

УДК 528.283

EDN [DXFIIF](#)



## Исследование дрейфа геомагнитных полюсов Земли

**И.Н. Карцан<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», д. 31, Красноярск, 660037, Россия

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, ул. Капитанская, д.2, Севастополь, 299011, Россия

\*E-mail: [kartsan2003@mail.ru](mailto:kartsan2003@mail.ru)

**Аннотация.** Геоцентрические системы координат являются одними из наиболее естественных при моделировании полётов космических аппаратов. Так как последние запускаются именно с Земли. Кроме того, адекватное (в плане сложности) описание многих физических явлений требует использования нескольких координатных систем. Рассмотрены основные геоцентрические системы, так или иначе используемые в современной геофизике и астрофизике. Все системы координат и преобразования, являются геоцентрическими, что означает, что за начало их отсчета берется центр масс Земли. Преобразования же между ними, соответственно, сводятся только к преобразованию поворота без дополнительного параллельного переноса и/или изменения масштабов. Все приводимые системы являются декартовыми прямоугольными системами координат. Для задания каждой из них, таким образом, достаточно только указать направление одной из осей (как правило это ось  $Z$ ) и ориентацию второй оси в плоскости, перпендикулярной этому направлению. Третья ось следует автоматически из требования, чтобы орты такой системы образовывали правую тройку векторов.

**Ключевые слова:** географические и геодезические координаты, геомагнитные координаты, ориентация магнитного поля.

## Study of the Earth's geomagnetic pole drift

**I.N. Kartsan<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russia

<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences», 2, Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

\*E-mail: [kartsan2003@mail.ru](mailto:kartsan2003@mail.ru)

**Abstract.** Geocentric coordinate systems are among the most natural in modeling of spacecraft flights. Since the latter are launched precisely from the Earth. In addition, adequate (in terms of complexity) description of many physical phenomena requires the use of several coordinate systems. The basic geocentric systems, one way or another used in modern geophysics and astrophysics are considered. All coordinate systems and transformations are geocentric, which means that the Earth's center of mass is taken as their origin. The transformations between them, respectively, are reduced only to the transformation of rotation without additional parallel transfer and/or change of scales. All these systems are Cartesian rectangular coordinate systems. To specify each of them, therefore, it is sufficient only to specify the direction of one of the axes (usually the  $Z$  axis) and the orientation of the second axis in the plane perpendicular to this direction. The third axis follows automatically from the requirement that the orthonormal basis of such a system form the right triplet of vectors.

**Keywords:** geographic and geodesic coordinates, geomagnetic coordinates, magnetic field orientation.

## 1. Введение

На сегодняшний день в основе измерений абсолютных координат в космическом пространстве на масштабах Солнечной системы лежит псевдо-инерциальная Международная Небесная Система Отсчёта (англ. International Celestial Reference System) с началом координат в барицентре Солнечной системы. Эта система создаётся и поддерживается Международной службой вращения Земли. Её взаимно-перпендикулярные оси направлены в точки небесной сферы, близко к которым располагались точки с экваториальными координатами  $(\alpha, \delta) = (0^\circ, 90^\circ), (180^\circ, 0^\circ)$  и  $(270^\circ, 0^\circ)$  5-го фундаментального каталога (FK5) звёзд. Сферические экваториальные координаты связаны в данном случае с трёхмерными декартовыми  $(x, y, z)$  стандартным соотношением:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

Реализацией системы ICRS является Международная Небесная Система Координат (англ. International Celestial Reference Frame, ICRF), основанная на высокоточных измерениях положений внегалактических радиоисточников. Впервые она была принята в качестве основополагающей системы координат на 23-й Генеральной Ассамблее МАС в 1997 году.

## 2. Постановка задачи

По аналогии с гелиографической инерциальной системой в литературе вводится и неинерциальная. Она отличается от предыдущего варианта только тем, что ноль гелиографической долготы связан с направлением, вращающимся вместе с Солнцем с фиксированным периодом 25,38 дней (по соглашению). Это направление совпадало с направлением на восходящий узел солнечного экватора в плоскости эклиптики в момент 1 января 1854 года в 12 UT (JD 2398220.0). Долгота, выбранная таким образом, ещё известна как долгота Керрингтона.

## 3. Методы и материалы исследования

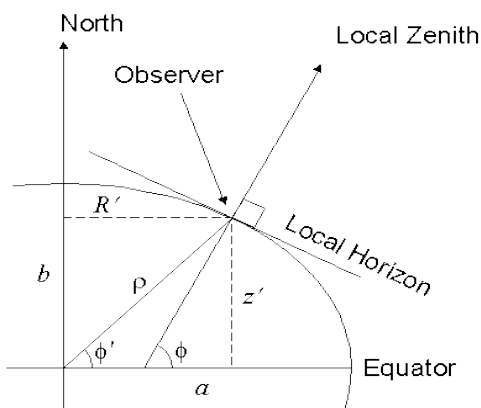
Система географических координат – неинерциальная. Это трёхмерная декартова система, вращающаяся вместе с Землёй. Её ось X находится в плоскости

экватора Земли и всегда проходит через гринвичский меридиан (долгота  $0^\circ$ ). Его ось  $Z$  параллельна оси вращения Земли, а ось  $Y$  дополняет их до правой тройки векторов так, что соответствующие орты связаны соотношением  $Y = Z \times X$ . При этом декартовы географические координаты всегда могут быть стандартным способом пересчитаны в сферические. Так возникает понятие географической широты (отсчитываемой от экватора) и долготы (отсчитываемой от нулевого меридиана).

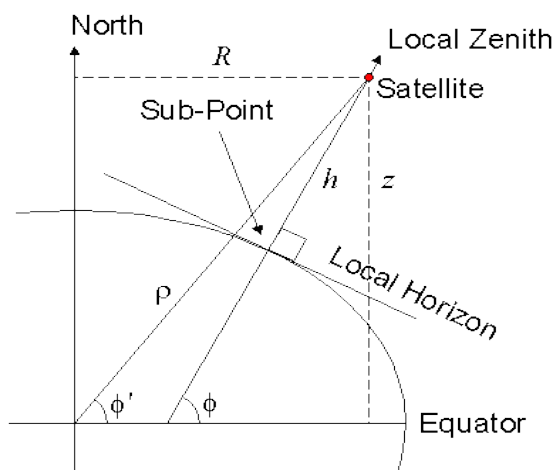
Геодезическая же система координат уже сферическая и определяет положение тела указанием широты  $\varphi'$ , долготы  $\lambda$  и высоты  $h$  над поверхностью Земли, которая при этом считается двухосным эллипсоидом, полученным вращением меридионального сечения Земли вокруг малой оси. Такой эллипсоид ещё называется опорным эллипсоидом. Несложно видеть, что при этом геодезическая долгота совпадает с географической долготой.

В системе геодезических координат присутствует понятие местного горизонта, который определяется как плоскость, касательная к поверхности Земли (эллипсоида вращения) в заданном месте. Соответственно, местный зенит – это направление от точки на поверхности Земли, перпендикулярное местному горизонту. На сфере это направление всегда соединяет точку на её поверхности тела и её центр, но на эллипсоиде это, в общем случае, уже не так (исключение составляют только точки, расположенные на экваторе Земли и её полюсах).

Геодезической широтой называется угол  $\varphi$  между направлением на местный зенит и экваториальной плоскостью. Как видно из рисунков 1 и 2 этот угол отличается от географической (геоцентрической) широты  $\varphi'$ .



**Рисунок 1.** Сечение опорного эллипсоида, географические и геодезические координаты.



**Рисунок 2.** Сечение опорного эллипсоида и обозначением геодезической высоты и определения подспутниковой точки.

Соответственно точка на поверхности Земли расположенная непосредственно под выбранной точкой над поверхностью (например, точка стояния космического аппарата (КА)) уже не находится на линии, соединяющей КА, данную точку и центр Земли (рисунок 2). Таким образом, геодезической высотой  $h$  называют расстояние от выбранной точки до поверхности опорного эллипсоида, измеренное вдоль направления к местному зениту.

Опорный эллипсоид, используемый в геодезических координатах, определяется, как правило, двумя параметрами: большой полуосью –  $a$  и полярным сжатием –  $\varepsilon$ , которое связано с  $a$  и малой полуосью –  $b$  соотношением

$$\varepsilon = \frac{a-b}{a} \quad (2)$$

Значения параметров опорного эллипсоида получаются из геодезических и космических измерений и исторически, в разных задачах (и исследователями разных стран) применяются разные эллипсоиды. В таблице 1 перечислены некоторые из них.

**Таблица 1.** Параметры некоторых используемых опорных эллипсоидов.

Модель опорного эллипсоида	Большая полуось, метры	«Обратное сжатие», $1/\varepsilon$	Где/кем применяется (или применялась)
WGS 84	6378137	298,257	Министерство Обороны США (GPS)
GRS 80	6378137	298,257	Международная ассоциация

WGS 72	6378135	298,26	геодезии и геофизики МО США
GRS 67	6378160	298,25	Австралия, Южная Америка
IAU (1964)	6378160	298,25	Международный астрономический союз
Krassovsky (1940)	6378245	298,3	Россия
International (1924)	6378388	297	Европа
Clarke (1880)	6378249	293	Франция, Африка
Clarke (1866)	6378206	294,98	Северная Америка
Bessel (1841)	6377397	299,15	Германия
Airy (1830)	6376542	299	Великобритания
Everest (1830)	6377276	300	Индия

Преобразования между геодезическими координатами относительно эллипсоида и трёхмерными декартовыми координатами, связанными с центром Земли выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

где  $h$  – геодезическая высота,  $\varphi$  – геодезическая широта,  $\lambda$  – геодезическая долгота,  $e$  – эксцентриситет опорного эллипсоида:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \quad (4)$$

$N$  – радиус кривизны главного вертикала, рассчитываемый как

$$N = a[1 - \varepsilon(2 - \varepsilon) \sin^2 \varphi]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Обратное преобразование, соответственно, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} h &= \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi} - N \\ \tan \varphi &= \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left[ 1 - e^2 \frac{N}{N+h} \right]^{-1} \\ \tan \lambda &= \frac{Y}{X} \end{aligned} \quad (6)$$

#### 4. Полученные результаты

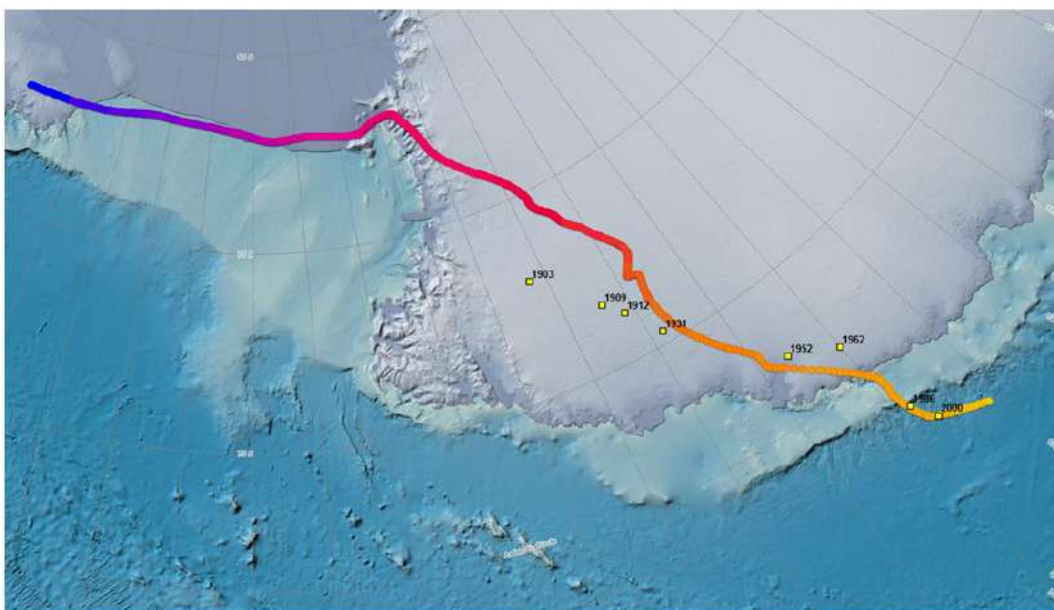
Система геомагнитных координат определяется дипольной составляющей магнитного поля Земли. Принимается, что ось  $Z$  этой системы параллельна оси магнитного диполя. Ось  $Y$  этой системы перпендикулярна плоскости, в которой лежат линии, соединяющие географические полюса и магнитный момент. Так если  $D$  – магнитный момент Земли, а  $S$  – направление на южный географический полюс, то  $Y = D \times S$ . Наконец, ось  $X$  дополняет оси  $Y$  и  $Z$  до правой тройки координат.

Стоит заметить, что положение магнитных полюсов Земли (их географические координаты) могут быть определены разными способами. Обычно их определяют, как точки на поверхности планеты, такие, в которых (гео-)магнитное поле перпендикулярно принятому опорному эллипсоиду. Эти две (северная и южная) точки называются геомагнитными полюсами (англ. dip poles). В принципе, геомагнитные полюса могут быть определены непосредственно из геофизических измерений. И современный мониторинг показывает, что магнитное поле оказывается перпендикулярным к поверхности эллипсоида в двух сравнительно компактных областях, положение которых ежедневно отслеживается [NCEI 2021]. Впрочем, положение полюсов может быть и предвычисленное в рамках некоторой модели.

Реальное магнитное поле Земли немного отличается от поля магнитного диполя, поэтому магнитные полюса Земли не только не совпадают с географическими полюсами, но и не являются антиподными точками (в 2020 году магнитные полюса были расположены по координатам: северный  $86,502^\circ$  с.ш. и  $164,036^\circ$  в.д.; южный  $64,073^\circ$  ю.ш. и  $135,877^\circ$  в.д.). Кроме того, полюса медленно изменяют свое местоположение, «дрейфуя» со скоростью 7–8 км/год. С момента своего официального открытия в 1831 году северный магнитный полюс медленно смещается из канадской Арктики в сторону России, преодолев за это время около 2250 км. Раньше скорость его перемещения позволяла ученым довольно легко следить за ним, но, по данным Национальных центров экологической информации США (National Centers for Environmental Information NCEI), на рубеже веков ситуация изменилась. За последние 20 лет скорость смещения северного магнитного полюса возросла до 50 километров в год. На рисунках 3 и 4 показаны траектории дрейфа северного и южного магнитных полюсов.



**Рисунок 3.** История дрейфа северного геомагнитного полюса в интервале 1831-2007 гг. (показана желтыми квадратами). Модельные положения полюса в интервале 1590-2020 гг. показаны цветными кружками



**Рисунок 4.** История дрейфа южного геомагнитного полюса в интервале 1903–2000 гг. (показана желтыми квадратами). Модельные положения полюса в интервале 1590–2020 гг. показаны цветными кружками

## 5. Выводы

Модели магнитного поля Земли также могут определять положение геомагнитных полюсов – модельные полюса. Последние могут быть вычислены из первых трех коэффициентов Гаусса в принятой модели, такой как Всемирная магнитная модель (англ. World Magnetic Model, WMM) или международной модели опорного геомагнитного поля (англ. International Geomagnetic Reference Field, IGRF). В основе представления поля в WMM лежит магнитный диполь в центре Земли. Этот диполь определяет ось, которая пересекает поверхность Земли в двух противоположных точках, – модельных полюсах. Здесь и далее модельным полюсом называется то, что в англоязычной литературе обозначается как *geomagnetic pole* в противопоставлении *dip pole* – полученной экспериментально точке. Так, на основе коэффициентов WMM2020 для эпохи 2020,0 северный модельный полюс находится в точке с координатами  $72,68^\circ$  западной долготы и  $80,65^\circ$  северной широты, а южный – в точке с координатами  $107,32^\circ$  восточной долготы и  $80,65^\circ$  южной широты. Ось диполя в настоящее время наклонена на  $9,41^\circ$  к оси вращения Земли. Тот же диполь является основой простой системы координат геомагнитных широты и долготы.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

## Список литературы

1. Пенев, П.Д. Определение геодезических широты и высоты по пространственным геоцентрическим координатам / П.Д. Пенев, Е.П. Пенева // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82. – № 11. – С. 2-7.
2. Куншин, А.Ю. Системы координат в геодезии и их практическое применение / А.Ю. Куншин, А.С. Мухачёв // В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА. Сборник статей. – 2022. – С. 427-431.
3. Tyurkin, V.N. Algorithms for adaptive processing of signals in a flat phased antenna array / V.N. Tyurkin, I.N. Kartsan, D.D. Dmitriev, S.V. Efremova // В сборнике: 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 - Proceedings. – 2017. – С. 7998452.



4. Жуков, А.О. Перспективы повышения измерительной информации для определения параметров орбиты космических аппаратов / А.О. Жуков, И.Н. Карцан // В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. – 2019. – С. 300-302.
5. Kartsan, I.N. Simulation modeling of functional adaptive interference nulling for multibeam hybrid reflector antenna systems / I.N. Kartsan, A.E. Goncharov, P.V. Zelenkov, I.V. Kovalev, V.N. Tyapkin, D.D. Dmitriev. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – С. 012017.
6. Гололобов, А. Ю. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов / А.Ю. Гололобов, И.А. Голиков, В.И. Попов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11. – № 2. – С. 46-54.
7. Трофимов, Д.А. Полное электронное содержание ионосферы вблизи южного геомагнитного полюса по данным ГНСС-измерений / Д.А. Трофимов, С.Д. Петров, К.В. Желтова, И.В. Чекунов, Ю.А. Серов, О.А. Трошичев // В сборнике: Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование. – 2019. – С. 66-72.