

На правах рукописи

Прутов Игорь Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ
МНОГОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ И СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)» на кафедре Прикладной экологии и химии.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
первый проректор – проректор по
учебной работе
Малинников Василий Александрович

Официальные оппоненты: Нейман Юрий Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
Московский государственный университет
геодезии и картографии,
кафедра высшей математики,
заведующий кафедрой

Никольский Анатолий Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный гуманитарно-
экономический институт,
кафедра прикладной математики и
информатики, профессор кафедры

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт
точных приборов» (ОАО «НИИ ТП»)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2013 года в __ часов на
заседании диссертационного совета Д.212.143.01 при Московском
государственном университете геодезии и картографии по адресу:
105064, г. Москва, Гороховский пер. д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан «__» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степанченко Алексей Леонидович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последние годы значительно вырос интерес к малым телам Солнечной системы, таким как астероиды и кометы, а также к малым спутникам планет, имеющим сильно нерегулярную фигуру, таким как Фобос или Деймос. Достаточно вспомнить близкие подлеты космических аппаратов «Gallileo» к астероидам Гаспра (1991 г.) и Ида (1993 г.) (в результате которого был обнаружен спутник Иды — Дактиль), «NEAR Shoemaker» к астероидам Матильда (1996 г.) и Эрос (2000–2001 гг.) или «Deep Space 1» к астероиду Брайль (1999 г.), а также автоматическую межпланетную станцию «Фобос Грунт», целью которой должно было стать исследование спутника Марса Фобоса.

При подготовке и планировании миссий необходимо иметь представление об объекте исследования, траектории его движения и прочих физических параметрах. Также необходимо учитывать влияние гравитационного поля при близких подлетах к небесному телу. Планирование и реализация миссий выявили множество особенностей процесса моделирования гравитационных полей малых небесных тел. Перечислим наиболее важные из них:

- высокие требования к вычислительным ресурсам, необходимым для моделирования гравитационного поля небесного тела по мере сближения с ним, в особенности в условиях слабой изученности фигуры, строения и гравитационного поля исследуемого небесного тела;
- необходимость быстрой оценки гравитационных сил в любой точке на поверхности и над поверхностью небесного тела, в том числе построения локальных моделей, адекватно отражающих существующие возмущения в гравитационном поле малых небесных тел.

Так как гравитационное поле непосредственно зависит от формы небесного тела, моделирование поверхности играет большую роль в подготовке миссий. Также при подготовке миссий с последующей посадкой космического аппарата на исследуемое небесное тело необходимо определить место для посадки, и эта задача может быть упрощена, если будет создана модель, корректно отражающая все особенности рельефа. С другой стороны, данные об объектах исследования, очень часто бывают недостаточными для создания «хорошей» модели. Таким образом, поиск и применение наиболее оптимальной методики построения модели поверхности малых небесных тел или спутников планет Солнечной системы является очень важной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методики построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ методик моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет;
- оценить достоинства и недостатки существующих методик моделирования поверхности малых небесных тел;
- разработать методику многомасштабного моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет;
- построить многомасштабные модели поверхности Фобоса и Деймоса;
- создать рабочие модели полей притяжения Фобоса и Деймоса, основанные на многомасштабном моделировании их поверхности.

Объектом диссертационного исследования являются малые небесные тела и спутники планет Солнечной системы.

Предметом диссертационного исследования является разработка методики построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет Солнечной системы.

Методы исследования. Для достижения цели и решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, теория вейвлет-анализа и статистического анализа, теория обработки сигналов. Для расчетов и моделирования использовался пакет MATLAB. Для визуализации разработанных моделей использовался пакет MeshLab, распространяемый бесплатно. Также для вычислений использовалось программное обеспечение, разработанное автором в среде Microsoft Visual Studio 2010 с применением библиотек Microsoft DirectX 9.0.

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие научные результаты:

- В разработанной автором методике построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет, впервые использованы вейвлеты второго поколения и мультивейвлеты Альперта. Модель поверхности, построенная с помощью разработанной методики, более корректно отражает особенности рельефа.
- Впервые разработаны рабочие модели полей притяжения Фобоса и Деймоса, основанные на многомасштабном моделировании их поверхности. Предложенные алгоритмы расчета позволяют производить быстрый перерасчет модели при появлении новых или изменении старых исходных данных.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования разработанной методики при планировании космических миссий на малые небесные тела Солнечной системы для расчета посадочных площадок космических аппаратов, а также для быстрого перерасчета гравитационного поля вблизи малых небесных тел при появлении новых данных.

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработана методика построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет, основанная на использовании вейвлетов второго поколения и мультивейвлетов Альперта.
2. Созданы многомасштабные модели поверхности Фобоса и Деймоса.
3. Разработаны рабочие модели полей притяжения Фобоса и Деймоса, основанные на многомасштабном моделировании их поверхности.

Апробация работы. Основные результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на: на 66-ой, 67-ой научно-технической конференциях аспирантов и молодых ученых МИИГАиК; первом Сербском геодезическом конгрессе (2011 г.); семинаре по исследованию Марса в институте геологических и геохимических исследований в Будапеште (2012 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях, 4 из которых опубликованы в рецензируемом научном журнале, рекомендованном ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения. Материал диссертационной работы изложен на 107 страницах машинописного текста, содержит 15 таблиц, 33 рисунков. Список использованной литературы состоит из 111 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи работы, показаны её научная новизна и практическая значимость.

Глава 1. Анализ методик моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет Солнечной системы

В первой главе проводится анализ и оценка существующих методик моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет

Солнечной системы. Показано, что существующие методики моделирования можно разделить на три группы:

1. методики, основанные на моделировании поверхности простыми геометрическими фигурами;
2. методики, основанные на сеточной аппроксимации исходного набора контрольных точек;
3. методики, основанные на разложении функции заданной на поверхности тела в ряд по сферическим гармоникам.

В ходе обзора материала по изучаемой проблеме были выявлены недостатки существующих методик моделирования. Так, например, выявлено, что моделирование поверхности простым трехосным эллипсоидом не отражает все особенности рельефа, и такое моделирование не может быть использовано для точных расчетов параметров движения и гравитационного поля небесного тела.

Численное моделирование, основанное на аппроксимации исходных контрольных точек в узлы регулярной сети, будет адекватно отражать особенности рельефа только в том случае, если исходные данные распределены равномерно по всей поверхности. Но такое распределение данных возможно далеко не всегда. Также по сравнению с аналитическими моделями, технология хранения модельных параметров требует большого объема памяти.

Методика аналитического моделирования, основанная на разложении функции заданной на поверхности тела в ряд по сферическим гармоникам, является очень распространенной для решения такого рода задач, но и она в свою очередь, также обладает недостатками. При таком моделировании существует предельное минимальное пространственное разрешение модели, количественно определяемое максимальной степенью и порядком сферических гармоник. Причем при высокой нерегулярности используемой опорной сети данный предел, как правило, достигается значительно раньше, чем минимальное пространственное разрешение модели начнет отражать

особенности рельефа и гравитационного поля исследуемого небесного тела. Данная ситуация, осложняется еще и тем, что сферические гармоники имеют существенные недостатки, препятствующие их эффективному применению для моделирования форм и гравитационных полей небесных тел, имеющих сильно нерегулярную форму, таких как Фобос и Деймос. Также сферические гармоники – это функции с глобальной поддержкой, а это означает, что при изменении или добавлении какой-либо исходной информации, необходимо будет пересчитывать всю модель.

Таблица 1

Преимущества и недостатки существующих методик моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет

Методика моделирования	Достоинства методики моделирования	Недостатки методики моделирования
методика, основанная на моделировании поверхности простыми геометрическими фигурами	простота создания модели и дальнейших вычислений физических параметров, основанных на модели поверхности тела	модель, построенная на основе представления тела простой геометрической фигурой, не отражает особенностей рельефа поверхности
методика, основанная на сеточной аппроксимации исходного набора контрольных точек	сравнительно простой алгоритм построения модели поверхности; модель хорошо отражает особенности рельефа при равномерном распределении исходных данных	технология хранения модельных параметров требует большого объема памяти, что оказывается крайне неудобным как при непосредственном использовании модели, так и при ее дальнейшей

		обработке
методика, основанная на разложении функции, заданной на поверхности тела, в ряд по сферическим гармоникам	созданная таким методом модель хорошо отражает особенности рельефа, если форма небесного тела близка к сферической	существует предельное минимальное пространственное разрешение модели, количественно определяемое максимальной степенью и порядком сферических гармоник; гармонические функции обладают глобальной поддержкой

Таким образом, обзор литературы показал, что существует необходимость в разработке новой методики моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет Солнечной системы, которая будет обладать преимуществами существующих методик, и не будет иметь их недостатков.

Глава 2. Методика построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет Солнечной системы на основе вейвлет-анализа

Во второй главе работы приводится описание предлагаемой методики построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет Солнечной системы на основе кратномасштабного вейвлет-анализа (рис. 2.1):

- на основе использовании вейвлетов второго поколения;
- на основе использовании мультивейвлетов Альперта.



Рис. 2.1. Общая схема разработанной методики построения многомасштабных моделей поверхности малых небесных тел и спутников планет Солнечной системы на основе кратномасштабного вейвлет-анализа

Из теории вейвлет-анализа известно, что функция $\phi(t)$ называется масштабируемой (скейлинговой), если она удовлетворяет дилатационному уравнению $\phi(t) = \sum_k C_k \phi(2t - k)$, где $k \in Z$, а C_k — множество коэффициентов. При этом скейлинговая функция может породить кратномасштабный анализ (КМА), если:

- переносы $\phi(t - k)$ линейно независимы и формируют базис в подпространстве V_0 ;
- дилатации $\phi(2^j t - k)$ порождают подпространства V_j , $j \in Z$, такие, что

$$\dots V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \dots \subset V_j \subset \dots,$$

$$\overline{\bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j} = L^2(R^d),$$

$$\bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\};$$

- существует вейвлет-функция (вейвлет) $w(t)$, такая, что ее переносы $w(t - k)$ линейно независимы и образуют базис подпространства W_0 :

$$V_1 = V_0 \oplus W_0.$$

Методика, на основе вейвлетов второго поколения базируется на использовании вейвлетов второго поколения, предложенных в работах Шредера П. и Свелденса В.

Основные этапы методики кратномасштабного моделирования поверхности небесных тел, основанной на использовании вейвлетов второго поколения:

1. построение опорной сети контрольных точек, путем фотограмметрической обработки стереоизображений;
2. построение, на основе исходного набора точек, опорной сети модели поверхности небесного тела в форме многогранника;
3. выбор максимального уровня подразделения и подразделение полуправильного или правильного многогранника, построенного на предыдущем этапе в соответствии с выбранной схемой подразделения

до выбранного уровня;

4. вычисление скейлинговых и вейвлет-коэффициентов сигнала, заданного в вершинах многогранника, на каждом уровне подразделения.

Вейвлеты второго поколения могут быть сконструированы с помощью каскадного алгоритма, базирующегося на схемах подразделения сигнала, заданного в узлах полуправильных или правильных многогранников. Сущность такого рода схем разбиений состоит в построении на основе исходного многогранника, вершины которого лежат на поверхности сферы, производного правильного или полуправильного многогранника с большим числом вершин. Одним из способов построения схемы разбиения является алгоритм построения геодезической сферы, основанный на последовательном делении ребер исходного икосаэдра пополам. Построение вейвлетов производится в вершинах, добавляемых на каждом следующем уровне разбиения таким образом, чтобы множество вейвлет-функций кодировало различия между двумя последовательными разномасштабными уровнями представления исходного сигнала и образовывало базис в пространстве W_j , ортогонально дополняющем пространства V_j в V_{j+1} :

$$W_j \oplus V_j = V_{j+1}, \quad (2.1)$$

где V_j и V_{j+1} — пространства функций, заданных на вершинах уровня разбиения j и $j+1$ соответственно. Таким образом, вейвлеты, построенные на каждом уровне разбиения, могут быть записаны как линейная комбинация базисных вейвлет-функций на более детальном уровне разбиения исходного многогранника, что обеспечивает высокую скорость расчета вейвлет-функций на каждом уровне разбиения.

Методика, на основе мультивейвлетов Альперта базируется на использовании мультивейвлетов и векторного кратномасштабного анализа, строящегося с их помощью.

В данной работе используются дискретные мультивейвлеты, предложенные в работах Альперта.

Ниже перечислены основные этапы методики кратномасштабного моделирования поверхности малых небесных тел, основанной на использовании мультивейвлетов Альперта:

1. построение сети контрольных точек, путем фотограмметрической обработки стереоизображений;
2. построение на основе исходного набора точек опорной сети, модели поверхности небесного тела в форме многогранника, площади граней которого не отличаются друг от друга более чем в два раза;
3. выбор порядка аппроксимации N ;
4. вычисление вейвлет-коэффициентов для каждой точки исходного набора данных.

Стандартный скалярный кратномасштабный анализ предполагает, что существует только одна скейлинговая функция. В случае векторного кратномасштабного анализа множество подпространств $\{V_j\}_{-\infty}^{\infty}$ из $L^2(\mathbb{R}^d)$, основано на скейлинговых функциях $\phi_0(t-k), \dots, \phi_{r-1}(t-k)$, $k \in \mathbb{Z}$ и аналогично скалярному случаю (при $r=1$), вектор $\phi(t) = [\phi_0(t) \dots \phi_{r-1}(t)]^T$, $r \in \mathbb{N}$, называемый мультискейлинговой функцией, удовлетворяет матричному дилатационному уравнению:

$$\hat{\phi}(t) = \sum_k \mathbf{C}_k \hat{\phi}(2t - k),$$

где \mathbf{C}_k — матрицы скейлинговых коэффициентов размера $r \times r$.

Помимо множества скейлинговых функций в векторном кратномасштабном анализе существует r вейвлетов $w_0(t), \dots, w_{r-1}(t)$, удовлетворяющих матричному вейвлет уравнению

$$\hat{w}(t) = \sum_k \mathbf{D}_k \hat{\phi}(2t - k),$$

где $\hat{w}(t) = [w_0(t) \dots w_{r-1}(t)]^T$ и называется мультивейвлетом, а \mathbf{D}_k — матрицы вейвлет-коэффициентов размера $r \times r$.

Глава 3. Разработка рабочих многомасштабных моделей поверхности Фобоса и Деймоса

В третьей главе даются краткие сведения по Фобосу и Деймосу. Эти небесные тела обладают очень нерегулярной формой и хорошо подходят для апробации разработанной методики.

В работе использовались уже созданные опорные сети для Фобоса, одна из которых была получена Вильнером К. в 2010 году и содержала 665 контрольных точек, но была улучшена и дополнена до 794 точек в Комплексной лаборатории исследования внеземных территорий (КЛИВТ) МИИГАиК. Вторая – получена в 2012 году в КЛИВТ МИИГАиК в результате обработки большого числа космических изображений полученных с различных космических аппаратов, таких как Mars Reconnaissance Orbiter, Viking, Mars Express и содержит 119403 точки, которые расположены практически по всей поверхности Фобоса. Для Деймоса использовалась опорная сеть, данные которой были взяты с интернет-ресурса <http://celestiamotherlode.net/catalog/marsmoons.php>.

С использованием двух описанных в главе 2 подходов к кратномасштабному моделированию по набору опорных точек, включающему свыше 100000 точек, была построена модель поверхности Фобоса. На рисунках продемонстрированы изображения полученной модели в ортографической проекции в различных видах. Для сравнения на этих же изображениях показаны изображения Фобоса Онера Т., полученные с использованием модели формы Томаса П. и отретушированной мозаики с сайта USGS. Как видно из рисунков, построенная модель хорошо отражает многие черты рельефа Фобоса, средние и крупные кратеры, борозды и другие отрицательные формы рельефа. Между тем, недостаточное покрытие поверхности Фобоса стереоизображениями высокого разрешения приводит к

появлению на модельной поверхности областей с более низкими точностными характеристиками (рис. 3.1 в центре). Данные области выглядят подобно искусственным формам рельефа и должны правильно интерпретироваться в процессе анализа.

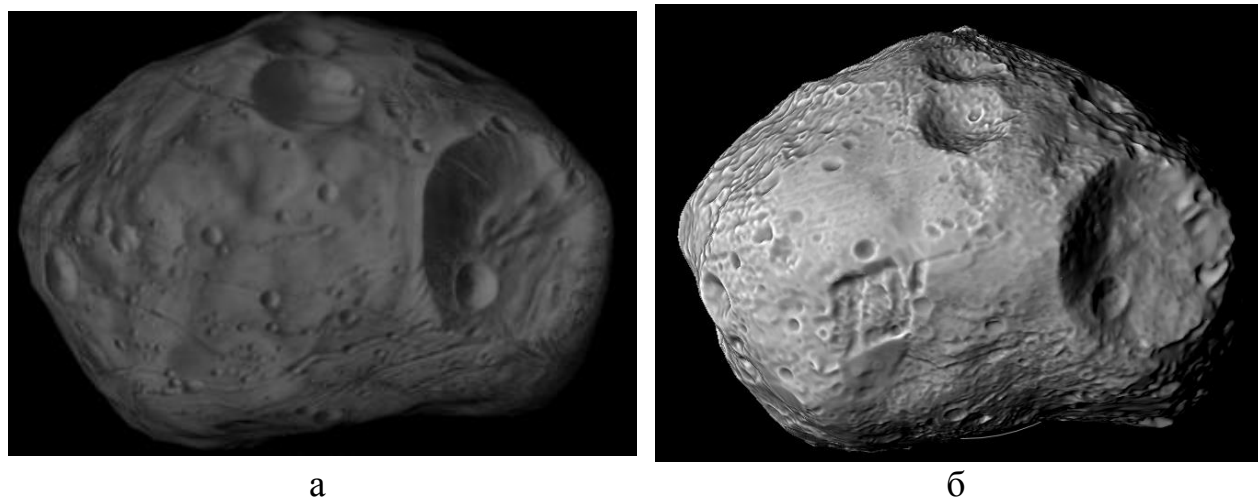


Рис. 3.1. Изображения Фобоса в ортографической проекции (вид на территорию, располагающуюся вдоль меридиана 90°), построенные: а — Онером Т., б — автором

Глава 4. Разработка рабочих моделей полей притяжения Фобоса и Деймоса, основанных на многомасштабном моделировании их поверхности

В четвертой главе представлен результат применения разработанной методики для моделирования полей притяжения Фобоса и Деймоса. Проводится анализ и сравнение уже существующих моделей с моделями, разработанными автором.

Главными силами, участвующими в формировании гравитационных полей Фобоса и Деймоса являются:

- сила притяжения собственного тела марсианской луны, \vec{F}_s ;
- сила притяжения планетной массы Марса, \vec{F}_g ;
- сила, вызванная вращением марсианской луны вокруг общего центра масс в системе Марс — марсианская луна, \vec{F}_ω .

- сила, вызванная вращением марсианской луны вокруг собственной оси вращения, \vec{F}_w .

Здесь под моделированием гравитационных полей марсианских лун подразумевается построение моделей ускорений и потенциалов указанных сил по дискретному набору данных о поверхности марсианских лун. В такой постановке задачи интенсивные исследования гравитационных полей Фобоса и Деймоса начались в эпоху космических спутников и продолжают до сих пор, принося все больше знаний о строении и особенностях гравитационных полей этих марсианских лун.

При этом используется несколько подходов. Одним из них являются радиометрические наблюдения, выполняемые в процессе близких подлетов к данным небесным телам. Одной из последних работ в этом направлении была работа Андерта Г. П. и др., в которой было получено уточненное значение гравитационной константы Фобоса $((0,7127 \pm 0,0021) \cdot 10^{-3} \text{ км}^3 \text{ с}^{-2})$. Главным недостатком данного подхода является необходимость близких подлетов космических аппаратов к исследуемому небесному телу, чего в случае марсианских лун было не так много.

Методика на основе вейвлетов второго поколения

При моделировании потенциала притяжения небесных тел вейвлетами второго поколения применяется аналогичная моделированию поверхности схема, описанная выше в главе 2, только между вторым и третьим этапами добавляется еще один пункт, связанный с расчетом ускорения и потенциала. Таким образом, новая схема состоит из следующих этапов:

1. построение опорной сети контрольных точек, путем фотограмметрической обработки стереоизображений;
2. построение на основе исходного набора точек опорной сети модели поверхности небесного тела в форме многогранника, площади граней которого не отличаются друг от друга более чем в два раза;
3. на основе построенного многогранника вычисление ускорения и

- потенциала притяжения собственной массой тела для каждой вершины построенного многогранника и сохранение рассчитанных значений в качестве сигнала, заданного в вершинах многогранника;
4. выбор максимального уровня подразделения и подразделение полуправильного или правильного многогранника, построенного на предыдущем этапе в соответствии с выбранной схемой подразделения до выбранного уровня;
 5. вычисление скейлинговых и вейвлет-коэффициентов сигнала, заданного в вершинах многогранника, на каждом уровне подразделения.

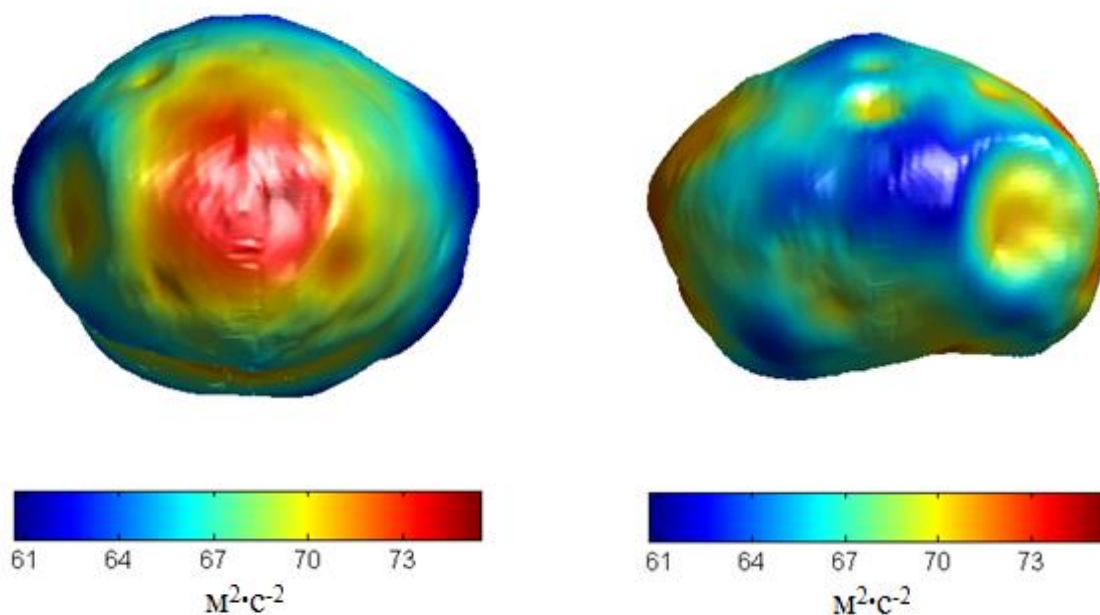


Рис. 4.1. Проекция модели поверхности Фобоса с показанными на них цветом значениями суммарного потенциала. Потенциал притяжения был рассчитан в результате кратномасштабного моделирования с использованием вейвлетов второго поколения

Этапы 1, 2, 4, 5 были описаны выше, на третьем этапе методики производится расчет гравитационного ускорения и потенциала притяжения для каждой вершины многогранника по следующему алгоритму. Опишем

данную процедуру для случая, когда грани многогранника представляют собой треугольники, площади которых отличаются друг от друга не более чем в два раза.

Представим множество вершин многогранника как множество радиус-векторов v_i , проведенных из начала декартовой системы координат, совпадающего с центром масс тела, до i -ой вершины многогранника:

$$V = \{v_i | i = 1..L\},$$

где L — количество вершин многогранника.

В таком случае центры каждой грани можно определить по следующей формуле:

$$\vec{R}_n = (\vec{v}_i + \vec{v}_j + \vec{v}_k) / 3,$$

где $n = 1..M$, M — количество граней в многограннике, i , j и k — номера вершин, принадлежащих грани с номером n .

Каждая грань имеет ориентацию, которая может быть задана с помощью вектора нормали, длина которого равна удвоенной площади грани:

$$\vec{N}_n = (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \times (\vec{v}_k - \vec{v}_i).$$

Тогда, если плотность рассматриваемого тела ρ постоянна во всем объеме небесного тела, гравитационный потенциал и ускорение притяжения в точках v_i , могут быть вычислены соответственно по формулам:

$$U_s(\vec{v}_i) = \frac{G \rho}{4} \sum_{n=1}^M \frac{(\vec{v}_i - \vec{R}_n) \cdot \vec{N}_n}{|\vec{v}_i - \vec{R}_n|},$$

$$\vec{a}_s(\vec{v}_i) = -\frac{G \rho}{4} \sum_{n=1}^M \left[\frac{\vec{N}_n}{|\vec{v}_i - \vec{R}_n|} - \frac{(\vec{v}_i - \vec{R}_n)(\vec{v}_i - \vec{R}_n) \cdot \vec{N}_n}{|\vec{v}_i - \vec{R}_n|^3} \right].$$

Методика на основе мультивейвлетов Альперта

Основные этапы данной методики практически не отличаются от изложенных выше этапов, но между вторым и третьим шагами добавляется

еще один – непосредственно расчет ускорения и потенциала притяжения в каждой точке.

Ниже перечислены основные этапы методики кратномасштабного моделирования ускорения и потенциала притяжения небесных тел, основанной на использовании мультивейвлетов Альперта:

1. построение опорной сети контрольных точек, путем фотограмметрической обработки стереоизображений;
2. построение на основе исходного набора точек опорной сети модели поверхности небесного тела в форме многогранника, площади граней которого не отличаются друг от друга более чем в два раза;
3. на основе построенного многогранника вычисление ускорения и потенциала притяжения собственной массой тела для каждой точки опорной сети;
4. выбор порядка аппроксимации N ;
5. вычисление вейвлет-коэффициентов для каждой точки исходного набора данных.

Все этапы методики, за исключением 3 этапа, полностью повторяют этапы, изложенные в разделе 2.3. Тогда как на третьем этапе выполняется расчет гравитационного ускорения и потенциала притяжения для каждой опорной точки.

На рисунках (рис. 4.4 и рис. 4.5) приведены карты значений потенциала тяжести на поверхности Фобоса и Деймоса, восстановленного из 100% и только части вейвлет-коэффициентов. В обоих случаях вейвлет-коэффициенты были получены с помощью методики, основанной на использовании мультивейвлетов Альперта. Как видно из рисунков, 1% вейвлет-коэффициентов для Фобоса и Деймоса позволяют восстановить модель поля тяжести без существенных потерь. При этом максимальная и средняя ошибка потенциала тяжести в точках опорной сети составили 0,715 и 0,035 м²/с² для Фобоса и 0,955 и 0,111 м²/с² для Деймоса, соответственно.

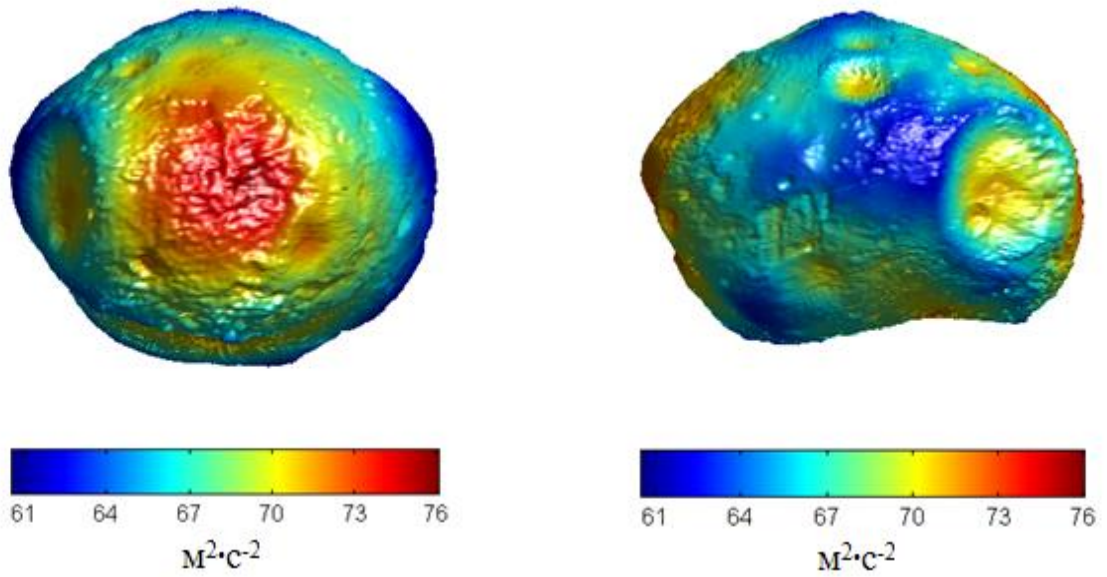


Рис. 4.2. Проекция модели поверхности Фобоса с показанными на них цветом значениями суммарного потенциала. Потенциал притяжения был рассчитан путем кратномасштабного моделирования с использованием мультивейвлетов Альперта

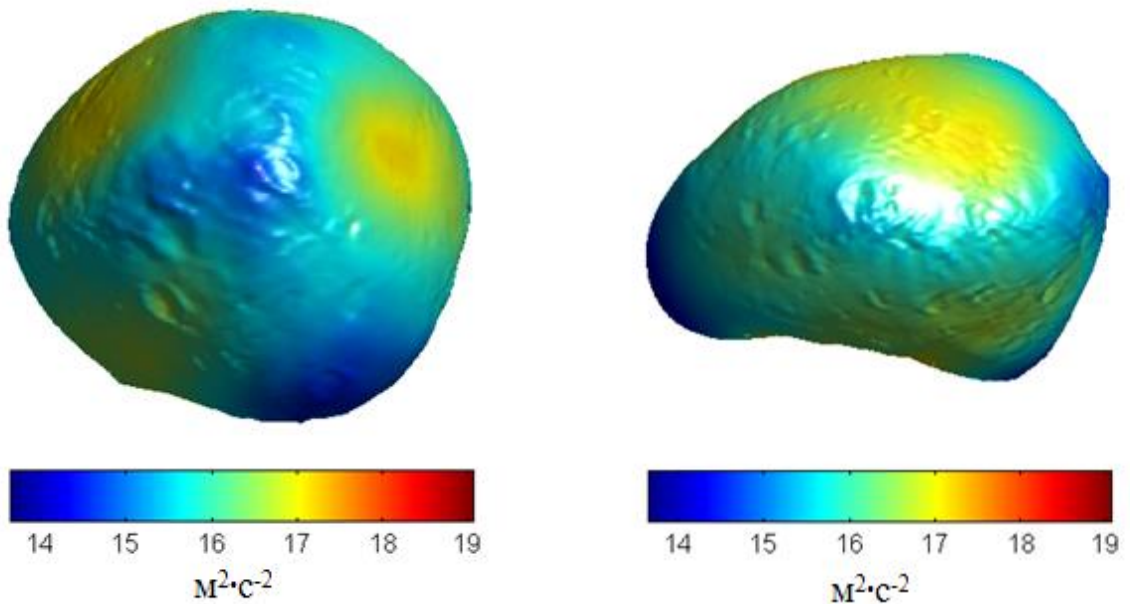
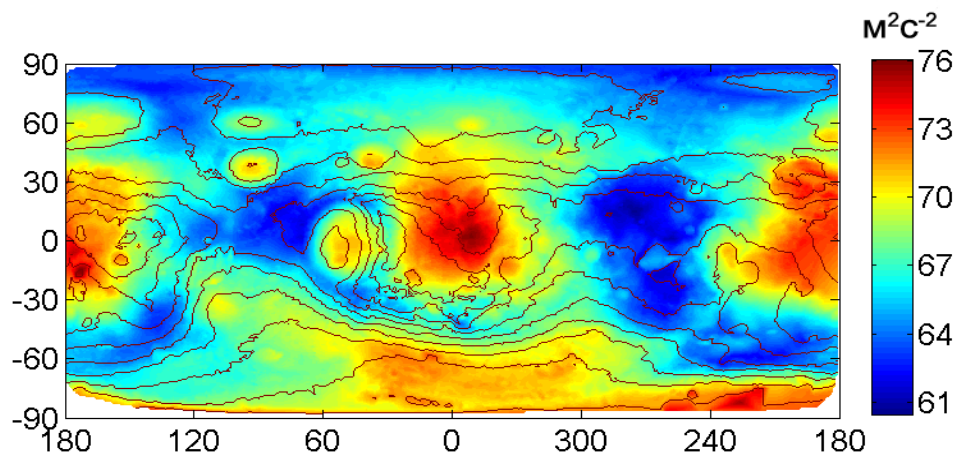
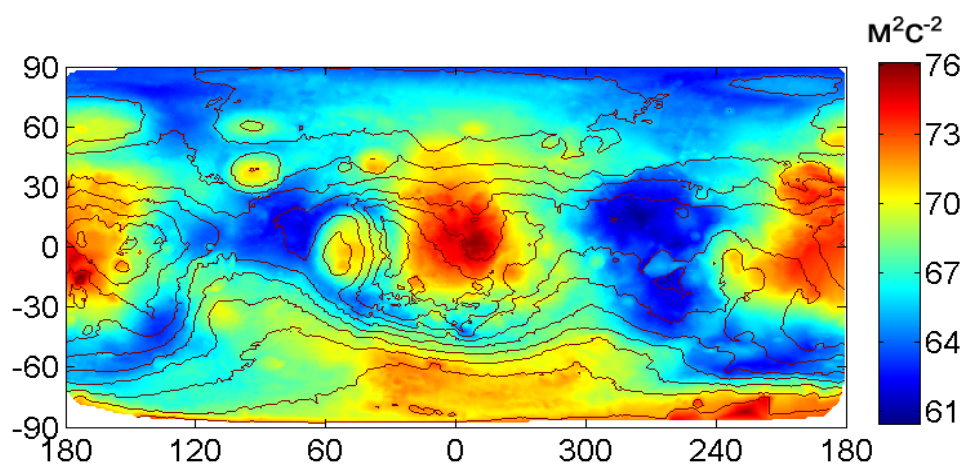


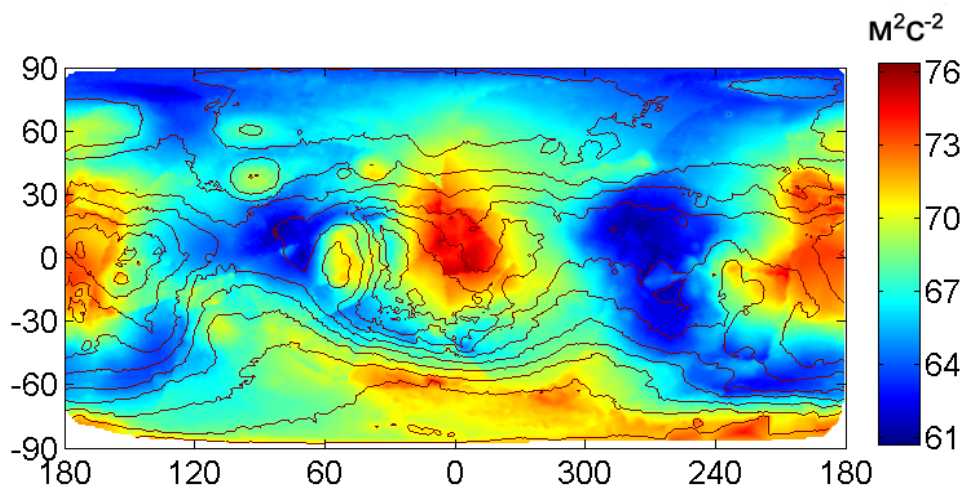
Рис. 4.3. Проекция модели поверхности Деймоса с показанными на них цветом значениями суммарного потенциала. Потенциал притяжения был рассчитан путем кратномасштабного моделирования с использованием мультивейвлетов Альперта



а



б



в

Рис 4.4. Карты значений потенциала тяжести на поверхности Фобоса, построенные с использованием 100% (а), 1% (б) и 0,1% (в) вейвлет-коэффициентов

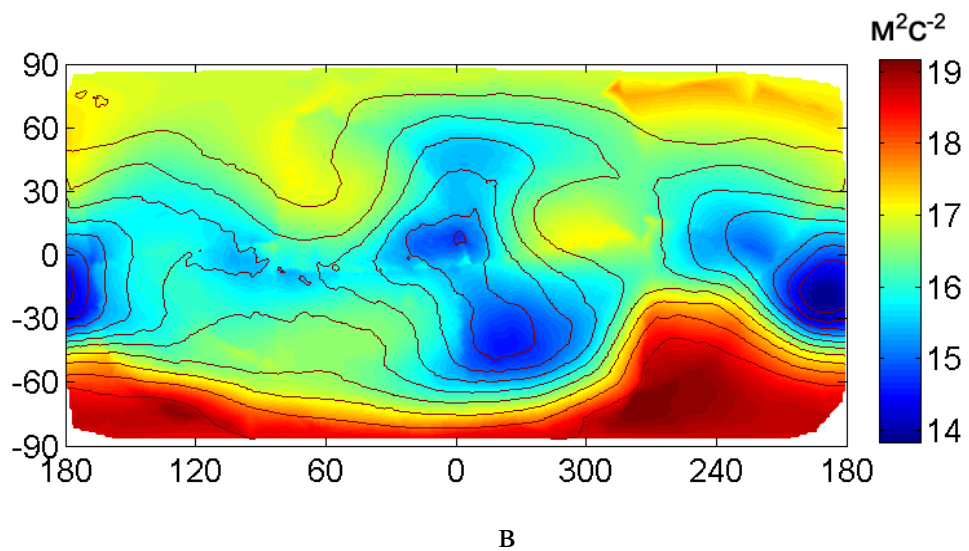
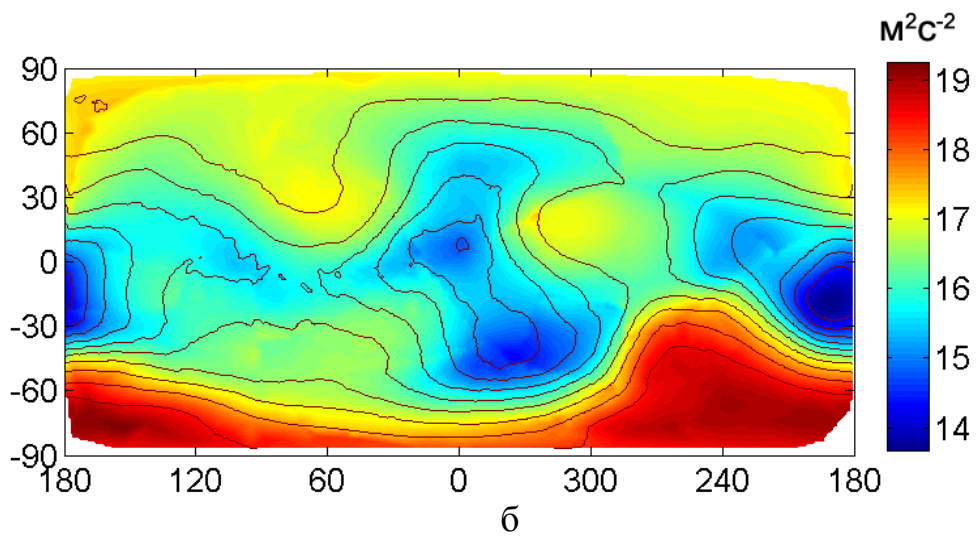
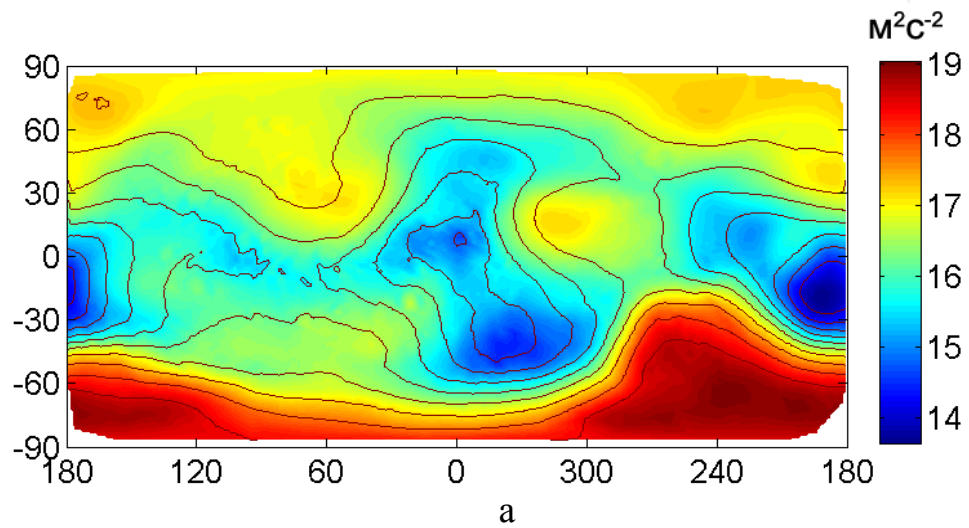


Рис. 4.5. Карты значений потенциала тяжести на поверхности Деймоса, построенные с использованием 100% (а), 1% (б) и 0,5% (в) вейвлет-коэффициентов

Заключение

В ходе диссертационной работы достигнута поставленная цель – разработана методика построения многомасштабных моделей малых небесных тел и спутников солнечной системы, а также решены следующие задачи и получены результаты:

- проведен анализ и оценка существующих методик моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет;
- разработана методика моделирования поверхности малых небесных тел и спутников планет;
- построены многомасштабные модели поверхности Фобоса и Деймоса;
- созданы рабочие модели полей притяжения Фобоса и Деймоса, основанные на многомасштабном моделировании их поверхности.

Также в результате диссертационной работы показано, что разработанная методика обладает рядом преимуществ наиболее существенными из которых, являются следующие:

- быстрый расчет модели при появлении новых или изменении старых исходных данных;
- модель поверхности, построенная с помощью разработанной методики, лучше отражает особенности рельефа.

Таким образом, в результате выполнения автором диссертационных исследований, решена важная научная задача, а именно, разработана новая методика математического моделирования поверхности небесных тел.

Список публикаций по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах ВАК России:

1. Малинников В.А., Оберст Ю., Учаев Д.В., Учаев Дм.В., Прутов И.С. Применение мультифрактального подхода для аппроксимации ньютоновского потенциала малых тел Солнечной системы // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2011. — №6. — С. 64–68.

2. Прутов И. С., Учаев Д. В., Учаев Дм. В. Анализ алгоритмов аппроксимации гравитационных полей, базирующихся на фрактальном подходе // «Прил. к журналу изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». — 2011. — №4. С. 73–77.

3. Учаев Дм.В., Учаев Д.В., Прутов И.С. Методика построения однородных многомасштабных моделей полей притяжения малых небесных тел // «Прил. к журналу изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». — 2012. — №6. Вып. 5 — С. 37–43.

4. Учаев Дм. В., Учаев Д. В., Прутов И. С. Многомасштабное представление гравитационных полей малых небесных тел // Изв. ВУЗов. «Геодезия и аэрофотосъемка». 2013. №4. С. 3–8

В прочих изданиях:

5. Uchaev D. V., Oberst J., Malinnikov V. A., Willner K., Uchaev Dm. V., Prutov I. S. The Phobos gravitational field modeled on the basis of its topography // The second Moscow Solar System Symposium (2M-S3): Moons of planets, 2011. P. 54–56 (2MS³-MM-11).

6. Uchaev D. V., Malinnikov V. A., Uchaev Dm.V., Prutov I. S. Application of Multifractal Approach to Gravity Potential Field Approximation Using Space-Derived Earth Data // Proc. of the First Serbian Geodetic Congress, 2011., Belgrade, Serbia –P. 216-222.