

Copyright © 2019 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic  
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A  
 Has been issued since 2015.  
 E-ISSN: 2413-7499  
 2019, 5(1): 34-40

DOI: 10.13187/rjar.2019.1.34  
[www.ejournal28.com](http://www.ejournal28.com)



## Space Geodesy of Small Celestial Bodies

Vladimir V. Oznamets <sup>a</sup>, Viktor Ya. Tsvetkov <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Russian Federation

<sup>b</sup> Research and Design Institute of design information, automation and communication on railway transport, Russian Federation

### Abstract

The article explores the features of the use of space geodesy in the description of small celestial bodies. The paper shows the difference between geodesic astronomy and space geodesy. The paper shows the difference between ground geodesy, astronomy and space geodesy. The main stages of cartographic modeling are described. Cartographic modeling of space bodies or space mapping includes three stages. The first stage transforms the original cosmic body into a reference geometric body. The reference geometric body is transformed at the second stage into a geometric figure having a scan. The geometric shape is converted to a flat scan in the third stage. Conformal transformations are the basis for the implementation of the second and third stages. Problems appear at the first stage of spatial transformations. The irregularity of the cosmic body creates significant distortions in the construction of its surface. The authors of the article propose geodetic modeling and geodesic constructions as an alternative. Geodesic space modeling is a generalization of geodetic and photogrammetric measurements. For small space those use photogrammetric measurement methods. Geodesic modeling allows you to create a three-dimensional triangulation model. The article confirms the conclusion that geometry, geodesy and geoinformatics are applicable for the study of space bodies.

**Keywords:** space research, space geodesy, geometry, reduction, space bodies, small celestial bodies modeling.

### 1. Введение

В исследовании (Савиных, 2019) доказано что геодезия и геометрия являются в первую очередь науками о пространстве. Статья констатирует, что геометрия, несмотря на ее часть «гео» не связана с измерением Земли, а является разделом математической теории. Геодезия изучает реальное пространство и реальные пространственные отношения. Статья доказывает, что эта геодезия давно вышла за рамки земного пространства и может исследовать космическое пространство. Это подтверждается развитием направления космическая геодезия. В работе (Gospodinov, 2018) анализируется геодезическая астрономия. Показано что эта наука использует методы геодезии для астрономических измерений. В работе (Bondur, Tsvetkov, 2015) показано, что космическая геоинформатика есть научное направление, которое исследует космическое пространство методами геоинформатики. Таким образом, можно сделать общий вывод, что развитие наук: геометрии, геодезии и геоинформатики создало возможность применять их методы для

\* Corresponding author

E-mail addresses: [cvj2@mail.ru](mailto:cvj2@mail.ru) (V.Ya. Tsvetkov), [voznam@bk.ru](mailto:voznam@bk.ru) (V.V. Oznamets)

исследования комического пространства и космических тел. Более широко применяют термин «малое небесное тело» (МНТ), который является синонимом термина «космическое тело». Необходимо отметить различие между космической геодезией (Майоров и др., 2012) и геодезической астрономией. Геодезическая астрономия использует методы геодезических измерений и геодезической обработки информации для астрономических наблюдений. Необходимо отметить различие между космической геодезией и наземной геодезией. Наземная геодезия использует в основном геодезические методы измерений для получения координат точек поверхности Земли. Космическая геодезия использует в основном для получения координат точек поверхности космического тела фотограмметрические методы измерений. Космическая геодезия занимается измерением планет и малых небесных тел геодезическими методами и геодезическими преобразованиями. При исследовании малых небесных тел необходимо отметить космическую картографию (Нырцов, 2012), которая занимается составлением карт на космические объекты: планеты и малые небесные тела.

## 2. Результаты

### Требования к моделям пространственных тел

При моделировании пространственных тел требуется реализовать следующие свойства пространственных моделей: воспринимаемость, обозримость, морфологическое соответствие, измеряемость, сопоставимость с объектами такого же класса. Воспринимаемость и обозримость являются свойством когнитивных моделей (Цветков, 2013). Изменяемость означает, что измерения на поверхности модели соответствуют измерениям на поверхности объекта, но в другом масштабе. Однако наличие такой возможности позволяет определять координаты точек объекта по точкам модели и решать различные геометрические задачи.

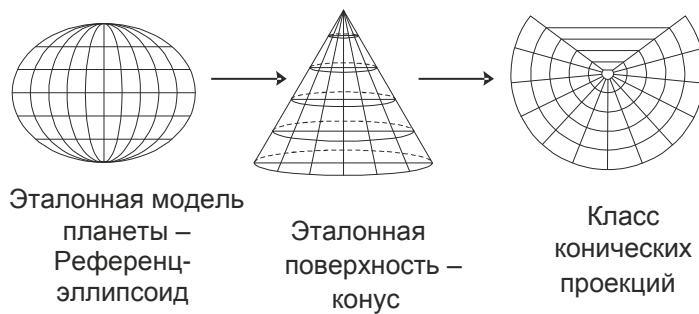
Морфологическое соответствие является частным случаем информационного соответствия (Номоконова, 2018), которое определяет степень сходства модели и моделируемого объекта. При картографировании (земном и космическом) это свойство очень важно. В работе (Бугаевский, 1998) показано, что если имеет место более чем на 5 % искажение объектов на картах, такая карта становится неузнаваемой и плохо сопоставимой с реальным объектом. В этом случае она превращается в абстрактную математическую модель реального объекта. Для нее сохраняется сопоставимость с моделями подобного класса, но теряется сопоставимость с реальными объектами данного класса. Такая модель теряет свойство морфологического информационного соответствия.

Перечисленные требования к пространственным моделям распространяются на наземные объекты, на планеты и на малые небесные тела. В чем различие между тремя этими классами пространственных объектов? Наземные объекты хорошо изучены и для них накоплен опыт и стереотипы моделирования, которые обеспечивают все четыре свойства пространственных моделей.

Планеты имеют форму поверхности близкую к регулярной и поэтому хорошо моделируются и картографируются методами математической картографии. Малые небесные тела в подавляющем большинстве имеют не регулярную форму. В силу этого их картографирование (нырцов) нарушает свойство морфологического соответствия при сохранении трех остальных свойств.

### Проблемы картографических преобразований космических объектов.

На Рисунке 1 приведена технология классического картографического преобразования поверхности произвольной планеты на примере конического преобразования (Бугаевский, 1999).

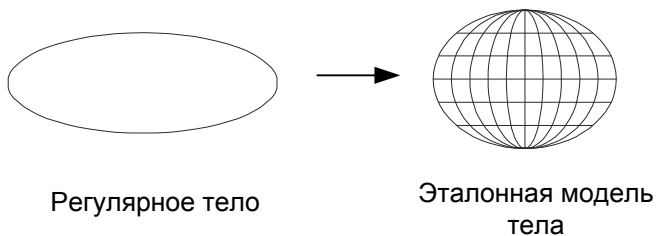


**Рис. 1.** Картографические преобразования поверхности планеты

Обычно такая схема ([Рисунок 1](#)) приводится в учебниках картографии. Она описывает процесс преобразования эталонного пространственного тела в другое пространственное тело имеющее развертку. На первом этапе эталонное тело преобразуется в геометрическую фигуру, имеющее развертку. Таких фигур три, конус цилиндр и плоскость. Такое процесс осуществляют на основе конформных преобразований, которые специфичны для каждого фигуры. После этого второе пространственное тело (конус, цилиндр, плоскость) преобразуется в плоскую модель по его развертке. При этом также используют конформные преобразования. Конформные преобразования преобразуют одну фигуру в другую «точка за точкой». Однако они по свое природе создают искажения за счет того, что «растягивают» одни области тела и сжимают другие области этого же тела.

Достоинством конформных преобразования является сохранение топологических инвариантов на поверхности плоской модели.

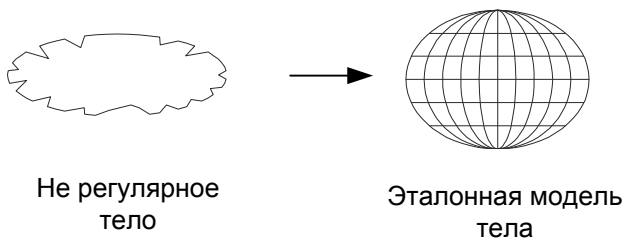
Конформным преобразования предшествует информационная ситуация преобразования реального космического тела в эталонную модель этого тела. Она осуществляется за счет редукции, то есть не конформного пространственного преобразования. Возможны два варианта такой ситуации. Первый вариант такого пространственного преобразования приведен на [Рисунке 2](#).



**Рис. 2.** Морфологическое преобразование регулярного тела в эталонную модель. Высокое морфологическое соответствие

Ситуация на [рис.2](#) описывает случай, когда исходное космическое тело имеет форму, близкую к регулярной, или близкую, к эталонной геометрической фигуре. Под регулярной формой ([Бугаевский, 1998](#)) понимаем одновременное выполнение двух условий. Исходное тело имеет гладкую поверхность, на которой нет скачков производных в любой точке поверхности. Второе условие состоит в том, что форма исходного космического тела близка к известной правильной геометрической фигуре. Для планет это эллипсоид. В этом случае преобразование на [Рисунке 2](#) обеспечивает морфологическое (информационное) соответствие между формой исходного объекта и формой эталонного объекта является высоким.

Второй вариант пространственных преобразований приведен на [Рисунке 3](#).

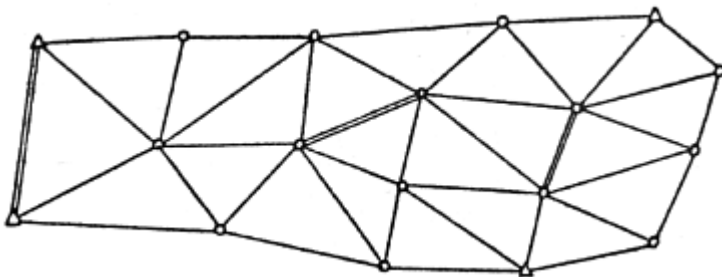


**Рис. 3.** Морфологическое преобразование не регулярного тела в эталонную модель. Низкое морфологическое соответствие

**Рисунок 3** описывает ситуацию, когда исходное космическое тело имеет форму, далекую от регулярной формы. Это характерно для астероидов и других малых небесных тел. Под не регулярной формой небесного тела понимаем либо наличие скачков производных в любой точке поверхности, либо также то, что форма такого тела не походит на простую геометрическую фигуру, либо оба фактора вместе. В этом случае эталонная модель передает точки на поверхности такого космического тела с большими морфологическими и координатными искажениями. Таким образом, следует вывод, что классический подход картографирования малых небесных тел создает существенные искажения в передаче их формы на плоскость. Такая модель наглядна, но лишена измерительных свойств. Вывод, для нерегулярных космических тел необходимо применять методы геодезических (фотограмметрических) измерений.

#### **Геодезические построения на МНТ**

Сущность геодезического моделирования МНТ как альтернатива картографического моделирования состоит в построении трехмерных моделей космического тела, допускающих нарушение регулярности. Достаточно известным и хорошо отработанным в геодезии является метод построения геодезических сетей, имеющих трехмерные координаты. На **Рисунке 4** показана типичная геодезическая сеть.



**Рис. 4.** Геодезическая сеть как основа моделирования пространственной поверхности

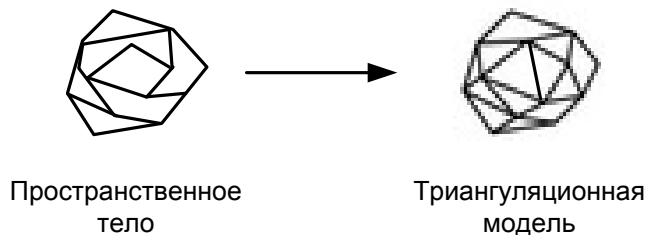
Каждая точка сети строго соответствует точек поверхности. В земных условиях геодезическая сеть покрывает часть поверхности Земли. В космическом пространстве геодезическая сеть может покрывать всю поверхность МНТ в силу его небольших размеров.

Геодезическое моделирование МНТ включает два этапа: построение геодезической сети на поверхности тела, моделирование поверхности тела и его формы с использованием метода Вороного-Делоне. Следует напомнить, что метод Вороного-Делоне создавался для решения задач кристаллографии, то есть для описания пространственных тел (кристаллов) имеющих не регулярную форму.

Хотя речь идет о геодезическом подходе в данном случае, для космических исследований, его следует рассматривать как обобщение геодезических и фотограмметрических измерений. При наличии возможности на небесном теле проводят геодезические измерения с помощью роботов. При отсутствии такой возможности производят фотограмметрические съемки небесного тела. На основе таких съемок строят его пространственную сеть, а затем моделируют форму с помощью треугольников. На **Рисунке 5**

приведен пример трансформации МНТ произвольной формы в триангуляционную пространственную модель.

Исходное пространственное тело имеет произвольные грани, например четырехсторонники. Триангуляционная модель покрывает всю поверхность треугольниками, даже если они лежат в одной плоскости.



**Рис. 5.** Трансформация произвольного МНТ в триангуляционную модель

Подведем итог, картографическое преобразование создает поверхность описываемую функцией двух переменных  $F_2(\varphi, \lambda)$ , где  $\varphi$  – широта,  $\lambda$  – долгота. При этом дополнительно подразумевается наличие и известное положение полюсов планеты. При этом дополнительно подразумевается наличие центра эталонной фигуры, который используют при конформных преобразованиях. Исходная поверхность пространственного тела  $S(x, y, z)$  при этом существенно упрощается.

Геодезическое построение создает трехмерную модель  $F_3(x, y, z)$ , где  $x, y, z$  – пространственные координаты. Эта трехмерная модель не упрощает исходную поверхность тела  $S(x, y, z)$ , а является ее трехмерным подобием.

### 3. Заключение

Данная статья подтверждает, что методы геометрии и геодезии (и, как следствие, геоинформатики) применимы для измерения и описания любого пространственного космического тела. Методы картографии имеют ограничения при описании космических тел, имеющих не регулярную форму. Такая форма характерна для малых небесных тел. Ограничения картографического метода обусловлены упрощениями и редукцией реального тела к геометрически правильному аналогу. Ограничения картографического метода обусловлены дополнительными искажениями картографических проекций безотносительно к форме тела. Достоинством и недостатком картографического метода является применение конформных преобразования для всего пространственного тела. Именно поэтому для описания пространственного объекта используют одну пространственную фигуру. При картографическом подходе необходимо определение полюсов планеты и ее условного центра.

Геодезический подход является альтернативой картографическому подходу при описании МНТ. Он не требует применения правильной геометрической фигуры как основы малого небесного тела. Геодезический подход допускает не гладкость поверхности. Он описывает поверхность с помощью триангуляционной модели. Такой подход исключает определение полюсов и центра тела. Но он задает проблему нерегулярной развертки. Но технически триангуляционная поверхность может быть легко разрезана и трансформирована в плоскость для получения плоской визуальной модели. Такая модель не является картой в общепринятом понимании. Но она позволяет решать задачи навигации на малом теле. Малое тело может быть покрыто замкнутой триангуляционной геодезической сетью. Статья подтверждает вывод о том, что геометрия, геодезия и геоинформатика, несмотря на корневую часть слова «гео», применимы для исследования и измерений космических тел.

### Литература

Бугаевский, 1998 – Бугаевский Л.М. Математическая картография. М.: «Златоуст», 1998, 400 с.

**Бугаевский, 1999** – *Бугаевский Л.М.* Теория картографических проекций регулярных поверхностей. М.: Златоуст, 1999, 142 с.

**Майоров и др., 2012** – *Майоров А.А., Савиных В.П., Цветков В.Я.* Геодезическое космическое обеспечение России // *Науки о Земле*, 2012, №4, 23-27.

**Номоконова, 2018** – *Номоконова О.Ю.* Виды информационных соответствий // *Славянский форум*, 2018, 2(20), 44-49.

**Нырцов, 2012** – *Нырцов М.В.* Разработка теории и методологии картографирования малых небесных тел. Дис. на соискание уч. ст. д.т.н. Специальность 25.00.33. Картография. М.: МИИГАиК, Т. 1. 2012, 447 с.

**Савиных, 2019** – *Савиных В.П.* Новый взгляд на геодезию // *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*, 2019, № 1, 58-63.

**Цветков, 2013** – *Цветков В.Я.* Когнитивные аспекты построения виртуальных образовательных моделей // *Перспективы науки и образования*, 2013, №3, 38-46.

**Bondur, Tsvetkov, 2015** – *Bondur V.G., Tsvetkov V.Ya.* New Scientific Direction of Space Geoinformatics // *European Journal of Technology and Design*, 2015, 4(10), 118-126.

**Gospodinov, 2018** – *Gospodinov S.G.* The Development of Geodesic Astronomy // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*, 2018, 4(1): 9-33.

## References

**Bondur, Tsvetkov, 2015** – *Bondur V.G., Tsvetkov V.Ya.* (2015). New Scientific Direction of Space Geoinformatics. *European Journal of Technology and Design*, 4(10), 118-126.

**Bugaevskii, 1998** – *Bugaevskii L.M.* (1998). Matematicheskaya kartografiya [Mathematical cartography]. М.: «Zlatoust», 400 p. [in Russian]

**Bugaevskii, 1999** – *Bugaevskii L.M.* (1999). Teoriya kartograficheskikh proektsii regulyarnykh poverkhnostei [The theory of cartographic projections of regular surfaces]. М.: Zlatoust, 142 p. [in Russian]

**Gospodinov, 2018** – *Gospodinov S.G.* (2018). The Development of Geodesic Astronomy. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*, 4(1): 9-33.

**Maierov i dr., 2012** – *Maierov A.A., Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya.* (2012). Geodezicheskoe kosmicheskoe obespechenie Rossii [Geodesic space support of Russia]. *Nauki o Zemle*, №4, 23-27. [in Russian]

**Nomokonova, 2018** – *Nomokonova O.Yu.* (2018). Vidy informatsionnykh sootvetstviy [Types of informational correspondences]. *Slavyanskii forum*, 2(20), 44-49. [in Russian]

**Nyrtsov, 2012** – *Nyrtsov M.V.* (2012). Razrabotka teorii i metodologii kartografirovaniya malykh nebesnykh tel [Development of the theory and methodology for mapping small celestial bodies]. Dis. na soiskanie uch. st. d.t.n. Spetsial'nost' 25.00.33. Kartografiya. М.: МИИГАиК, Т. 1. 447 p. [in Russian]

**Savinykh, 2019** – *Savinykh V.P.* (2019). Novyi vzglyad na geodeziyu [New view on geodesy]. *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*, № 1, 58-63. [in Russian]

**Tsvetkov, 2013** – *Tsvetkov V.Ya.* (2013). Kognitivnye aspekty postroeniya virtual'nykh obrazovatel'nykh modelei [Cognitive aspects of building virtual educational models]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya*, №3, 38-46. [in Russian]

## Космическая геодезия малых небесных тел

Владимир Владимирович Ознамец <sup>a</sup>, Виктор Яковлевич Цветков <sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Российская Федерация

<sup>b</sup> Научно-исследовательский и проектно конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: [cvj2@mail.ru](mailto:cvj2@mail.ru) (В.Я. Цветков), [voznam@bk.ru](mailto:voznam@bk.ru) (В.В. Ознамец)

**Аннотация.** Статья исследует особенности применения космической геодезии при описании малых небесных тел. Показано различие между геодезической астрономией и космической геодезией. Описаны основные этапы картографического моделирования. Картографическое моделирование космических тел или космическое картографирование включает три этапа. Первый этап преобразует исходное космическое тело в эталонное геометрическое тело. Эталонное геометрическое тело преобразуют на втором этапе в геометрическую фигуру, имеющую развертку. Геометрическая фигура преобразуется в плоскую развертку на третьем этапе. Конформные преобразования служат основой реализации второго и третьего этапов. Проблемы появляются на первом этапе пространственных преобразований. Нерегулярность космического тела создает значительные искажения при построении его поверхности. Авторы статьи предлагают в качестве альтернативы геодезическое моделирование и геодезические построения. Геодезическое космическое моделирование является обобщением геодезических и фотограмметрических измерений. Для малых космических тел применяют фотограмметрические методы измерений. На основе геодезического моделирования формируют трехмерную триангуляционную модель. Статья подтверждает вывод о том, что геометрия, геодезия и геоинформатика – применимы для исследования и измерений космических тел.

**Ключевые слова:** космические исследования, космическая геодезия, геометрия, редукция, космические тела, малые небесные тела моделирование.