

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): 15-22

DOI: 10.13187/rjar.2020.1.15
www.ejournal28.com



Geodesic Support of Space Research

Vladimir V. Oznamets ^{a,*}

^aMoscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Russian Federation

Abstract

The article analyzes the geodetic support of space research. The article shows that geodesy is a science of space, and therefore, geodesic support can be extended to outer space. The analysis shows that the components of the geodetic support of space research are: space geodesy, geodesic astronomy, satellite geodesy and space geoinformatics. The geodetic support of space research has five directions of development. The geodetic support of space research has two groups, each of which includes all five areas. The first group is aimed at supporting Earth exploration from outer space and near-Earth outer space and aimed at exploring extraterrestrial space. The second group of geodetic support for space research is aimed at supporting research on extraterrestrial space. The article highlights the strategic and tactical tasks of geodetic support for space research. The main model, which is formed on the basis of the geodetic support of space research, is a three-dimensional model and a triangulation model for covering the surface of spatial objects. The article justifies the new term "geodetic support for space research". The article confirms the conclusion that geodesy and geoinformatics are applicable for the study and measurement of space bodies.

Keywords: geodesy, geodetic support, space research, geodetic support of space research, space geodesy, space geodetic measurements.

1. Введение

Космическая эра создала новые шансы для развития космической геодезии, наземной геодезии и для интеграции геодезического обеспечения. Космические технологии позволили измерять точки на земной поверхности с пунктов наблюдения, расположенных в околоземном космическом пространстве (Barmin et al., 2014). Космические пункты наблюдений удалены от поверхности Земли на десятки тысяч километров. Информативность (Номоконов, Цветков, 2015) космических снимков превосходит информативность наземных и воздушных (Савиных, Цветков, 2001) снимков. Один космический снимок может заменить сотни аэрофотоснимков. Он может содержать изображение всей земной полусферы. Использование космических исследований расширили трактовку геодезии как науки и изменили представление о ее задачах. В работе (Савиных, 2019) показано, что в настоящее время геодезия вышла за рамки изучения только земной поверхности и является наукой о земном и неземном пространстве. Космическое пространство является разновидностью пространства. Следовательно, геодезия может быть использована для поддержки космических исследований. Это дает основание ввести понятие космическое геодезическое обеспечение (КГО) Современное КГО включает ряд наук: космическую геодезию, геодезическую астрономию, космическую геоинформатику, геодинамику и спутниковую геодезию. КГО является важным научным направлением, что

* Corresponding author
 E-mail addresses: voznam@bk.ru (V.V. Oznamets)

определяет актуальность исследований в этой области.

2. Обсуждение и результаты

Основные направления геодезического космического обеспечения.

Геодезическое обеспечение космических исследований включает пять направлений. Первое направление связано с геодезическим обеспечением земной поверхности для сопоставления измерений в космосе с наземными измерениями. Второе направление геодезического космического обеспечения связано с измерениями в спутниковой геодезии и измерениями в спутниковых группировках. Оно использует в качестве основы космическую геодезию (Calonico et al., 2019). Третье направление геодезического космического обеспечения связано с астрономическими измерениями и имеет в качестве развития геодезическую астрономию (Gospodinov, 2018). Четвертое направление геодезического космического обеспечения связано с современными технологиями интегрированной обработки пространственной информации. Оно использует как основу теорию и методы геоинформатики (Майоров, Цветков, 2013). Это направление включает интеграцию технологий и методов обработки данных. Оно имеет в качестве развития космическую геоинформатику (Bondur, Tsvetkov, 2015). Пятое направление геодезического космического обеспечения связано с необходимостью обработки больших объемов информации, что обусловлено совершенствованием средств измерений и разнообразием датчиков получающих пространственную информацию. Оно имеет в качестве развития решение проблемы «больших данных» (Буравцев, Цветков, 2019).

Геодезическая поддержка космических исследований интегрирует методы наземной геодезии, космической геодезии и космической геоинформатики. При рассмотрении геодезического космического обеспечения, необходимо остановиться на основных задачах геодезии, которые органично связаны с космическим геодезическим обеспечением. Основные задачи геодезии делятся на стратегические и тактические. Стратегические задачи наземной геодезии показаны на Рисунке 1. Они входят в геодезическое обеспечение космических исследований.

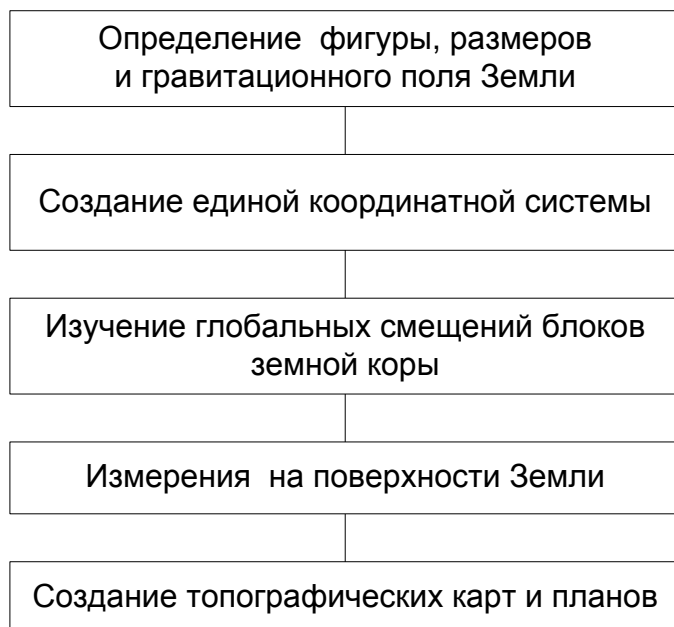


Рис. 1. Стратегические задачи земной геодезии

Стратегические задачи земной геодезии включают следующие научные направления:

- исследование фигуры Земли
- исследование гравитационного поля Земли;
- создание координатной системы на разные;

- проведение геодезических измерений на поверхности, подповерхностью и над поверхностью Земли;
- репрезентация пространственной информации на топографических картах и планах;
- формирование цифровых моделей и цифровых карт (Цветков, 2016);
- изучение динамических смещений земной коры.

Создание единой координатной системы на территории разного масштаба отдельного государства, континента и всей Земли в целом входит в задачи космического геодезического обеспечения (Merkowitz et al., 2019). Применительно к геодезическому обеспечению космических исследований развитие получили специальные геодезические сети для космических исследований (Merkowitz, 2019).

Тактические задачи геодезического космического обеспечения

Тактические задачи геодезического космического обеспечения не связаны напрямую с космическими исследованиями. Но косвенно через нормативы и методики они связаны с этим направлением. Их состав показан на Рисунке 2.

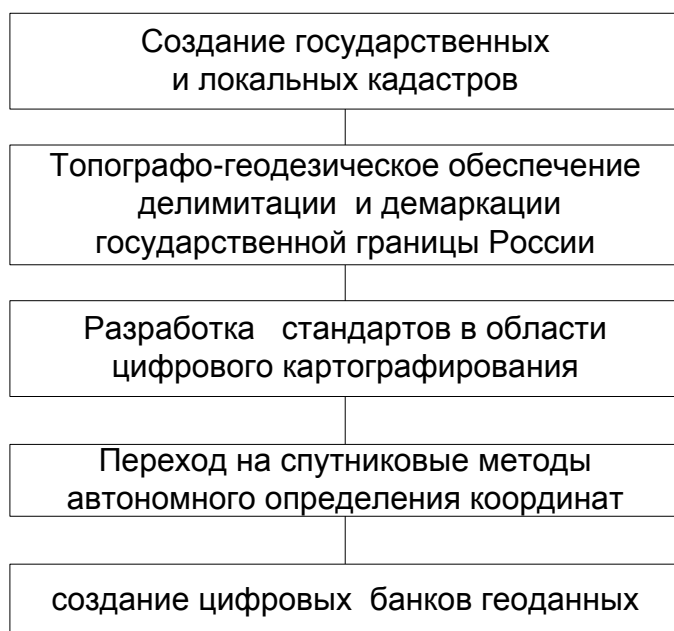


Рис. 2. Тактические задачи геодезии

Существует государственная программа перехода от наземных геодезических измерений к спутниковым методам измерений. Спутниковое определение координат, а также создание инфраструктуры пространственных данных в настоящее время опирается на космические исследования. Практические задачи геодезического обеспечения космических исследований имеют широкое значение (Савиных, 2012). Появились новые методы измерений, и увеличилась точность геодезических космических измерений.

Использование искусственных спутников Земли (ИСЗ) для решения геодезических задач способствовало развитию раздела геодезии – космической геодезии. Первоначально космическая геодезия занималась определением размеров и фигуры Земли, параметров ее гравитационного поля. Основой этих работ были результаты наблюдений, получаемых с ИСЗ разных типов и назначений, а также с борта космических аппаратов. Это определило первую группу геодезического обеспечения космических исследований как обеспечение наземных исследований из космоса и исследований околоземного космического пространства (Barmin et al., 2014). Затем исследования космической геодезии были направлены в сторону от Земли в космическое пространство. Большую роль при этом сыграла астероидно-кометная опасность. Это определило вторую группу геодезического обеспечения космических исследований как геодезического обеспечения космических внеземных исследований. Все пять направлений входят в эти две группы.

Спутниковая геодезия применяет методы нахождения связи между пунктами нахождения ИСЗ на основе законов динамики движения. Технологии спутниковой геодезии не требуют одновременного измерения во всех пунктах. Технологии спутниковой геодезии привели к созданию новой геодезической сети. Это космическая геодезическая сеть. Эта сеть на земной поверхности, которая создается и развивается на основе геодезических пунктов, положение которых определено по наблюдениям ИСЗ. Измерения на земной поверхности осуществляют на основе теории пространственной засечки. Согласно этой теории, необходимо использование не менее 4-х пространственных точек (спутников), видимых с этой поверхности.

К динамическим задачам геодезического обеспечения космических наземных исследований относят определение параметров гравитационного поля Земли путём измерения параметров орбит ИСЗ, вычисляемых по результатам позиционных и дальномерных наблюдений ИСЗ. Геодезическое обеспечение космических наземных исследований позволяет по-новому решать ряд существующих задач, что показано на [Рисунке 3](#).



Рис. 3. Применение космической геодезии в исследовании Земли и космического пространства

Спутниковая триангуляция. Одним из методов геодезического обеспечения космических наземных исследований относят синхронное наблюдение ИСЗ из нескольких пунктов на земной поверхности. Если в земной системе координат известны положения двух (или более) этих пунктов, то путём решения пространственных треугольников с одной из вершин в точке нахождения космического объекта можно вычислить положения также и др. пунктов, из которых проводились наблюдения.

Такой метод установления тринитарной ([Kudzh, Tsvetkov, 2020](#)) пространственной связи на земной поверхности между фиксированными пунктами называется спутниковой триангуляцией. При одновременных позиционных (координатных) и дальномерных (дистанционных) наблюдениях с ИСЗ тринитарные пространственные связи находят и при одном пункте с известным положением при использовании геодезического векторного хода. При таком подходе точка нахождения ИСЗ (точнее точка нахождения радиопередающей аппаратуры) обозначает координированную точку, фиксированную в пространстве в некоторый момент времени.

Измерение протяженных объектов. Измерение протяженных объектов на земной поверхности всегда представляло проблему в связи с особенностью отображения земной поверхности по зонам. С большой высоты человек получил возможность измерять протяженные линейные объекты на поверхности Земли (сотни и тысячи километров).

Измерение геопотенциала. Измерение геопотенциала осуществляют с применением динамических методов. Используя сравнительный анализ, сравнивают экспериментальные и

теоретически вычисленные положения ИСЗ в пространстве. На основе сравнения находят разности, которые позволяют строить динамическую модель. Разности между теорией и экспериментом относят на счет информационной неопределенности определения гармонических коэффициентов геопотенциала. По статистическим данным и соответствующим уравнениям можно уточнить первичные параметры гармонических коэффициентов геопотенциала. В свою очередь, уточненные значения коэффициентов геопотенциала позволяют с большей точностью определить местонахождение или локализацию ИСЗ, а также получить уточненное положение его орбиты. на орбите, Этот процесс можно повторять итеративно и методов последовательных приближений повышать точность определения коэффициентов геопотенциала. Таким образом получается инкрементная модель исследований, повышающая точность определения координат орбиты и параметры геопотенциала.

Для сравнения в 1950 г. был известен точно только один параметр – сжатие земного эллипсоида. Другой параметр – сжатие экватора был определен с меньшей точностью. После начала запусков ИСЗ появилась возможность получать значения гармонических коэффициентов высоких степеней. В частности были рассчитаны получены достаточно точные значения гармонических коэффициентов для порядка $n = 8$ и степени $m = 8$. Современные методы исследования геопотенциала дают возможность рассчитывать значения гармонических коэффициентов для порядка $n = 24$ и степени $m = 24$. Этот порядок и степень позволяют определять не два как в 1950, а около 500 коэффициентов, характеризующих модель гравитационного поля Земли. Таким образом, методы космической геодезии позволяют повышать точность пространственных моделей Земли и в принципе любой планеты при использовании спутниковых наблюдений этой планеты

Спутниковая альтиметрия. Это направление развивается с 1974 г. Лазерные, а также радиоальтиметры (высотомеры) на ИСЗ давали данные, позволяющие определять параметры орбиты ИСЗ. Здесь складывалась такая же ситуация как с геопотенциалом. С увеличением точности определения высот поверхности Земли появились методы введения поправок в параметры орбиты. Введение поправок в параметры орбиты дало возможность определять высоту орбиты с большей точностью. Более точное определение параметров орбиты привело к более точному определению высоты с помощью спутниковой альтиметрии. В частности, ИСЗ «Геос» с помощью альтиметра измеряет расстояние до поверхности океана с точностью 1-3 м. Такая точность позволяет уточнять форму геоида на участках Мирового океана и выявлять пространственные аномалии. Сравнительный анализ измерений с помощью альтиметра и измерений другими методами показал высокое информационное соответствие при измерении профиля геоида этими методами. Существует возможность повышения точности спутниковой альтиметрии до 10 см. Лазерная альтиметрия обеспечивает точность порядка определения высоты до 1 см.

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС). Эта сеть содержит постоянные и квазистационарные пункты. Эти пункты задают единую координатную систему на поверхности Земли, включая территорию Российской Федерации. Положение пунктов ФАГС может быть определено с предельной ошибкой не более $3 \text{ мм} \cdot 10^{-8}$ от радиуса Земли методами космической и спутниковой геодезии. В текущей ситуации Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть задает главную геодезическую основу и заменяет Астрономо геодезическую сеть (АГС). При формировании государственной геодезической сети ФАГС служить базовой сетью.

Основные пункты этой сети в среднем расположены на расстоянии 300000-500000 км². Смежные пункты этой сети в среднем расположены на расстоянии 650-1000 км. Расстояние активными пунктами в среднем составляет 1500-2000 км. Пункты сети закреплены с обеспечением стабильности их положения в плане и по высоте на длительный период.

Координаты пунктов сети определены в геоцентрической системе координат со средне квадратической ошибкой 10-15 см. Определение координат производят методами космической геодезии. Координаты пунктов сети при учете взаимного положения пунктов имеют более высокую точность и соответствуют примерно 2 см в плане и 3 см по высоте.

Кроме создания единой координатной среды ФАГС решает другие задачи. Глобальной задачей является повышение точности определения геоцентрической системы координат. Локальной задачей ФАГС является оценка динамики координат пунктов сети. Локальной задачей ФАГС является определение пунктах сети значений нормальных высот. Локальной задачей ФАГС является определение пунктах сети значений ускорений силы тяжести. Периоды

определений на пунктах сети пока установлены на срок 5-8 лет. При решении специальных задач эти периоды могут изменяться.

Уточненная геоцентрическая система координат задаваемая пунктами ФАГС согласовывается с астрономическими системами координат и связана с аналогичными пунктами других государств.

Геоцентрическая система координат, уточняемая с помощью ФАГС, комплементарная другим сетям. В первую очередь это высокоточная геодезическая сеть (ВГС), а также спутниковая геодезическая сеть 1 класса (СГС-1). СГС-1. Комплементарность этих сетей обеспечивает оптимальные условия для реализации точных и оперативных измерений с помощью спутниковой аппаратуры. Сети в целом обеспечивают создание Высокоточной Национальной геоцентрической системы координат.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Эти системы работают с помощью аппаратуры для спутников систем GPS и для спутников системы ГЛОНАСС. Есть аппаратура только для спутников систем GPS, есть только для спутников системы ГЛОНАСС. Есть гибридная аппаратура для обеих систем. Динамические измерения в реальном времени позволяют создавать единое навигационное поле для определения координат точек на земной поверхности и подвижных объектов. Эффективность применения геодезического обеспечения космических внеземных исследований проявляется на примере исследований в области кометно-астроидной опасности. Оно связано с вычислением траекторий опасных космических тел и измерениями на поверхности других планет или иных небесных тел.

3. Заключение

Исследования показывают, что методы геодезии и геоинформатики применимы для измерения и описания любого пространственного космического тела. Соответственно, геодезическое обеспечение применимо к космическим исследованиям как наземного, так и внеземного характера. Проведенные исследования показывают целесообразность введения нового термина космическое геодезическое обеспечение. Геодезическое космическое обеспечение является интегрированным научным направлением и включает космическую геодезию, геодезическую астрономию и космическую геоинформатику и спутниковую геодезию. Геодезическое космическое обеспечение является важным инструментом развития экономики и науки. Оно является важным ресурсом повышения потенциала научного развития. Геодезический подход во многих случаях является альтернативой картографическому подходу при описании объектов на поверхности Земли и других планетах. Современное космическое геодезическое обеспечение ориентировано на получение трехмерных цифровых моделей. Картографическое моделирование связано с регулярными поверхностями и является двумерным. Геодезический подход допускает не регулярность формы объекта гладкость поверхности. Геодезическое космическое обеспечение может описывать поверхность небесного тела с помощью универсальной триангуляционной модели. Технически триангуляционная поверхность может быть 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 небесном теле. Любой космический объект может быть покрыт 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

- Буравцев, Цветков, 2019 – Буравцев А.В., Цветков В.Я. Облачные вычисления для больших геопропространственных данных // *Информация и космос*. 2019. 3: 110-115.
- Майоров, Цветков, 2013 – Майоров А.А., Цветков В.Я. Геоинформатика как важнейшее направление развития информатики // *Информационные технологии*. 2013. 11: 2-7.
- Номоконов, Цветков, 2015 – Номоконов И.Б., Цветков В.Я. Многоаспектность информативности // *Дистанционное и виртуальное обучение*. 2015. 12: 74-80.
- Савиных, 2012 – Савиных В.П. Система получения координатно-временной информации для решения задач мониторинга // *Науки о Земле*. 2012. 3: 4-7.
- Савиных, 2019 – Савиных В.П. Новый взгляд на геодезию // *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*. 2019. № 1. С. 58-63.

[Савиных, Цветков, 2001](#) – Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. Москва, Картоцентр-Геодиздат, 2001. 224 с.

[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., Kulagin V.P., Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. Near Earth Space as an Object of Global Monitoring // *Solar System Research*. 2014. Vol. 48, No. 7, pp. 531-535. DOI: 10.1134/S003809461407003X

[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.

[Calonico et al., 2019](#) – Calonico D., Clivati C., Mura A., Levi F., de Cumis M.S., Amato L.S., ... & Maddaloni P. A Coherent Fibre Link for Space Geodesy / *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)*. 2019. (pp. 1-2). IEEE.

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

[Merkowitz et al., 2019](#) – Merkowitz S.M., Bolotin S., Elosequi P., Esper J., Gipson J., Hilliard L., Lemoine F.G. Modernizing and expanding the NASA Space Geodesy Network to meet future geodetic requirements // *Journal of Geodesy*. 2019. 93(11): 2263-2273.

[Merkowitz, 2019](#) – Merkowitz S. The NASA space geodesy network, 2019.

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*. Vol. 48, No. 7, pp. 531-535. DOI: 10.1134/S003809461407003X

[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.

[Buravtsev, Tsvetkov, 2019](#) – Buravtsev, A.V., Tsvetkov, V.Ya. (2019). Oblachnye vychisleniya dlya bol'shikh geoprostranstvennykh dannykh [Cloud computing for large geospatial data]. *Informatsiya i kosmos*. 3: 110-115. [in Russian]

[Calonico et al., 2019](#) – Calonico, D., Clivati, C., Mura, A., Levi, F., de Cumis, M.S., Amato, L.S., ... & Maddaloni, P. (2019). A Coherent Fibre Link for Space Geodesy. *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)*. (pp. 1-2). IEEE.

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

[Maiorov, Tsvetkov, 2013](#) – Maiorov, A.A., Tsvetkov, V.Ya. (2013). Geoinformatika kak vazhneishee napravlenie razvitiya informatiki [Geoinformatics as the most important direction in the development of informatics]. *Informatsionnye tekhnologii*. 11: 2-7. [in Russian]

[Merkowitz et al., 2019](#) – Merkowitz, S.M., Bolotin, S., Elosequi, P., Esper, J., Gipson, J., Hilliard, L., Lemoine, F.G. (2019). Modernizing and expanding the NASA Space Geodesy Network to meet future geodetic requirements. *Journal of Geodesy*. 93(11): 2263-2273.

[Merkowitz, 2019](#) – Merkowitz S. (2019). The NASA space geodesy network.

[Nomokonov, Tsvetkov, 2015](#) – Nomokonov, I.B., Tsvetkov, V.Ya. (2015). Mnogoaspektnost' informativnosti [The multidimensionality of information content]. *Distsionnoe i virtual'noe obuchenie*. 12: 74-80. [in Russian]

[Savinykh, 2012](#) – Savinykh, V.P. (2012). Sistema polucheniya koordinatno-vremennoi informatsii dlya resheniya zadach monitoringa [A system for obtaining coordinate-time information for solving monitoring problems]. *Nauki o Zemle*. 3: 4-7. [in Russian]

[Savinykh, 2019](#) – Savinykh, V.P. (2019). Novyi vzglyad na geodeziyu [A new look at geodesy]. *ITNOU: Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*. 1: 58-63. [in Russian]

[Savinykh, Tsvetkov, 2001](#) – Savinykh, V.P., Tsvetkov, V.Ya. (2001). Geoinformatsionnyi analiz dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Geoinformation analysis of remote sensing data]. Moskva, Kartotsentr-Geodezizdat, 224 p. [in Russian]

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

Геодезическое обеспечение космических исследований

Владимир Владимирович Ознамец ^{а, *}

^аМосковский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК),
Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрено геодезическое обеспечение космических исследований. Показано, что геодезия является наукой о пространстве и в силу этого геодезическое обеспечение может быть распространено на космическое пространство. Показано, что составными частями геодезического обеспечения космических исследований являются: космическая геодезия, геодезическая астрономия, спутниковая геодезия и космическая геоинформатика. Показано, что геодезическое обеспечение космических исследований имеет пять направлений развития. Геодезическое обеспечение космических исследований имеет две группы, каждая из которых включает все пять направлений. Первая группа направлена на поддержку исследований Земли из космоса и околоземное космическое пространство и направленное на исследование внеземного космического пространства. Вторая группа геодезического обеспечения космических исследований направлена поддержку исследований внеземного пространства. Детализированы стратегические и тактические задачи геодезического обеспечения космических исследований. Основная модель, которую формируют на основе геодезического обеспечения космических исследований, это трехмерная модель и триангуляционная модель для покрытия поверхности пространственных объектов. Статья обосновывает новый термин «геодезическое обеспечение космических исследований». Статья подтверждает вывод о том, что геодезия и геоинформатика – применимы для исследования и измерений космических тел.

Ключевые слова: геодезия, геодезическое обеспечение, космические исследования, геодезическое обеспечение космических исследований, космическая геодезия, космические геодезические измерения.

* Корреспондирующий автор
Адреса электронной почты: voznam@bk.ru (В.В. Ознамец)