

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АЭРОНАВИГАЦИИ

О.Н. СКРЫПНИК¹

¹*Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации, г. Иркутск, Россия*

В статье рассмотрены основные типы систем координат, используемых для решения задач воздушной навигации, связанных с аэронавигационным обеспечением процессов самолетовождения и посадки. Приводятся основные требования, предъявляемые к выбору системы координат. Указаны противоречия, возникающие при выборе системы координат.

Рассмотрены локальные системы координат: прямоугольная, цилиндрическая и сферическая. Указаны достоинства и недостатки данных систем координат, процессы навигации, при которых их применение целесообразно. Приведены прямые и обратные координатные преобразования между локальными системами координат.

Показаны основные особенности применения глобальных систем координат, связанные с выбором модели фигуры Земли и проблемами ее математического описания. Даны основные сведения об общеземных эллипсоидах и их параметрах. Раскрыты понятия геоида, волны геоида, референц-эллипсоида. Показана необходимость перехода к общеземному эллипсоиду и глобальным системам отсчета и этапы такого перехода. Приведены общие сведения о Международной системе отсчета ITRS и Международной земной отсчетной основе ITRF. Выделены отличия в определении пространственных координат объектов в этих системах отсчета. Указаны отличия в областях применения систем ПЗ-90 и СК-2011 и их аналогов WGS-84 и NAD-83.

Рассмотрены особенности глобальных геодезической и геосферической (ортодромической) систем координат, их достоинства и недостатки. Приведены прямые и обратные координатные преобразования для глобальных систем координат, а также выражения, устанавливающие связь между геоцентрическими и топоцентрическими системами координат.

Ключевые слова: система координат, геоид, общеземной эллипсоид, координатные преобразования, локальная система координат, геодезическая система координат, аэронавигация.

ВВЕДЕНИЕ

Используемые в задачах аэронавигационного обеспечения системы координат предназначены для определения местоположения и параметров движения воздушных судов (ВС), а также математического описания процессов навигации. При этом система координат должна удовлетворить ряду требований [1]:

- решение навигационных задач с требуемой точностью;
- охват необходимой по площади территории земной поверхности или объема воздушного пространства, в пределах которых решаются навигационные задачи;
- наглядность и простота отображения и восприятия информации о местоположении объекта в системе координат;
- простота математических соотношений, описывающих процесс перемещения ВС.

Перечисленные требования противоречивы. Так, выбор системы координат, единой для всей земной поверхности, неизбежно приводит к сложным математическим соотношениям, а системы координат, позволяющие решать навигационные задачи по сравнительно простым математическим зависимостям, обеспечивают приемлемую точность лишь в ограниченной области пространства. Поэтому на практике используются различные системы координат, в каждой из которых обеспечивается наиболее эффективное решение частных навигационных задач.

Для решения задач навигации ВС относительно земной поверхности в настоящее время используются связанные с земной поверхностью локальные и глобальные системы координат.

Настоящая статья посвящена рассмотрению особенностей локальных и глобальных систем координат, применяемых в воздушной навигации, взаимосвязи между системами координат, а также эволюции представлений глобальных систем координат.

ЛОКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Локальные системы координат охватывают ограниченную часть земной поверхности и используются при перемещениях ВС на расстояния до 400–450 км, когда кривизной земной поверхности можно пренебречь без ущерба для точности решения навигационной задачи. В таких системах координат работают, например, системы посадки ILS, системы ближней навигации VOR/DME, TACAN, российская система РСБН.

К локальным относятся цилиндрическая, сферическая и прямоугольная системы координат (рис. 1) [2], начало которых находится в точке на поверхности Земли. Поэтому данные системы также являются топоцентрическими.

Координатами т. M в указанных системах координат являются: в прямоугольной системе (рис. 1, a) – координаты x , y , z ; в цилиндрической (рис. 1, b) – проекция r на горизонтальную плоскость радиус-вектора ρ , проведенного из начала системы координат в т. M , азимут Θ , высота z ; в сферической (рис. 1, c) – расстояние ρ (радиус-вектор) до т. M из начала системы координат, азимут Θ , угол места β .

Азимут отсчитывается в горизонтальной плоскости от направления оси Ox , которая, как правило, ориентирована в направлении истинного севера, до проекции r радиус-вектора ρ на горизонтальную плоскость. Ось Oz ориентирована по нормали к земной поверхности в точке O .

Локальные системы координат находят широкое применение при полетах на небольшие (до 500 км) расстояния, управлении ВС на этапах взлета и посадки, определении местоположения ВС относительно ориентиров.

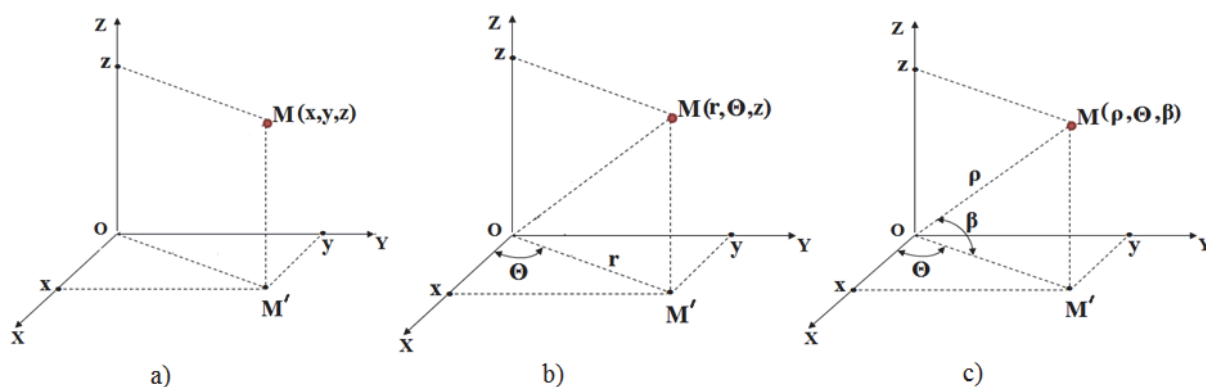


Рис. 1. Локальные системы координат
Fig. 1. The local coordinate system

При решении задач навигации часто возникает необходимость пересчета координат ВС или других объектов (например, радиомаяков) из одной системы координат в другую. Это связано с тем, что различные технические средства навигации могут работать и выдавать информацию в разных системах отсчета, а бортовая система отображения информации или алгоритмы комплексной обработки навигационной информации, реализуемые в бортовой системе самолето-вождения современных ВС, предполагают использование общей системы координат [3].

Преобразования из цилиндрической в прямоугольную систему координат имеют вид [2]

$$x = r \cos \Theta; \quad y = r \sin \Theta; \quad z = z.$$

Обратные преобразования удовлетворяют следующим выражениям:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \Theta = \arctg \frac{y}{x}; \quad z = z.$$

Преобразования координат из сферической в прямоугольную систему координат имеют вид [2]

$$x = \rho \cos\beta \cos\Theta; \quad y = \rho \cos\beta \sin\Theta; \quad z = \rho \sin\beta.$$

Обратные преобразования удовлетворяют следующим выражениям:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad \Theta = \arctg \frac{y}{x}; \quad \beta = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Достоинствами локальных систем координат являются достаточно простые математические соотношения, описывающие процессы перемещения ВС, наглядность отображения и восприятия информации о местоположении ВС относительно начала системы координат, простые и точные координатные преобразования из одной системы в другую. Основной недостаток систем – охват незначительной части земной поверхности. Поэтому данные системы координат используются для решения задач ближней навигации, при заходе на посадку и посадке.

ГЛОБАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И ИХ ЭВОЛЮЦИЯ

Глобальные системы координат охватывают всю поверхность земли. Фигура Земли, а значит, и земная поверхность, имеет сложную форму. К сожалению, не существует системы координат, абсолютно точно учитывающей фигуру Земли при описании процессов навигации относительно земной поверхности в любом ее районе. Поэтому используют различные аппроксимации фигуры Земли для удовлетворения требований по точности при решении геодезических, картографических или навигационных задач [4].

Использование современных технологий измерения параметров Земли, развитие спутниковой навигации, а также требования к интероперабельности воздушного пространства, вызвали значительные изменения в подходах к описанию фигуры Земли и точности такого описания. В результате в настоящее время применяются системы координат как для решения задач геодезии и картографии, так и для решения задач воздушной и космической навигации.

Системы первого типа, использующиеся уже давно, ориентированы на раздельное определение положения объектов на поверхности земли (горизонтальное двумерное пространство) и по вертикали (ортометрическая высота, отсчитываемая от среднего уровня Мирового океана, а системы второго типа – на определение положения объектов в трехмерном пространстве [5]. В обоих случаях нужна наиболее точная аппроксимация фигуры Земли и ее поверхности.

Наиболее близким по форме к земной поверхности (рис. 2, а) является *геоид* (рис. 2, б) – поверхность, всюду нормальная силе тяжести (поверхность, на которой атмосферное давление постоянно и равно 760 мм рт. ст.) и совпадающая с уровнем Мирового океана в его спокойном состоянии. Вследствие таких эффектов, как изменение атмосферного давления, температуры, господствующих ветров и течений, вариаций плотности (солености) водных масс, средний уровень Мирового океана может отличаться от поверхности геоида на метр и более.

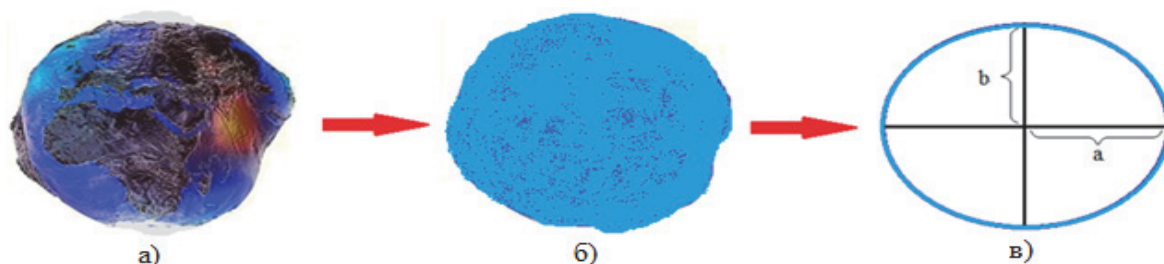


Рис. 2. Аппроксимации фигуры Земли
Fig. 2. Approximation of the Earth's shape

Поверхность геоида хотя и является гладкой по сравнению с физической поверхностью земли, но все же имеет неправильную форму. Это вызвано неравномерным расположением гравитационных масс в теле Земли, вследствие чего происходит отклонение отвесных линий.

Для создания глобального геоида была разработана модель гравитации Земли (*Earth Gravitational Model*) 1996 года – *EGM96* и принят геоид *WGS-84 (EGM96)*, обеспечивающий точность не хуже 1 м в пунктах, где измерялась гравитация. Действующей, более точной и полной, является модель 2008 года *EGM2008* [6].

Геоид не удастся описать математически, поэтому для решения практических задач на поверхности земли она представляется математически описанной геометрической фигурой – эллипсоидом (рис. 2, в). Подбирая параметры эллипсоида, можно в большей или меньшей степени приблизить его к геоиду в разных его частях. Однако невозможно подобрать эллипсоид, точно совпадающий с геоидом в пределах всей земной поверхности. Разность между поверхностями геоида и эллипсоида (называемая волной геоида) (рис. 3, а) может достигать порядка 100 м и более [7]. Информация о волне геоида необходима для определения превышений аэродромов, зон приземления и отрыва на взлетно-посадочной полосе или зон конечного этапа захода на посадку и взлета на вертодромах.

До 1964 года каждая страна подбирала параметры эллипсоида, приближенного к геоиду на территории этой страны. Такой эллипсоид получил название *референц-эллипсоида* (рис. 3, б).

Референц-эллипсоиды принимались для обработки геодезических измерений законодательно. Исторически сложилось так, что в разные времена и в разных странах были приняты и законодательно закреплены различные эллипсоиды, и их параметры не совпадали между собой.

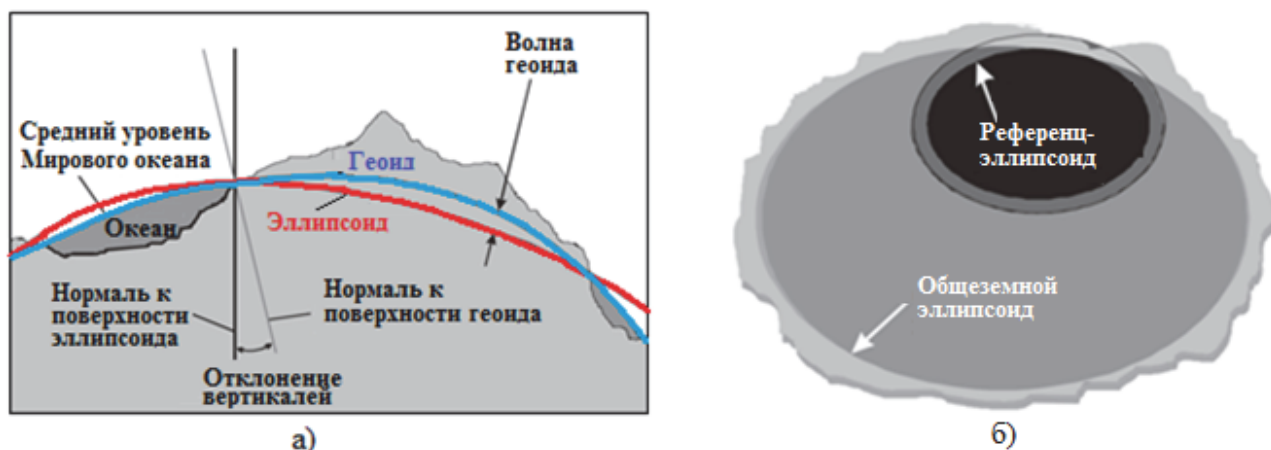


Рис. 3. Геоид и референц-эллипсоид
Fig. 3. Geoid and Local Ellipsoid

В России/СССР использовался *эллипсоид Красовского* с параметрами: большая полуось $a = 6378245$ м, малая полуось $b = 6356863$ м, сжатие 1:298,3. В США и Канаде использовали

эллипсоид Кларка (*Clarke 1880*) с параметрами: большая полуось $a = 6378249$ м, сжатие $1:295,0$. Во многих странах Западной Европы и некоторых государствах Азии был принят эллипсоид Хейфорда, а в Индии и странах Южной Азии использовали эллипсоид Эвереста [6].

Увеличение дальности полетов ВС, появление спутниковых систем навигации и развитие систем управления полетом (типа *Flight Management System, FMS*) выявило ряд острых проблем при использовании референц-эллипсоидов, например, скачки в измеряемых координатах при переходах ВС между воздушными пространствами соседних государств. Поэтому были проведены работы по установлению общеземного эллипсоида, подходящего для использования всеми государствами. В результате был принят общеземной эллипсоид *Geodetic Reference System 1980 (GRS-80)*.

Геодетическое положение объекта относительно земной поверхности определяется в связанной с Землей системе отсчета (*Terrestrial Reference System, TRS*). Эта система характеризуется определенными физическими константами (гравитационная постоянная, большая полуось эллипса, скорость вращения Земли, скорость света и др.), моделями (например, вращения Земли) и системой координат, в которой однозначно определяются координаты точек [8].

Такой системой координат может быть, например, прямоугольная система координат *OXYZ*, начало которой т. *O* находится в центре масс Земли, координатные оси *OX* и *OY* лежат в плоскости экватора, ось *OZ* совпадает с осью вращения Земли (рис. 4).

Эта система координат вращается со скоростью вращения Земли и *3D*-координаты точки в ней – это положение точки относительно центра масс Земли.

3D-координаты точки можно также определять на поверхности эллипсоида в виде угловых параметров – широты и долготы, и высоты над поверхностью эллипсоида.

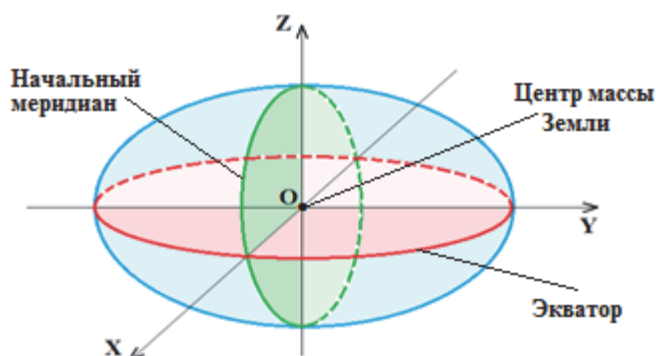


Рис. 4. Связанная с общеземным эллипсоидом *3D*-система координат (*OXYZ*)

Fig. 4. Associated with the global ellipsoid *3D*-Cartesian (*OXYZ*) system

В 1991 году в качестве единой принята Международная земная система отсчета *ITRS* (*International Terrestrial Reference System*). В США в качестве земной системы отсчета используется *WGS-84* (*World Geodetic System*). *WGS-84* рекомендована ИКАО для использования в качестве международной системы отсчета.

Связь Международной земной системы отсчета *ITRS* с земной поверхностью реализована через Международную земную отсчетную основу *ITRF* (*International Terrestrial Reference Frame*).

ITRF представляет собой набор физических точек (более 4000 по всей земной поверхности) с точно определенными с помо-

щью спутниковых технологий (система GPS) *3D*-координатами. Поэтому основой для *ITRF* также является общеземной эллипсоид *WGS-84*. Текущая версия – *ITRF2008* [8].

В России в качестве земной системы отсчета используется система «Параметры земли 1990 года» (*ПЗ-90*) с параметрами полуосей $a = 6\,378\,136$ м, $b = 6\,356\,777$ м, сжатие $1:298,25784$ [9]. Ее текущая версия – *ПЗ-90.11*, установленная в 2012 году. За отсчетную поверхность в этой системе отсчета принята поверхность эллипсоида *ПЗ-90.11*. До 1.01.2017 г. вместе с *ПЗ-90.11* в СССР/России использовался эллипсоид Красовского.

В России в качестве геодезической системы отсчета с 2012 году введена система координат *СК-2011*. Ее предыдущими версиями были *СК-42* и *СК-95*, в которых в качестве отсчетной поверхности использовался эллипсоид Красовского.

В США в качестве геодезической системы отсчета используется *NAD-83* (*North American Datum 1983*) [10]. В качестве отсчетной выбрана поверхность эллипсоида *GRS-80* (практически идентичного *WGS-84*) с параметрами $a = 6\,378\,137$ м, $b = 6\,356\,777$ м, сжатие $1:298,257$.

Системы координат *NAD-83* и *СК-2011* предназначены для выполнения геодезических и картографических работ. Эти системы удобны для навигации ВС относительно наземных станций и ориентиров, координаты которых привязаны к земной поверхности.

Общеземные геоцентрические системы координат *ПЗ-90.11* и *WGS-84* предназначены для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач, прежде всего по данным спутниковых систем навигации ГЛОНАСС и GPS.

В современных бортовых *FMS* обработка информации и ее выдача на многофункциональные индикаторные приборы (типа *ND* или *PFD*) осуществляется в глобальной геодезической системе координат *ПЗ-90.11* (Россия) или *WGS-84* (рис. 5, а). В ней координатами ВС являются геодезическая широта B и геодезическая долгота L , а также высота над поверхностью эллипсоида (абсолютная высота по принятой в России терминологии, или *QNH* – по международной терминологии). При этом геодезическая широта представляет собой угол между нормалью, проведенной через точку M к земной поверхности, и плоскостью экватора.

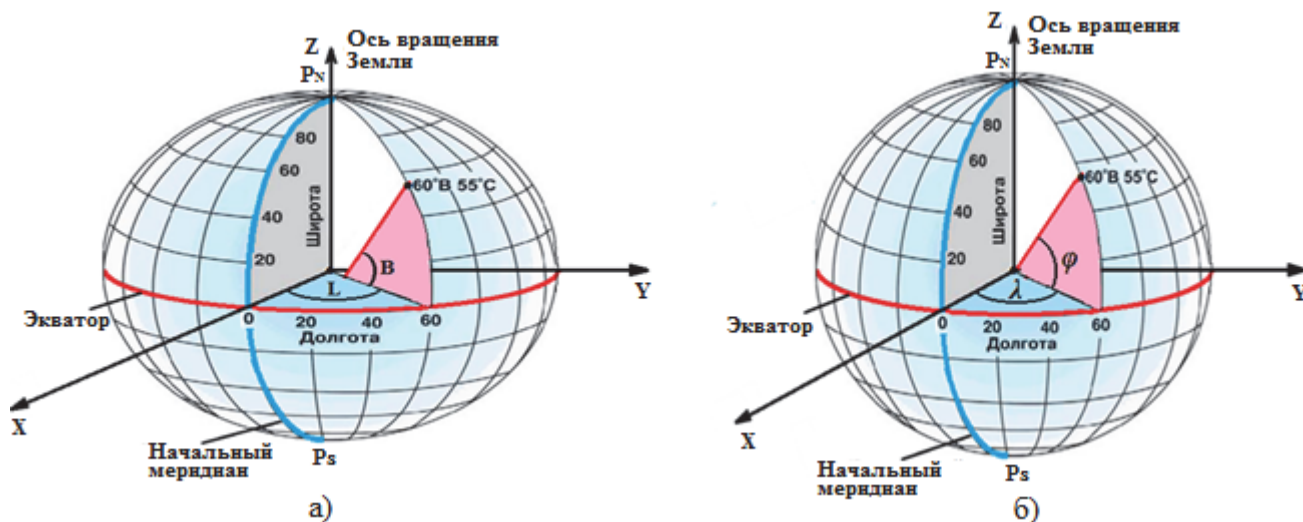


Рис. 5. Глобальные геоцентрические системы координат
Fig. 5. The global geocentric coordinate system

Использование данной системы координат позволяет решать задачи аэронавигации с высокой точностью независимо от расстояний, на которые перемещается ВС. Однако процессы навигации в этой системе координат описываются достаточно сложными выражениями, которые реализованы в компьютерах систем самолетовождения только современных ВС.

До недавнего времени основной для решения задач воздушной навигации была ортодромическая система координат, в которой фигура Земли аппроксимируется сферой. По принятой аппроксимации фигуры Земли ортодромическая система координат аналогична геосферической (рис. 5, б), но отличается произвольно устанавливаемыми условными полюсами и условным экватором (главной ортодромией).

Местоположение ВС в геосферической системе координат определяется геосферическими широтой φ и долготой λ . При этом геосферическая широта φ т. M отличается от геодезической широты B тем, что она представляет собой угол между радиус-вектором, проведенным из центра сферы в т. M , и плоскостью экватора. Понятия и способ отсчета геосферической λ и геодезической долготы L совпадают.

При решении навигационных задач в геоцентрической системе координат возникают методические погрешности определения местоположения ВС, вызванные аппроксимацией фигуры Земли сферой. Максимальная разность между геодезической и геоцентрической широтой наиболее значительна в средних широтах и составляет $(B - \varphi)_{max} = 11,6$ угл. мин, убывая по мере приближения к полюсам или экватору. При этом геоцентрическая широта всегда меньше геодезической (кроме полюсов и экватора), а геодезическая и геоцентрическая долгота точки совпадают.

КООРДИНАТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ГЛОБАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

Связь между координатами ВС в прямоугольной системе координат $OXYZ$, начало которой находится в центре масс Земли, и геодезическими (пространственными эллипсоидальными) координатами определяется выражениями

$$x = (N+H)\cos B\cos L, \quad y = (N+H)\cos B\sin L, \quad z = (N+H-e^2N)\sin B,$$

где H – высота над поверхностью эллипсоида; $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ – эксцентриситет земного эллипсоида; $N = a \cdot (1 - e^2 \sin^2 B)^{-1/2}$ – радиус кривизны первого вертикала.

Преобразование координат из системы координат $OXYZ$ в геодезические (пространственные эллипсоидальные) осуществляется с помощью выражений

$$B = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N+H} \right)^{-1}, \quad L = \text{Arctg} \frac{y}{x}, [-\pi, \pi], \quad H = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos B} - N,$$

где $\text{Arctg}(\ast)$ – круговое значение арктангенса с учетом квадрантов.

Следует отметить, что данное преобразование выполняется итерационным методом, но сходимость достигается достаточно быстро.

Для пересчета координат объектов в локальную топоцентрическую систему координат ($Ox_Ly_Lz_L$), геодезически привязанную к заданной точке Земли (B_0, L_0, H_0) (рис. 6), из геодезических координат (B, L, h) сначала производится пересчет в геоцентрические прямоугольные координаты (x, y, z), связанные с центром Земли, а затем выполняется преобразование

$$\begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} = \bar{M} \cdot \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix}$$

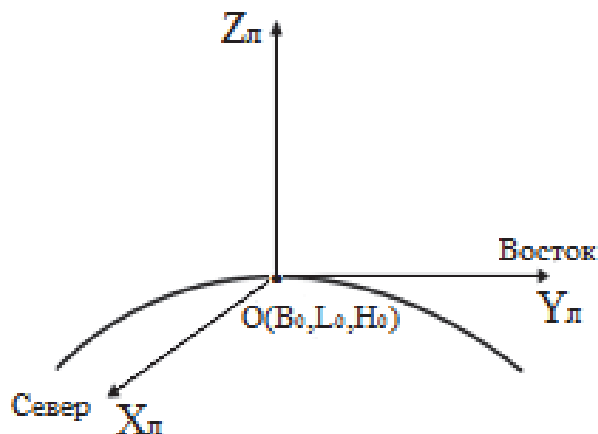


Рис. 6. Топоцентрическая локальная
прямоугольная система координат
Fig. 6. The local topocentric Cartesian system

где x_0, y_0, z_0 – геоцентрические прямоугольные координаты начала локальной системы координат,

$$\bar{M} = \begin{vmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\cos L_0 \sin B_0 & -\sin L_0 \sin B_0 & \cos B_0 \\ \cos L_0 \cos B_0 & \sin L_0 \cos B_0 & \sin B_0 \end{vmatrix} - \text{матрица преобразования.}$$

Обратный пересчет координат из локальной $OX_\lambda Y_\lambda Z_\lambda$ в геоцентрическую систему координат $OXYZ$ осуществляется в соответствии с выражением

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \bar{M}^T \begin{vmatrix} x_\lambda \\ y_\lambda \\ z_\lambda \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{vmatrix}, \text{ где } \bar{M}^T - \text{транспонированная матрица.}$$

Для точки, находящейся на поверхности земной сферы, координатные преобразования из геоцентрической системы координат в прямоугольную $OXYZ$ имеют вид

$$x = R \cos \varphi \cos \lambda; \quad y = R \cos \varphi \sin \lambda; \quad z = R \sin \varphi$$

и обратное преобразование

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad \lambda = \arctg \frac{y}{x}.$$

Пересчет геодезической широты в геоцентрическую может быть выполнен и по приближенной формуле $\varphi = B - 8'39'' \sin 2B$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор системы координат, единой для всей земной поверхности, неизбежно приводит к сложным математическим соотношениям, а системы координат, позволяющие решать навигационные задачи по сравнительно простым математическим зависимостям, обеспечивают приемлемую точность лишь в ограниченной области пространства. Поэтому на практике используются различные системы координат, в каждой из которых обеспечивается наиболее эффективное решение частных навигационных задач.

Для решения задач навигации ВС относительно земной поверхности в настоящее время используются связанные с земной поверхностью локальные и глобальные системы координат. Между рассмотренными системами координат имеется однозначная связь, что позволяет приводить информацию от различных средств навигации в общую систему для реализации алгоритмов комплексной обработки.

Проведенный анализ локальных и глобальных систем координат, используемых в воздушной навигации, позволил установить их основные особенности и области применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрышник О.Н.** Радионавигационные системы воздушных судов: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 248 с.
2. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.

3. **Скрыпник О.Н.** Межсамолетная навигация при управлении воздушным движением. дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский государственный технический университет гражданской авиации. М., 2010.
4. Радионавигационный план Российской Федерации. Утвержден приказом Минпромторга России от 28 июня 2015 г. № 2123. 142 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/4560343228> (дата обращения 03.02.2017).
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 28.12.2012 № 1463. О единых государственных системах координат [Электронный ресурс]. URL: <http://gis-lab.info/docs/law/statecoord-2012.doc> (дата обращения 3.02.2017).
6. Doc 9674 AN/946. World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual. International Civil Aviation Organization, Second Edition, 2002, p. 134.
7. Moritz. H. Geodetic Reference System 1980 [Электронный ресурс]. URL: <http://geodeticscience.org/course/refpapers/00740128.pdf> (дата обращения 3.02.2017).
8. ITRF 2008. URL: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ (дата обращения 26.02.2017).
9. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, М., 2014. 52 с.
10. 2014 Federal Radionavigation Plan. [Электронный ресурс]. National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161 DOT-VNTSC-OST-R-15-0 URL: <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/FederalRadionavigationPlan2014.pdf> (дата обращения 3.02.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Скрыпник Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Иркутского филиала МГТУ ГА о учебно-научной работе, skripnikon@yandex.ru.

COORDINATE SYSTEMS AND TRANSFORMATIONS FOR AIR NAVIGATION TASKS

Oleg N. Skrypnik¹

¹*Irkutsk Branch of Moscow State Technical University
of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The main types of coordinate systems, used for air navigation tasks solving that are connected with aeronautical flight control and landing provisioning are examined in the article. The basic requirements for the coordinate system choice as well as the conflicts that appear while choosing are stated.

Local coordinate systems have been studied: orthogonal, cylindrical and spherical. Advantages and disadvantages of these coordinate systems, the navigation processes at which their application is rational are mentioned. Direct and backward coordinate transformations between local coordinate systems have been shown.

Essential distinctive features of global coordinate systems' appliance connected with the Earth's model figure choosing and its mathematical description problems are shown. Basic information about the global ellipsoids and its parameters is presented. The concepts of geoid, geoid wave and reference-ellipsoid have been studied. The necessity of transitioning to the global ellipsoid and global reference systems as well as the stages of such transitioning are shown. Information about the ITRS and ITRF is given. Differences in determining the objects space coordinates in these reference systems are described. Differences in ПЗ-90 and СК-2011 application areas and their prototypes WGS-84 and NAD-83 ones are specified.

The peculiarities of global geodesic and geospheric (orthodromic) coordinate systems are examined as well as their advantages and disadvantages. Direct and backward coordinate transitions for global coordinate systems and the expressions which set the connection between geocentric and topocentric coordinate systems are illustrated.

Key words: coordinate system, geoid, global terrestrial ellipsoid, coordinate transformations, local coordinate system, geodetic coordinate system, aeronavigation.

REFERENCES

1. **Skrypnik O.N.** *Radionavigatsionnye sistemyi vozdukhnykh sudov* [Radionavigation systems of aircrafts]. Moscow, INFRA-M, 2014, 248 p. (in Russian)
2. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics] (*dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*). Moscow, Nauka, 1974, 832 p. (in Russian)
3. **Skrypnik O.N.** *Mezhsamoletnaya navigatsiya pri upravlenii vozdukhnyim dvizheniem* [Interaircraft navigation for air traffic control]. PhD work. *Moskovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet grazhdanskoy aviatsii*. Moscow, 2010. (in Russian)
4. *Radionavigatsionnyy plan Rossiyskoy Federatsii* [Radionavigational plan of Russian Federation]. Approved by the order of the Ministry of Industry and Trade of RF from 28.06. 2015. no. 2123, 142 p. URL: <http://docs.cntd.ru/document/4560343228> (accessed: 03.02. 2017). (in Russian)
5. *Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 28.12.2012 № 1463. O edinykh gosudarstvennykh sistemakh koordinat*. Available at: <http://gis-lab.info/docs/law/statecoord-2012.doc> (accessed: 3.02.2017). (in Russian)
6. Doc 9674 AN/946. World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual. International Civil Aviation Organization, Second Edition, 2002, 134 p.
7. Moritz H. Geodetic Reference System 1980. Available at: <http://geodeticsscience.org/course/refpapers/00740128.pdf> (accessed 3.02.2017).
8. ITRF 2008. Available at: http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/ (accessed 26.02.2017).
9. *Parametry Zemli 1990 goda (PZ-90.11)* [The Earth's parameters (PZ-90.11)]. *Spravochnyy dokumet. Voennno-topograficheskoe upravlenie Generalnogo shtaba Vooruzhennykh sil Rossiyskoy Federatsii*. Moscow, 2014, 52 p. (in Russian).
10. 2014 Federal Radionavigation Plan. National Technical Information Service, Springfield, Virginia 22161 DOT-VNTSC-OST-R-15-0. Available at: <https://www.navcen.uscg.gov/pdf/FederalRadionavigationPlan2014.pdf> (accessed 3.02.2017).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Oleg N. Skrypnik, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Deputy Director of Educational and Scientific Work of Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, skripnikon@yandex.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

20.01.2017
25.05.2017

Received
Accepted for publication

20.01.2017
25.05.2017