолжения.

7. Заключение

В настоящей работе была проведена детальная обработка и анализ данных измерений магнитного поля Марса, полученных космическим аппаратом MAVEN. Были сформированы различные выборки данных, включая ночные и дневные измерения, на различных высотах. Проведенное исследование демонстрирует важность тщательного подхода к выбору и предварительной обработке данных спутниковых измерений при моделировании магнитного поля планеты. Ограничение выборки ночными данными значительно улучшает соотношение сигнал/шум, что особенно важно для исследования слабых магнитных аномалий. Однако это приводит к уменьшению общего количества доступных данных, что может быть ограничивающим фактором при построении глобальных моделей магнитного поля. Полученные результаты подчеркивают важность тщательного подхода к формированию выборок данных при построении глобальных моделей магнитного поля планеты. Учет особенностей орбиты космического аппарата, временных вариаций магнитного поля и характерных высот измерений позволяет повысить качество и достоверность получаемых моделей.

Полученные результаты демонстрируют, что метод S-аппроксимаций является эффективным инструментом для моделирования магнитного поля Марса. Среднеквадратические отклонения модели от измерений составляют менее 10^{-8} нТл, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации аномального магнитного поля при различных параметрах модели и критериях выборки данных. Аналитическое продолжение магнитного поля на единую

высоту позволяет получить согласованную региональную модель поля, сопоставимую с существующими глобальными моделями. Важным аспектом является выбранная глубина залегания источников магнитного поля. В данной работе были рассмотрены глубины 20 и 40 км, что соответствует предположениям о расположении магнитных аномалий в литосфере Марса. Результаты вычислений также показали, что метод S-аппроксимаций позволяет адекватно моделировать поле при различных глубинах источников.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку оптимальных стратегий комбинирования данных из различных выборок, расширение области моделирования и создание детальной глобальной модели магнитного поля Марса, а также на интеграцию данных измерений миссий MGS и MAVEN для повышения пространственного и временного охвата измерений. Отдельно необходимо проводить сопоставление аналитических продолжений магнитного поля, полученных методом S-аппроксимаций, на поверхность планеты с результатами наземных измерений и данными о геологическом строении планеты. Комбинирование выборок данных, полученных по различным критериям, может обеспечить более полное представление о структуре и вариациях магнитного поля на различных масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Acuña M.H.* Space-based magnetometers // *Rev. Scientific Instrum.* 2002. V. 73. No. 11. P. 3717–3736.
2. *Breus T.K., Verigin M.I., Kotova G.A., et al.* Characteristics of the Martian Magnetosphere according to the Data of the Mars 3 and Phobos 2 Satellites: Comparison with MGS and MAVEN Results // *Cosmic Res.* 2021. V. 59. No. 6. P. 478–492.
3. *Langlais B., Purucker M.E., Mandea M.* Crustal magnetic field of Mars // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. No. E02008.
4. *Acuña M.H.* The magnetic field of Mars // *Leading Edge.* 2003. V. 22. No. 8. P. 769–771.
5. *Arkani-Hamed J.* Magnetization of Martian lower crust: Revisited // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. No. E5. 2006JE002824.
6. *Cain J.C., Ferguson B.B., Mozzoni D.* An $n = 90$ internal potential function of the Martian crustal magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. No. E2. 5008.
7. *Chiao L., Lin J., Gung Y.* Crustal magnetization equivalent source model of Mars constructed from a hierarchical multiresolution inversion of the Mars Global Surveyor data // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. No. E12010.
8. *Lillis R.J., Frey H.V., Manga M.* Rapid decrease in Martian crustal magnetization in the Noachian era: Implications for the dynamo and climate of early Mars // *Geop. Res. Lett.* John Wiley & Sons, Ltd, 2008. V. 35. No. L14203.
9. *Morschhauser A., Lesur V., Grott M.* A spherical harmonic model of the lithospheric magnetic field of Mars // *J. Geophys. Res.: Planets.* John Wiley & Sons, Ltd, 2014. V. 119. No. 6. P. 1162–1188.
10. *Purucker M., Ravat D., Frey H., et al.* An altitude-normalized magnetic map of Mars and its interpretation // *Geop. Res. Lett.* 2000. V. 27. No. 16. P. 2449–2452.

11. *Whaler K.A., Purucker M.E.* A spatially continuous magnetization model for Mars // *J. Geophys. Res.: Planets.* John Wiley & Sons, Ltd, 2005. V. 110. No. E9.
12. *Langlais B., Thébaud E., Houliéz A., et al.* A New Model of the Crustal Magnetic Field of Mars Using MGS and MAVEN // *JGR Planets.* 2019. V. 124. No. 6. P. 1542–1569.
13. *Mittelholz A., Johnson C.L., Morschhauser A.A.* A New Magnetic Field Activity Proxy for Mars From MAVEN Data // *Geop. Res. Lett.* 2018. V. 45. No. 12. P. 5899–5907.
14. *Gao J.W., Rong Z.J., Klinger L., et al.* A Spherical Harmonic Martian Crustal Magnetic Field Model Combining Data Sets of MAVEN and MGS // *Earth Space Science.* 2021. V. 8. No. 10. e2021EA001860.
15. *Johnson C.L., Mittelholz A., Langlais B., et al.* Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars // *Nature Geoscience.* 2020. V. 13. No. 3. P. 199–204.
16. *Du A., Ge Y., Wang H. et al.* Ground magnetic survey on Mars from the Zhurong rover // *Nature Astronomy.* 2023. V. 7. No. 9. P. 1037–1047.
17. *Langlais B., Lesur V., Purucker M.E., et al.* Crustal Magnetic Fields of Terrestrial Planets // *Space Sci Rev.* 2010. V. 152. No. 1-4. P. 223–249.
18. *Delcourt T., Mittelholz A.* A new model of the lithospheric magnetic field of Mars using a physics-informed neural network // *Tenth International Conference on Mars 2024 (LPI Contrib. No. 3007).*
19. *Strakhov V.N., Stepanova I.E.* Solution of gravity problems by the S-approximation method (regional version) // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2002. V. 38. No. 7. P. 535–544.
20. *Stepanova I.E.* On the S-approximation of the Earth’s gravity field: regional version // *Inverse Problems in Science and Engineering.* 2009. V. 17. No. 8. P. 1095–1111.
21. *Stepanova I.E., Salnikov A.M., Gudkova T.V., et al.* On finding the analytical continuation of the magnetic field of Mars from satellite data using a combined approach // *Geop. Res.* 2023. V. 24. No. 2. P. 58–83.
22. *Carlson B.C.* Computing elliptic integrals by duplication // *Numer. Math.* 1979. V. 33. No. 1. P. 1–16.
23. The Planetary Plasma Interactions (PPI) Node of the Planetary Data System (PDS) <https://search-pdspi.igpp.ucla.edu>.
24. *Langlais B., Civet F., Thebaud E.* In situ and remote characterization of the external field temporal variations at Mars // *J. Geophys. Res.: Planets.* John Wiley & Sons, Ltd, 2017. V. 122. No. 1. P. 110–123.
25. *Mittelholz A., Johnson C.L., Lillis R.J.* Global-scale external magnetic fields at Mars measured at satellite altitude // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2017. V. 122. No. 6. P. 1243–1257.
26. *Mittelholz A., Johnson C.L., Fillingim M., et al.* Mars’ External Magnetic Field as Seen From the Surface With InSight // *J. Geophys. Res.: Planets.* John Wiley & Sons, Ltd, 2023. V. 128. No. 1. e2022JE007616.
27. *Malkin Z.* A New Equal-area Isolatitudinal Grid on a Spherical Surface // *AJ.* 2019. V. 158. No. 4. P. 158.

28. Du A., Ge Y., Wang H., et al. 1. Golombek M., Kass D., Williams N., et al. Assessment of InSight Landing Site Predictions // J. Geophys. Res.: Planets. John Wiley & Sons, Ltd, 2020. V. 125. No. 8. e2020JE006502.
29. “Tianwen-1 Lander and Zhurong Rover in Southern Utopia Planitia (ESP_069665_2055)”. https://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_069665_2055.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галляевым.

Поступила в редакцию 05.06.2024

После доработки 22.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024