

Copyright © 2021 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
 2021. 7(1): 3-12

DOI: 10.13187/rjar.2021.1.3
www.ejournal28.com



Articles

Construction and Design of Objects on the Surface of Planets

Roman G. Bolbakov ^{a, *}

^aRussian Technologies University (RTU MIREA), Russian Federation

Abstract

The article examines the problem of designing structures on planets taking into account the curvature of the planet's surface. The approach of comparative planetology is used, which consists in the possibility of transferring the methods of terrestrial technologies to other planets. The difference between the planetocentric and topocentric coordinate systems is shown. The main problem of determining the altitude on the planets is revealed. It consists in a double way of determining the height. The first way is related to vertical measurements. The second method involves measuring the height between the surfaces of the planet model. Regardless of this problem, the problem of contradiction between the designs of structures in the Cartesian coordinate system and their implementation in the curvilinear system associated with the planet's surface has been identified. This contradiction leads to the fact that rectangular structures on the surface of the planet become trapezoidal. This situation is due to the fact that when designing verticals are considered as parallel lines, but in reality they are not. The verticals are directed normal to the surface and intersect at the planet's center of mass. The article gives an assessment of the admissibility of using the Cartesian system on the surface of different planets. The article gives an estimate of the discrepancy for different planets between the horizontal chord and the arc corresponding to the real curvature of the planet.

Keywords: space research, Cartesian coordinate system, curvature of the planet's surface, vertical, ellipsoid, curvilinear coordinate system, spatial relations, level surface.

1. Введение

Освоение космического пространства связано с понятиями информационное пространство и информационное поле (Tsvetkov, 2014). Поскольку прямую информацию о планетах получить сложно применяют методы сравнительной планетологии (Glassmeier, 2020; Sauro et al., 2020; Tsvetkov, 2015; Bean et al., 2017). Сравнительная планетология дает основание применять земные технологии и методы для изучения и использования на других планетах. При освоении космического пространства возникает задача возведения сооружений на поверхности планет или их спутников. При строительстве объектов на поверхности планет возникает противоречие между исходным проектом, который, как правило, создается в прямоугольных Декартовых координатах, и конструированием объекта в условия реальной кривизны поверхности планеты ее реальной массы. Проблема

* Corresponding author
 E-mail addresses: bolbakov@mirea.ru (R.G. Bolbakov)

эта связана со спецификой методики определения высоты как земных условиях, так и в условиях любой другой планеты или небесного тела. Один способ определения высоты является геометрическим связан с понятием вертикали на поверхности планеты. Другой способ определения высоты является морфологическим и связан с моделированием некой криволинейной поверхности, которую называют поверхностью уровня или поверхностью нулевой высоты (Бородко и др., 2008; Torge, Müller, 2012). Для отсчета высот моделируют другие поверхности, подобные исходной. Расстояние между поверхностями (нормаль) считают высотой в данной точке. Поверхность такого типа моделируется исходя из кривизны поверхности планеты, массы планеты, которая определяет силу тяжести и гравитационных аномалий. При отсутствии гравитационных аномалий такая поверхность уровня близка к сферической. В этом случае главный фактор – сила тяжести на поверхности планеты. Такие модели называют сфероидическими, то есть близкими к сфере. Сфероид имеет постоянную кривизну во всех точках. Он имеет один радиус кривизны, а нормаль к поверхности сфероида направлена к центру масс. В этом случае нормаль к поверхности модели планеты и вертикаль совпадают по направлению. В земных условиях сфероид называют геоидом (Бородко и др., 2008; Eteje, 2018; Das et al., 2018). При наличии гравитационных аномалий или четко выраженной не сферической формы приходится создавать математическую модель фигуры планеты, которая как правило является эллипсоидальной. Большинство планет Солнечной системы имеют такую форму, что обусловлено механизмом их образования. В этом случае для моделирования используют два фактора: форма планеты и распределение потенциал силы тяжести на поверхности планеты. Такие модели называют эллипсоидальными, то есть близкими к поверхности эллипсоида. В этом случае высоты определяют не по направлению вертикали, а по нормали к поверхности эллипсоида. При этом задают эталонную отсчетную поверхность (Бородко и др., 2008; Torge, Müller, 2012) нулевой высоты. Семейство таких поверхностей называют поверхностями уровня (Ганиева, 2019).

2. Обсуждение и результаты

Определение высот с использованием поверхностей уровня

Для всех планет существуют проблемы пространственных отношений. Эти проблемы связаны с относительным расположением (Цветков, 2013; Цветков, 2016) объектов на поверхности планеты. Эти проблемы связаны с пространственными отношениями высоты как расстояния от центра масс и высоты связанной с формой поверхности планеты (Романов, Устинова, 2020). Эти проблемы связаны с координатными преобразованиями (Цветков, Максимова, 2013; Yan et al., 2020; Цветков, 2016). Проблемой исследования пространственных отношений в космосе занимается космическая геоинформатика (Савиных, 2016; Bondur, Tsvetkov, 2018), геодезическая астрономия (Господинов и др., 2017) и космическая геодезия. В земных условиях для определения поверхности уровня или равной высоты используют технологии нивелирования (Бородко и др., 2008; Torge, Müller, 2012), которые, за неимением другого, будут использовать и на поверхностях других планет. Нивелированием называют комплекс работ с помощью специального прибора – нивелира. С его помощью и с использованием специальных реек инструментально определяют превышение между точками поверхности. Основным критерием нивелирования является направление вертикали, которое определяют как направление к центру масс планеты. При возможности использования сфероидической модели направление вертикали всегда совпадает с нормалью к поверхности.

При необходимости использования эллипсоидальной модели возникает различие между вертикалью и нормалью к поверхности фигуры планеты. Трехосный эллипсоид или эллипсоид вращения имеют поверхность переменной кривизны. Поэтому для такой модели направление к центру масс и нормаль к поверхности уровня различаются. Для эллипсоида, как модели любой планеты, максимальное расхождение имеется на 45-и градусной широте. Оно может составлять около 40 секунд. Вертикаль для эллипсоидальной модели совпадает с нормалью только на полюсах и экваторе.

Кривизна поверхности планеты задает проблему пространственных отношений между сферической системой координат, связанной с центром масс планеты и Декартовой системой координат (Розенберг, 2009; Dudnik et al., 2018), связанной с поверхностью

планеты. Для планет подобных Земле и больше по радиусу планеты существуют участки, для которых можно применять Декартову систему координат при относительно не точных конструкциях. Для планет с радиусом близким к земному (6371 км) это участки примерно с размером 20 x 20 км. Для Юпитера с радиусом 69911 км это участки примерно 220 x 220 км. Для Луны с радиусом 1737, 1 км – это участки примерно 5, 46 x 5, 46 км.

Для малых небесных тел необходимо применять только сферическую систему координат. Существуют экзотические работы [ныр] – применять эллипсоидальную модель на малых небесных телах неправильной формы. По нашему мнению, это математическая казуистика, связанная с попыткой картографического представления тел с неправильной геометрической формой с помощью правильной геометрии.

Пространственные отношения на поверхности планет

Существует объективное противоречие, связанное с проектированием и выносом в натуру в разных системах геометрии. Проекты объектов выполняют в прямоугольной Декартовой системе координат. В этой системе координат вертикальные линии проекта являются параллельными прямыми. В этой системе координат горизонтальные линии проекта являются параллельными прямыми и не пересекаются. Горизонтальные линии проекта описывают горизонтальные плоскости. Горизонтальные плоскости проекта являются поверхностями равной высоты. При выносе в натуру на криволинейную поверхность планеты прямоугольные проекты трансформируются в другую форму. Вертикальные линии на поверхности планеты не являются параллельными, а пересекаются примерно в центре масс планеты ([Рисунок 1](#))

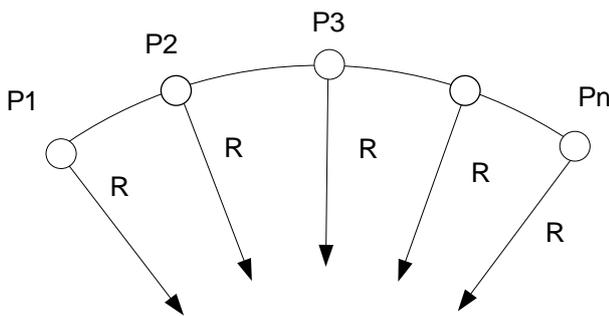


Рис. 1. Вертикали и физическая поверхность уровня

Горизонтальные плоскости трансформируются в криволинейные поверхности равных высот ([Рисунок 1](#)). Использование нивелиров, задающих равные высотные отметки в точках P1, P2, P3, Pn ([Рисунок 1](#)) – формирует не горизонтальную линию, а геодезическую линию, которая прямой не является. Использование нивелиров, задающих равные высотные отметки, формирует не горизонтальную плоскость, а поверхность уровня, которую в земной геодезии называют «уровенная поверхность» ([Бородко и др., 2008](#); [Ганиева, 2019](#); [Романов, Устинова, 2013](#)), которая плоскостью не является, а является криволинейной поверхностью второго порядка.

На [Рисунке 1](#) точки P1, P2, P3, Pn – точки стояния нивелиров, соответствующие равным высотам. R – радиус кривизны которому соответствует направление вертикали в планетоцентрической системе координат. На [Рисунке 1](#) отчетливо видно, что вертикали не являются параллельными и пересекаются в центре масс планеты.

На малых расстояниях криволинейностью основания сооружения и не параллельностью вертикальных линий пренебрегают. Однако при необходимости строительства высокоточных сооружений ([Krasnoperov, Sidorov, 2015](#); [Peyret et al., 2000](#)), для которых необходимо соблюдение строгой горизонтальности уровней, необходимы специальные расчеты, учитывающие кривизну и рассчитывающие поправки для построения горизонтальных плоскостей.

Системы координат при исследовании планет

На поверхностях планет используют разные координатные системы. Для моделирования поверхности планет применяют планетоцентрические, референсные (модельные), топоцентрические координатные системы и поверхностные или фрагментарные системы.

Планетоцентрические системы координат (Розенберг, Цветков, 2009) связывают с центром масс планеты. В основе этих систем координатных положена модель либо сфероида, либо эллипсоида. Для модели эллипсоида необходимо задавать параметры эллипсоида, плоскость экватора, полюса и центр. Планетный эллипсоид служит для моделирования формы планеты, если она похожа на эллипсоид. Поэтому главной задачей такой модели есть моделирование формы.

Референсные системы координат связывают с моделью референц-эллипсоида. Эти системы используют для изученных территорий. Дополнительной процедурой является ориентирование референц-эллипсоида в теле планеты. Референц-эллипсоиды задают систему высот. Поэтому в отличие от общеземного эллипсоида для ориентирования и закрепления референц-эллипсоида в теле планеты необходимо задать исходные геодезические даты (*datum*). Главной задачей такой модели есть моделирование высот на поверхности планеты.

Планетоцентрической системой координат принято называть криволинейную систему координат (X, Y, Z) , у которой начало отсчета O совпадает с центром масс планеты (Рисунок 2). Эта система координат связана со сферической системой координат.

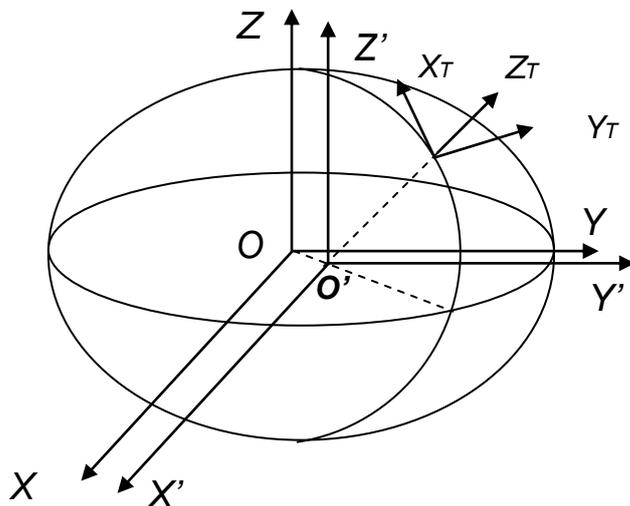


Рис. 2. Планетоцентрическая и топоцентрическая системы координат (Tsvetkov, 2018)

Если начало отсчета системы O' располагается вблизи центра масс, то такая система координат (X', Y', Z') называется квази планетоцентрической (Рисунок 2). В планетоцентрической системе координат ось Z направлена на северный полюс планеты (Рисунок 2). Ось X направлена в точку пересечения экватора с Гринвичским меридианом. Ось Y дополняет образованную экваториальную систему до правой. Планетоцентрические системы координат используют в первую очередь для навигации при движении объектов околоземном пространстве (Barmin et al., 2014) или на поверхности планеты. Планетоцентрическая система одна, а топоцентрических может быть много. Планетоцентрическая система координат является криволинейной и может быть рассмотрена как глобальная, а топоцентрические системы координат могут быть рассмотрены как локальные.

Топоцентрическую систему координат (Рисунок 2) используют для измерений на поверхности планеты и строительства объектов на поверхности большой планеты. Ее качественным отличием от планетоцентрической является то, что она использует

Декартову систему координат. Эту систему координат можно рассматривать как скользящую Декартову систему координат, которая связана с одной точкой поверхности планеты.

Топоцентрической системой (**Рисунок 2**) называют прямоугольную систему координат (XT, YT, ZT), у которой начало отсчета находится на поверхности планеты или вблизи нее. Ось ZT совпадает с нормалью к поверхности сфероида или эллипсоида. Ось XT лежит в плоскости меридиана и направлена на северный полюс. Ось YT дополняет образованную систему до левой. Система участвует в суточном вращении планеты, оставаясь неподвижной относительно точек поверхности.

Измерение высот и понятие вертикали

Ось Z топоцентрической системы (**Рисунок 2**) задает условную вертикаль и служит основой измерения высот. Однако в геодезической литературе существует много противоречий. «Вертикаль – прямая в пространстве, перпендикулярная к горизонтальной плоскости». Горизонтальных плоскостей не существует в природе. Поверхность любой планеты не является горизонтальной. Большинство крупных планет имеют форму близкую к сферической. В силу этого для определения высот необходимо использовать другие подходы.

В работе А.В. Бородко и др. дано определение «Высота – расстояние между точками объекта по вертикали» (**Бородко и др., 2008: 124**). Это применимо для разных планет. На этой же странице «высота одной и той же точки может иметь различные значения, зависящие от пути нивелирования, а сумма превышений по замкнутому полигону не равна нулю». В статье о динамической высоте говорится: «Высота динамическая – высота, которая при перемещении точки по уровенной поверхности не меняется». Такое явление обусловлено расхождением направления нормали к поверхности уровня с направлением вертикали в центр масс (**Романов, Устинова, 2020**).

Вывод. При измерениях на поверхности планет используют декартову систему координат, вертикаль которой не всегда совпадает с вертикалью, направленной в центр масс планеты. Использование декартовых координат требует обоснования.

Трансформация конструкций из-за кривизны планеты

На **Рисунке 3** дано схематичное изображение проекта сооружения, который планируется к установке на поверхность планеты.

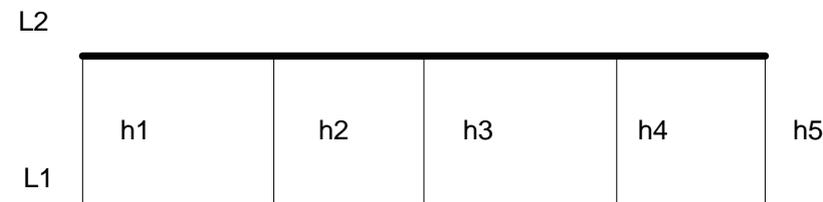


Рис. 3. Схематичное изображение проекта прямоугольного сооружения

Проект сооружения на **Рисунке 3** имеет прямоугольную форму. На **Рисунке 3** показано основание или нижний уровень $L1$. Оно параллельно верхней границе сооружения $L2$. Сооружение имеет равные параллельные высоты пяти сечений проекта ($h1=h2=h3=h4=h5$). На **Рисунке 4** дан результат выноса этого проекта на поверхность планеты.

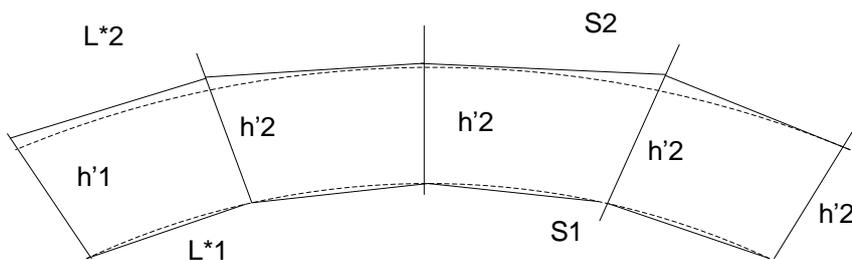


Рис. 4. Результат монтажа проекта на поверхности планеты

На [Рисунке 4](#) видно, что прямоугольное сооружение преобразуется в трапецевидное. На [Рисунке 4](#) показано, что горизонтальное основание L_1 переходит в ломанную кусочно-линейную поверхность L^*1 , которая задается поверхностью уровня S_1 . Верхняя граница сооружения L_2 переходит в ломанную линию L^*2 , которая задается поверхностью уровня S_2 . Высоты становятся приблизительно равными ($h'_1 \approx h'_2 \approx h'_3 \approx h'_4 \approx h'_5$). С помощью нивелирования обнаружит ломанную кривую невозможно. Она будет по измерениям соответствовать горизонтали L_2 на [Рисунке 3](#). Для учета влияния кривизны поверхности планеты на геометрию сооружения используем схему на [Рисунке 5](#).

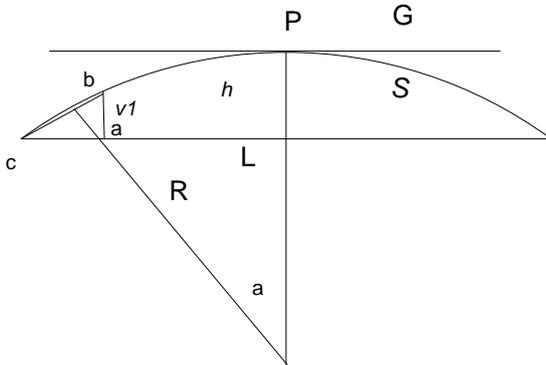


Рис. 5. Схема расчета поправок для дуги

На [Рисунке 5](#) S – дуга криволинейной поверхности равного уровня, L – хорда этой дуги. Эта хорда и параллельна горизонтальной линии G к точке поверхности планеты P . Горизонтальная линия G задает горизонтальную плоскость топоцентрической системы координат. Величина v обозначает поправку или расхождение между горизонтальной плоскостью и сечением криволинейной поверхности уровня. Величина h обозначает высоту хорды или максимальное расхождение между горизонтальной плоскостью и криволинейным участком поверхности планеты. Величина l есть смещение по горизонтальной оси. Величина $v/2$ есть поправка между дугой S и хордой для смещения l .

Для того чтобы рассчитать поправки по высоте воспользуемся схемой на [Рисунке 5](#). Из курса геометрии известно, что высота хорды определяется по формуле

$$h = R - \frac{1}{2} (4R^2 - L^2)^{1/2} \quad (1)$$

В выражении (1) h – высота хорды или максимальное отклонение горизонтальной L от криволинейной поверхности, R – радиус кривизны планеты, L – длина хорды или длина основания сооружения, которое возводят на поверхности планеты.

Для участка в 20 км на земной поверхности расстояние между хордой и дугой в соответствии с выражением (1) будет равно $h = 7,848066$ метров. То есть разница в высоте составляет около 8 метров. Это значительная величина. Относительная ошибка составляет $1,23184E-06$ или около одной миллионной. Для участка Юпитера, который можно считать плоским разница в высоте составляет около $h = 86$ метров. Для участка Луны, который можно считать плоским разница в высоте составляет около $h = 2$ метров.

Если перейти к конечному объекту, который устанавливают на поверхности планеты с длиной 400 м, то для него разница между поверхностью уровня и горизонталью составляет в земных условиях 6,25 мм. Это означает что использование нивелиров при проектировании объекта на поверхности планеты с радиусом, близким к земному, поднимет центральную часть сооружения на 6.25 мм по отношению к краям объекта. Важно, что именно нивелирование задает отклонение высоты основания сооружения от строгой горизонтальной плоскости ([Рисунок 4](#)). Для Юпитера эта поправка для сооружения длиной 400 м составит примерно 0,29 мм. Для луны эта поправка для сооружения длиной 400 м составит примерно 11,5 мм. Почти вдвое больше, чем на Земле. Вывод: поправка по высоте значима для горизонтальных сооружений и ее необходимо учитывать при высокоточных работах.

3. Заключение

Основная проблема в определении высоты состоит в отклонении вертикали, направленной в центр масс планеты, от нормали к эллипсоидальной модели планеты. Строительство объектов на поверхности планет необходимо выполнять с использованием сферической геометрии. Проектирование объектов для космического строительства должно использовать криволинейные координаты. Это обусловлено действием силы тяжести. Для сооружений, возводимых на поверхности любой планеты, необходима оценка кривизны поверхности планеты и оценка допустимости применения проектов в Декартовой системе координат. Вертикали в реальных планетных условиях не являются параллельными линиями. В условиях кривизны поверхности планеты прямоугольные проекты преобразуются в трапециевидные конструкции с непараллельными стенами. Для разных условий эксплуатации планетных сооружений необходимо принимать решение о допустимости или не допустимости искривления основания объекта. Несоответствие между высотой криволинейной поверхности и горизонтальной плоскостью хорды для разных планет достигает значений от 2 метров до 90 метров. Принципиально, что погрешность по высоте больше, чем погрешности плановых координат. Это необходимо учитывать при строительстве высокоточных объектов и отказаться от обычных методов нивелирования и переходить к лазерным уровням.

Литература

- [Бородко и др., 2008](#) – Бородко А.В., Бугаевский Л.М., Верещака Т.В., Запругаева Л.А., Иванова Л.Г., Книжников Ю.Ф., Савиных В.П., Спиридонов А.И., Филатов В.Н., Цветков В.Я. Геодезия, Картография, Геоинформатика, Кадастр. Энциклопедия. В 2 томах. / Под редакцией А.В. Бородко, В.П. Савиных. Москва, 2008. Том I А-М.
- [Ганиева, 2019](#) – Ганиева С.А. Об эволюции параметров уровенной поверхности Земли // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2019. № 8-1(86).
- [Господинов, 2017](#) – Господинов Г.С. Геодезическая астрономия и космическая геоинформатика // *Наука и технологии железных дорог*. 2017. Т.1. 1(1). С. 45-50.
- [Розенберг, Цветков, 2009](#) – Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Координатные системы в геоинформатике – МГУПС, 2009. 67 с.
- [Романов, Устинова, 2020](#) – Романов А.А., Устинова М.В. Анализ динамики уровенной поверхности океана в акватории залива Аляска по данным спутниковой альтиметрии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 4. С. 256-266.
- [Савиных, 2016](#) – Савиных В.П. Развитие космической геоинформатики // *Славянский форум*. 2016. 2(12). С. 223-230.
- [Цветков, 2013](#) – Цветков В.Я. Виды пространственных отношений // *Успехи современного естествознания*. 2013. № 5. С. 138-140.
- [Цветков, 2016](#) – Цветков В.Я. Алгоритм преобразования координат пространственных объектов при построении трехмерных сцен и карт // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №10-2. С. 186-189.
- [Цветков, 2016](#) – Цветков В.Я. Отношение, связь, соответствие // *Славянский форум*. 2016. 2(12): 272-276.
- [Цветков, Максимова, 2013](#) – Цветков В.Я., Максимова М.В. Современный геоинформационный мониторинг // *Геодезия и картография*. 2013. № 8. С. 57-59.
- [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
- [Bean et al., 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. Т. 841. № 2. Pp. L24.
- [Das, 2018](#) – Das R.K. et al. Polynomial interpolation methods in development of local geoid model // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2018. Т. 21. № 3. Pp. 265-271.
- [Dudnik, 2018](#) – Dudnik A.E. et al. Geocentric Coordinate Systems and Actual Problems of Modernization of the State Geodetic Network // *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2018. Т. 931. Pp. 687-691.

- Eteje et al., 2018 – Eteje S.O. et al. Procedure for the Determination of Local Gravimetric-Geometric Geoid Model // *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2018. T. 4. № 8. Pp. 206-214.
- Glassmeier, 2020 – Glassmeier K.H. Solar system exploration via comparative planetology // *Nature Communications*. 2020. T. 11. № 1. Pp. 1-4.
- Krasnoperov et al., 2015 – Krasnoperov R.I., Sidorov R.V., Soloviev A.A. Modern geodetic methods for high-accuracy survey coordination on the example of magnetic exploration // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. T. 55. № 4. Pp. 547-554.
- Peyret et al., 2000 – Peyret F., Betaille D., Hintzy G. High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning // *Automation in construction*. 2000. T. 9. № 3. Pp. 299-314.
- Sauro, 2012 – Sauro F. et al. Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology // *Earth-Science Reviews*. 2020. P. 103288.
- Torge, Müller, 2012 – Torge W., Müller J. Geodesy. Walter de Gruyter. Geodesy. 4th Edition, Walter de Gruyter, Berlin, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110250008>
- Tsvetkov, 2014 – Tsvetkov V.Ya. Information Space, Information Field, Information Environment // *European researcher*. 2014. № 8-1(80): 1416-1422.
- Tsvetkov, 2018 – Tsvetkov V.Ya. The Development of the Direction "Comparative Planetology" // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2018. 4(1): 34-41.
- 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.
- Yan, 2020 – Yan X. et al. Study on the Method of Conversion from Beidou Coordinate System to Local Coordinate System / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020. T. 440. № 5. P. 052082.

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
- Bean et al., 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*. T. 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.
- Borodko i dr., 2008 – Borodko, A.V., Bugaevskii, L.M., Vereshchaka, T.V., Zapryagaeva, L.A., Ivanova, L.G., Knizhnikov, Yu.F., Savinykh, V.P., Spiridonov, A.I., Filatov, V.N., Tsvetkov, V.Ya. (2008). Geodeziya, Kartografiya, Geoinformatika, Kadastr. Entsiklopediya. V 2 tomakh [Cartography, Geoinformatics, Cadastre. Encyclopedia. In 2 volumes]. Pod redaktsiei A.V. Borodko, V.P. Savinykh. Moskva. Tom I A-M. [in Russian]
- Das, 2018 – Das, R.K. et al. (2018). Polynomial interpolation methods in development of local geoid model. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. T. 21. 3: 265-271.
- Dudnik, 2018 – Dudnik, A.E. et al. (2018). Geocentric Coordinate Systems and Actual Problems of Modernization of the State Geodetic Network. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. T. 931. Pp. 687-691.
- Eteje et al., 2018 – Eteje, S.O. et al. (2018). Procedure for the Determination of Local Gravimetric-Geometric Geoid Model. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. T. 4. 8: 206-214.
- Ganieva, 2019 – Ganieva, S.A. (2019). Ob evolyutsii parametrov urovennoi poverkhnosti Zemli [On the evolution of the parameters of the level surface of the Earth]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 8-1(86). [in Russian]
- Glassmeier, 2020 – Glassmeier, K.H. (2020). Solar system exploration via comparative planetology. *Nature Communications*. T. 11. 1: 1-4.
- Gospodinov, 2017 – Gospodinov, G.S. (2017). Geodezicheskaya astronomiya i kosmicheskaya geoinformatika [Geodetic astronomy and space geoinformatics]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*. T.1. 1(1): 45-50. [in Russian]

Krasnoperov et al., 2015 – Krasnoperov, R.I., Sidorov, R.V., Soloviev, A.A. (2015). Modern geodetic methods for high-accuracy survey coordination on the example of magnetic exploration. *Geomagnetism and Aeronomy*. T. 55. 4: 547-554.

Peyret et al., 2000 – Peyret, F., Betaille, D., Hintzy, G. (2000). High-precision application of GPS in the field of real-time equipment positioning. *Automation in construction*. T. 9. 3: 299-314.

Romanov, Ustinova, 2020 – Romanov, A.A., Ustinova, M.V. (2020). Analiz dinamiki urovnenoi poverkhnosti okeana v akvatorii zaliva Alyaska po dannym sputnikovoi al'timetrii [Analysis of the dynamics of the ocean level surface in the water area of the Gulf of Alaska according to satellite altimetry data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. T. 17. 4: 256-266. [in Russian]

Rozenberg, Tsvetkov, 2009 – Rozenberg, I.N., Tsvetkov, V.Ya. (2009). Koordinatnye sistemy v geoinformatike – MGUPS [Coordinate systems in geoinformatics – MGUPS]. 67 p. [in Russian]

Sauro, 2012 – Sauro, F. et al. (2012). Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology. *Earth-Science Reviews*. P. 103288.

Savinykh, 2016 – Savinykh, V.P. (2016). Razvitie kosmicheskoi geoinformatiki [Development of space geoinformatics]. *Slavyanskii forum*. 2(12): 223-230. [in Russian]

Torge, Müller, 2012 – Torge, W., Müller, J. (2012). Geodesy. Walter de Gruyter. Geodesy. 4th Edition, Walter de Gruyter, Berlin. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110250008>

Tsvetkov, 2013 – Tsvetkov, V.Ya. (2013). Vidy prostranstvennykh otnoshenii [Types of spatial relations]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 5: 138-140. [in Russian]

Tsvetkov, 2014 – Tsvetkov, V.Ya. (2014). Information Space, Information Field, Information Environment. *European researcher*. 8-1(80): 1416-1422.

Tsvetkov, 2016 – Tsvetkov, V.Ya. (2016). Algoritm preobrazovaniya koordinat prostranstvennykh ob"ektov pri postroenii trekhmernykh stsen i kart [Algorithm for transforming the coordinates of spatial objects when constructing three-dimensional scenes and maps]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 10-2: 186-189. [in Russian]

Tsvetkov, 2016 – Tsvetkov, V.Ya. (2016). Otnoshenie, svyaz', sootvetstvie [Attitude, connection, conformity]. *Slavyanskii forum*. 2(12): 272-276. [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.

Tsvetkov, Maksimova, 2013 – Tsvetkov, V.Ya., Maksimova, M.V. (2013). Sovremennyyi geoinformatsionnyi monitoring [Modern geoinformation monitoring]. *Geodeziya i kartografiya*. 8: 57-59. [in Russian]

Yan, 2020 – Yan, X. et al. (2020). Study on the Method of Conversion from Beidou Coordinate System to Local Coordinate System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. T. 440. 5: 052082.

Строительство и проектирование объектов на поверхности планет.

Роман Геннадьевич Болбаков ^{a, *}

^a Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Российская Федерация

Аннотация. Статья исследует проблему конструирования сооружений на планетах с учетом кривизны поверхности планеты. Используется подход сравнительной планетологии, который заключается в возможности переноса методов земных технологий на другие планеты. Показано различие между планетоцентрической и топоцентрической системами координат. Выявлена основная проблема определения высоты на планетах. Она заключается в двойном способе определения высоты. Первый способ связан с измерениями по вертикали. Второй способ связан с измерением высоты между поверхностями модели планеты. Независимо от этой проблемы выявлена проблема противоречия между проектами сооружений в декартовой системе координат и их реализацией в криволинейной

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: bolbakov@mirea.ru (Р.Г. Болбаков)

системе, связанной с поверхностью планеты. Это противоречие приводит к тому, что прямоугольные сооружения на поверхности планеты становятся трапециевидными. Такая ситуация обусловлена тем, что при проектировании вертикали рассматривают как параллельные линии, а в реальности они таковыми не являются. Вертикали направлены по нормали к поверхности и пересекаются в центре масс планеты. Статья дает оценку допустимости применения Декартовой системы на участке поверхности разных планет. Статья дает оценку расхождения для разных планет между горизонтальной хордой и дугой соответствующей реальной кривизне планеты.

Ключевые слова: космические исследования, декартова система координат, кривизна поверхности планеты, вертикаль, эллипсоид, криволинейная система координат, пространственные отношения, поверхность уровня.