

Copyright © 2020 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
 2020, 6(1): 46-52

DOI: 10.13187/rjar.2020.1.46
www.ejournal28.com



Planetary Altimetry

Viktor Ya. Tsvetkov ^{a,*}

^a Research and Design Institute of design information, automation and communication on railway transport, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article describes a method for determining the coordinates of points on the planet's surface if there is a laser altimeter and a photogrammetric system on board the spacecraft. Both devices are linked and coordinated in the spacecraft system. There is a possibility of converting the ranges of the laser altimeter into a photogrammetric coordinate system associated with the front nodal point of the camera. The altimeter marks points on the planet's surface. These points are recorded by the photogrammetric system in the image. Measurements of the coordinates of the points of the images make it possible to determine the spatial configuration of points on the planet's surface in real scale. Spatial configuration is analogous to a hanging geodetic network. An estimate is given of the errors caused by the movement of the spacecraft relative to the planet. The field of application of the method in terrestrial conditions is described.

Keywords: space research, planetology, determination of coordinates, altimeter, photogrammetric survey, planet surface, spatial configuration.

1. Введение

В настоящее время планетология и сравнительная планетология являются основой изучения поверхностей планет. Планетология основана на использовании методов дистанционного зондирования, которые апробировали себя в земных и околоземных (Barmin et al., 2014) условиях. При использовании космических снимков поверхностей планет используют проверенные методы геодезии и фотограмметрии. Если есть возможность, то применяют методы космической геоинформатики (Bondur, Tsvetkov, 2015; Савиных, 2016).

Планетологические исследования (Tsvetkov, 2018) и планетологические измерения (Bean, 2017) не имеют возможности прямых измерений. Все измерения в планетологии являются косвенными и опосредованными. Статья исследует ситуацию измерений поверхности планеты или иного космического тела с борта космического аппарата, на котором имеется лазерный альтиметр и фотограмметрическая установка для съемки поверхности. Предлагается методика расчета точек поверхности и методика учета поправок за счет движения космического аппарата относительно космического тела. Методика применима для оценки поверхности любого твердого космического тела, например, астероида. Первоначально основой планетологии, которая фактически осуществлялась с Земли, были оптические наблюдения (Turcotte, 1996). Сфера её исследования включает в себя разные объекты, от микрометеоритов до газовых гигантов. Планетология изучает

* Corresponding author
 E-mail addresses: cvj2@mail.ru (V.Ya. Tsvetkov)

физические свойства, химический состав, строение поверхности, внутренних и внешних оболочек планет и их спутников, а также условия их формирования и развития

Пространственное моделирование поверхности

Пространственное моделирование поверхности (Poole et al., 2004) большинства тел основано на трехмерных измерениях, построении первичных трехмерных моделей (которые называют цифровыми моделями), проведение дихотомического анализа, совмещенного со структурным анализом, применении аналитического моделирования и визуализации модели если это необходимо. Данные о поверхности могут быть представлены в виде множества точек с трехмерными координатами x, y, z . Такое множество точек с их координатами называют первичной или точечной цифровой моделью поверхности (Цветков, 2016). Такая модель может быть сформирована для любой планеты при возможности измерения координат ее точек.

Каждую точку поверхности планеты невозможно и нецелесообразно передать в модель. Поэтому используют вторичные цифровые модели поверхности (ЦМП), которые не только содержат отдельные точки, но и включают информацию о связях и пространственных отношениях между точками вторичной модели. Совокупности точек вторичной модели позволяют восстанавливать всю поверхность. Отсюда вытекает главная задача ЦМП – использовать минимальное число точек для точного построения поверхности планеты. Основная трудность при аналитическом построении ЦМП возникает при построении нерегулярной поверхности которая имеет разрывы или скачки производных. Математические модели, как правило, описывают гладкую поверхность. Поэтому часто цифровую пространственную модель поверхности строят из совокупностей разных кусков поверхности, стыкующихся на определенных линиях или в определенных точках. На Рисунке 1 показан фрагмент (Дышленко, 2014) пространственная модель в районе черноморского побережья.

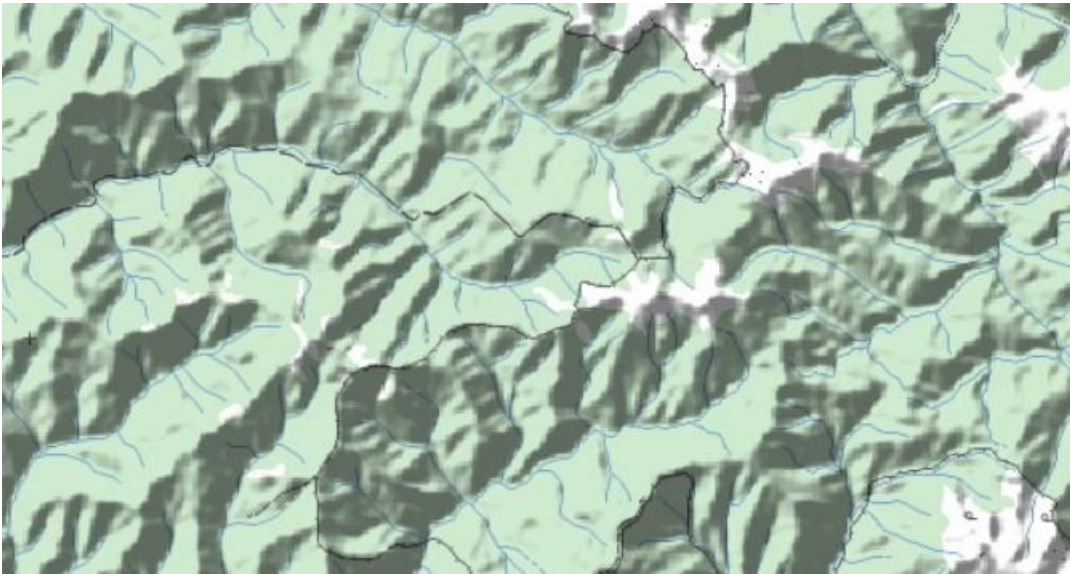


Рис. 1. Пространственная модель нерегулярной поверхности построенная по стыкующимся линиям и точкам (Дышленко, 2014)

При достаточно большом количестве точек, модель поверхности точно отражает ее форму. Упрощенная модель поверхности строится с помощью покрытия треугольниками, наложенными на точки с трехмерными координатами. Если на поверхности планеты определены положения множества точек, то путём моделирования пространственных треугольников между точками можно создать модель поверхности планеты. Метод построения тринитарной системы на поверхности планеты является планетарной триангуляцией и имеет аналог в земных условиях – наземную триангуляцией. Тринитарная модель (Kudzh, Tsvetkov, 2020) или триангуляционная модель поверхности является

устойчивой и хорошо аппроксимирует поверхность не требуя использования эллипсоидальной модели планеты, как это делается на Земле. Тринитарная модель может быть рассмотрена как планетарная геодезическая сеть, аналогом которой на Земле являются геодезические наземные сети.

Методика нахождения координат точек поверхности планеты.

Использование опыта исследования Земли с помощью аэрофотосъемки и космической съемки перенесено в настоящее время на исследование небесных тел с помощью космических аппаратов. Существуют разные методы определения координат на поверхности планет. Основной метод состоит в использовании данных траектории космического аппарата как базиса съемки (Barmin et al., 2014) и решение прямой фотограмметрической засечки. В данной работе предлагается новый подход с использованием лазерного альтиметра и фотосъемки. На Рисунке 2 приведена схема нахождения точек поверхности планеты с борта космического аппарата

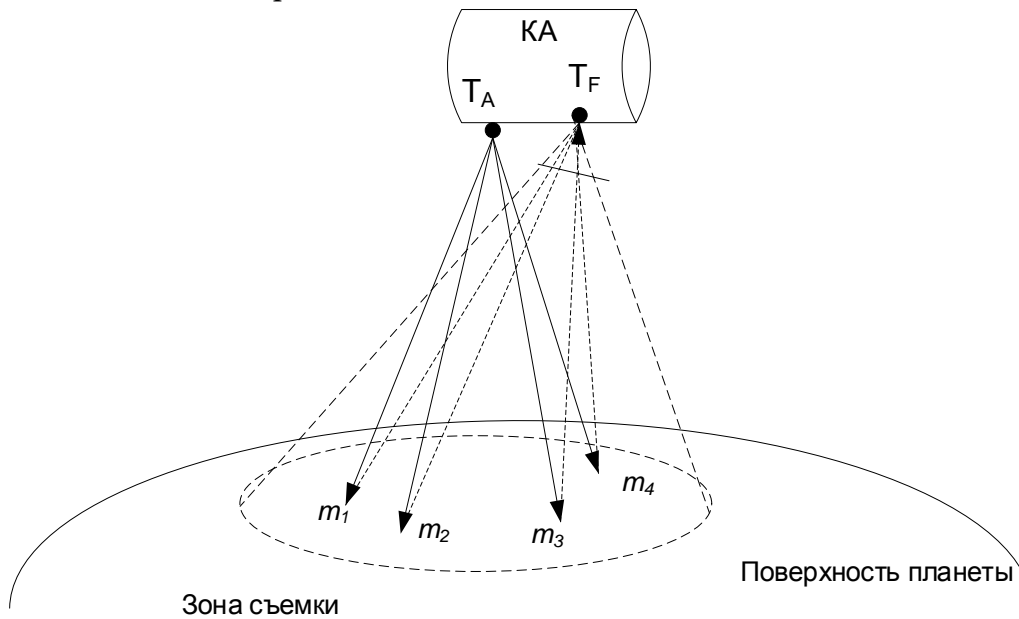


Рис. 2. Нахождение координат точек поверхности планеты с помощью альтиметра и фотограмметрической системы.

На Рисунке 2 показан космический аппарат (КА), на борту которого установлен альтиметр и фотограмметрическая система. Лазерный альтиметр направляет лазерный луч на поверхность планеты и маркирует точки поверхности в зона съемки фотограмметрической аппаратуры. Это точки m_1, m_2, m_3, m_4 . Количество маркируемых точек ограничено временем экспозиции снимка для фотограмметрической аппаратуры. Точка излучения альтиметра обозначена как T_A . Передняя узловая точка фотограмметрической системы обозначена как T_F . Расстояния до маркируемых точек $T_A - m_i$ определяются с помощью лазерного альтиметра как измерителя расстояния. Обе точки жестко связаны между собой во внутренней координатной системе КА. Это создает возможность пересчета длин по отношению к точке T_F .

Таким образом в фотограмметрической системе известны расстояния до маркированных точек. Каждой маркированной точке можно поставить в соответствие измеряемое расстояние

$$L_i = T_F - m_i$$

Каждая маркированная точка имеет изображение на снимке $m^*(x, y)$. Изображению маркированной точке снимка можно поставить в соответствие вычисляемое расстояние

$$l_i = \sqrt{(x^2 + y^2 + f^2)}$$

В этом выражении x, y – координаты точки на снимке, f – фокусное расстояние камеры. Отношение

$$K_i = L_i / l_i$$

Задаёт частный масштаб для каждой точки. Координатам точек снимка (x, y) соответствуют координаты точек поверхности планеты (X, Y) . В системе координат фотограмметрической аппаратуры или в фотограмметрической системе координат. Координаты точек поверхности планеты определяются с использованием частного масштаба для маркированной точки

$$X_i = x_i K_i$$

$$Y_i = y_i K_i$$

Координата Z определяется как

$$Z_i = \sqrt{(L_i - X_i^2 - Y_i^2)}$$

Координаты X, Y, Z – координаты во внешней системе координат, которая ориентирована осью Z по направлению главной оптической оси фотокамеры, а две другие оси параллельны осям координат на снимке. Таким образом эта система координат в реальном масштабе но ориентирована относительно координатной системы КА.

С помощью такого несложного алгоритма определяются все координаты маркированных точек на поверхности планеты в фотограмметрической системе координат T_F . Для каждого сеанса съёмки определяется своя группа маркированных точек. Координаты точки T_F для каждого сеанса определяются с помощью инерциального устройства или с помощью известного уравнения траектории, которую на относительно малом расстоянии можно считать не возмущённой.

Оценка влияния перемещения космического аппарата

На рис.2 приведена модель, для которой длина пути лазерного луча в прямом и обратном направлении считается одинаковой. Для неподвижных объектов это имеет место всегда. Но при движении космического аппарата возможны ситуации, когда длина этих путей становится разной. На рисунке 3 приведена ситуация, показывающая влияние движения космического аппарата на расхождение длин падающего и отражённого лучей.

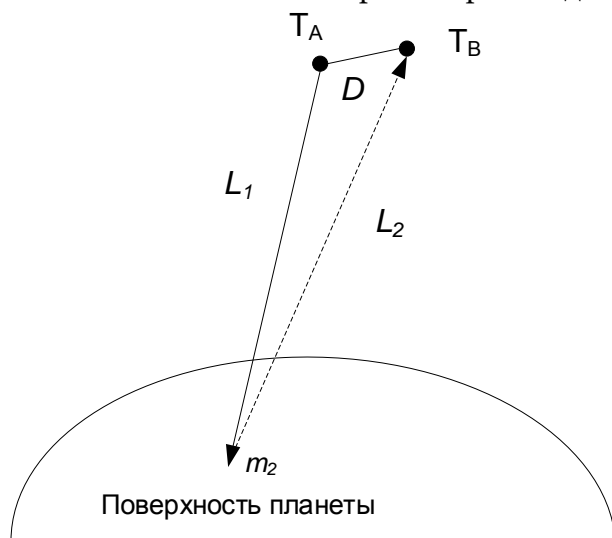


Рис. 3. Влияние движения космического аппарата на расхождение длин падающего и отражённого лучей.

На **Рисунке 3** точка T_A соответствует отправке луча на поверхность планеты. Длина L_1 соответствует расстоянию падающего луча из точки T_A в точку m_2 . Длина L_2 соответствует расстоянию отражённого луча из точки m_2 в точку T_B . За время прохождения луча космический аппарат смещается из точки T_A в точку T_B на расстояние D . Возникает задача при каких условиях влияние надо учитывать D . Эту задачу можно решить методом

оценивания. Полагаем скорость КА есть v вторая космическая скорость 11 км/сек. Скорость свет обозначим $c=300\ 000$ км/сек. За время падения луча КА переместится на расстояние D_1

$$D_1 = v/c L_1$$

За время отражения луча КА переместится примерно на расстояние D_2

$$D_2 = v/c L_2$$

Для точного определения L_2 величины необходимо решение дифференциального уравнения. Но для оценочных значений можно задать приближенную величину. Величина $v/c = 3,66667 \cdot 10^{-5}$

При съемке с расстояния 3000 км от поверхности планеты смещение КА составит около 220 м. При съемке с расстояния 30000 км от поверхности планеты смещение составит более 2.2 км. Относительная ошибка невелика. Но при этом возникает другая ошибка – рост пятна отраженного луча. На [Рисунках 2, 3](#) предполагается, что на поверхности планеты точечный объект. На самом деле это пятно, которое имеет размеры и задает погрешность измерений на снимке. Поэтому данный метод имеет ограничение по размеру пятен маркировочных точек.

3. Заключение

Описанный метод формирует новое пространственное знание ([Savinykh, 2016](#)). Предложенный метод позволяет за сеанс съемки сформировать ограниченное количество точек на поверхности планеты и получить их пространственную конфигурацию в условной системе координат. С геодезической точки зрения такой метод формирует висячую пространственную сеть. С фотограмметрической точки зрения метод формирует пространственную модель в условной системе координат, напоминающую фотограмметрическую модель, получаемую при взаимном ориентировании. Различие в том, что при взаимном ориентировании модель имеет произвольный масштаб и ориентацию. В данном случае модель строится в реальном масштабе и ее надо только ориентировать к системе координат планеты. Поэтому более правильно назвать такую модель пространственной конфигурацией поверхности планеты. Для привязки этой конфигурации к поверхности планеты необходимо иметь твердую точку на планете, к которой можно привязать пространственную конфигурацию. При использовании спутников и возможности замкнуть совокупность конфигураций такой метод позволяет задавать пространственное положение поверхности и объектов на поверхности. В земных условиях при использовании ИСЗ такой метод при разовой съемке позволяет выявлять новые объекты, например разливы нефти или появление новых объектов, корабле и сооружений.

Литература

- [Дышленко, 2014](#) – Дышленко С.Г. Трехмерное моделирование в ГИС // *Перспективы науки и образования*. 2014. 2: 28-33.
- [Савиных, 2016](#) – Савиных В.П. Развитие космической геоинформатики // *Славянский форум*. 2016. 2(12): 223-230.
- [Цветков, 2016](#) - Цветков В.Я. Цифровые карты и цифровые модели. // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. 4-2: 348-351.
- [Barmin et al., 2014](#) – Barmin I.V., Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. Remote Method of Determining the Coordinates of Points on a Planetary Surface // *Solar System Research*. 2014. 48(7): 493-496. DOI: 10.1134/S0038094614070028
- [Barmin et al., 2014](#) – Barmin I.V., Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. Remote Method of Determining the Coordinates of Points on a Planetary Surface // *Solar System Research*. 2014. 48(7): 493-496. DOI: 10.1134/S0038094614070028
- [Bean, 2017](#) – Bean J.L., Abbot D.S., Kempton E.M.R. A statistical comparative planetology approach to the hunt for habitable exoplanets and life beyond the solar system // *The Astrophysical Journal Letters*. 2017. 841(2): L24.
- [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.

[Kudzh, Tsvetkov, 2020](#) – Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. Triadic comparative analysis // *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. Special Issue*. 2020. 10, June, 745-754. DOI: <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.10/2020.06.00047>

[Poole et al., 2004](#) – Poole G.C., Stanford J.A., Running S.W., Frissell C.A., Woessner W.W., Ellis B.K. A patch hierarchy approach to modeling surface and subsurface hydrology in complex flood-plain environments // *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*. 2004. 29(10): 1259-1274.

[Savinych, 2016](#) – Savinych V.P. On the Relation of the Concepts of Space Knowledge, Knowledge, Knowledge of the Spatial // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2016. 2(1): 23-32.

[Tsvetkov, 2018](#) – Tsvetkov V.Ya. The Development of the Direction "Comparative Planetology" // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2018. 4(1): 34-41.

[Turcotte, 1996](#) – Turcotte D.L. Magellan and comparative planetology // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 1996. 101(E2): 4765-4773.

References

[Barmin et al., 2014](#) – Barmin, I.V., Kulagin, V.P., Savinykh, V.P., Tsvetkov, V.Ya. (2014). Near Earth Space as an Object of Global Monitoring. *Solar System Research*. 48(7): 531-535. DOI: 10.1134/S003809461407003X

[Barmin et al., 2014](#) – Barmin, I.V., Savinykh, V.P., Tsvetkov, V.Ya. (2014). Remote Method of Determining the Coordinates of Points on a Planetary Surface. *Solar System Research*. 48(7): 493-496. DOI: 10.1134/S0038094614070028

[Bean, 2017](#) – Bean, J.L., Abbot, D.S., Kempton, E.M.R. (2017). A statistical comparative planetology approach to the hunt for habitable exoplanets and life beyond the solar system. *The Astrophysical Journal Letters*. 841(2): L24.

[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.

[Dyshlenko, 2014](#) – Dyshlenko, S.G. (2014). Trekhmernoe modelirovanie v GIS [Three-dimensional modeling in GIS]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya*. 2: 28-33.

[Kudzh, Tsvetkov, 2020](#) – Kudzh, S.A., Tsvetkov, V.Ya. (2020). Triadic comparative analysis *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. Special Issue*. 10, June, 745-754. DOI: <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.10/2020.06.00047>

[Poole et al., 2004](#) – Poole, G.C., Stanford, J.A., Running, S.W., Frissell, C.A., Woessner, W.W., Ellis, B.K. (2004). A patch hierarchy approach to modeling surface and subsurface hydrology in complex flood-plain environments. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*. 29(10): 1259-1274.

[Savinych, 2016](#) – Savinych, V.P. (2016). On the Relation of the Concepts of Space Knowledge, Knowledge, Knowledge of the Spatial. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2(1): 23-32.

[Savinyh, 2016](#) – Savinyh V.P. (2016). Razvitie kosmicheskoy geoinformatiki [Development of space geoinformatics]. *Slavyanskij forum*. 2(12): 223-230. [in Russian]

[Tsvetkov, 2016](#) – Tsvetkov V.Ya. (2016). Tsifrovye karty i tsifrovye modeli [Digital maps and digital models]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 4-2: 348-351. [in Russian]

[Tsvetkov, 2018](#) – Tsvetkov, V.Ya. (2018). The Development of the Direction "Comparative Planetology". *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 4(1): 34-41.

[Turcotte, 1996](#) – Turcotte, D.L. (1996). Magellan and comparative planetology. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 101(E2): 4765-4773.

Планетная альтиметрия

Виктор Яковлевич Цветков ^{a, *}

^a Научно-исследовательский и проектно конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья описывает метод определения координат точек поверхности планеты при наличии на борту космического аппарата лазерного альтиметра и фотограмметрической системы. Оба устройства связаны и координированы в системе космического аппарата. Существует возможность пересчет дальностей лазерного альтиметра в фотограмметрическую систему координат. Связанную с передней узловой точкой фотокамеры. Альтиметр маркирует точки на поверхности планеты. Эти точки фиксирует фотограмметрическая система на снимок. По измерениям координат точек снимков определяется пространственная конфигурация точек в реальном масштабе. Эту конфигурацию можно рассматривать как висячую геодезическую сеть. Дается оценка погрешностей обусловленная перемещением космического аппарата относительно планеты. Описана область применения метода в земных условиях.

Ключевые слова: космические исследования, планетология, определение координат, альтиметр, фотограмметрическая съемка, поверхность планеты, пространственная конфигурация.

* Корреспондирующий автор
Адреса электронной почты: cvj2@mail.ru (В.Я. Цветков)