

## Глава 1

# Картографические проекции

## 1. Географические системы координат

### 1.1. Географические системы координат

Географическая (или геодезическая) система координат (ГСК) использует трехмерную сферическую поверхность для определения местоположения объектов на поверхности Земли. ГСК часто неверно называют датумом, в то время как датум является лишь частью географической системы координат. ГСК включает угловые единицы измерения координат, нулевой меридиан и датум (основанный на сфероиде).

Точка на сфероиде определяется значениями широты и долготы. Широта и долгота – это углы, вершина которых расположена в центре Земли, а одна из сторон проходит через точку на земной поверхности. Углы, как правило, измеряются в градусах (или в градах).

рис.1.1.

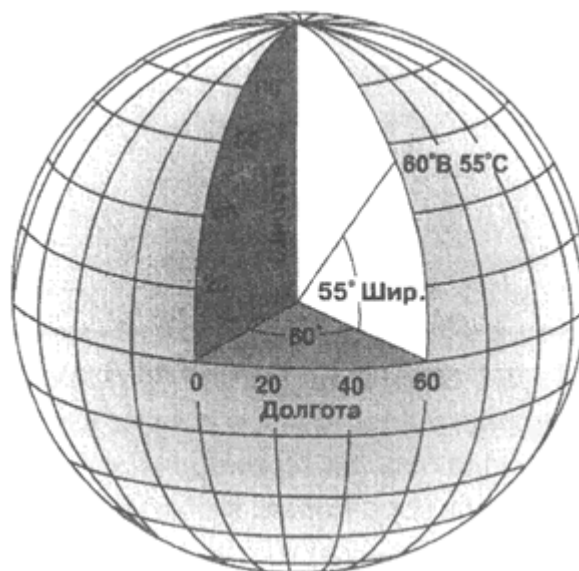


Рис.1.1. Земля в виде глобуса, на котором показаны значения широты и долготы.

В сферической системе «горизонтальные линии» или линии, соответствующие направлению восток-запад, – это линии равной широты, или параллели. «Вертикальные линии», или линии идущие в направлении с юга на север, – это линии равной долготы, или меридианы. Эти линии опоясывают глобус и образуют сеть географической координатной привязки, называемую картографической сеткой.

рис.1.2.



Рис.1.2. Параллели и меридианы, которые образуют картографическую сетку

Линия широты, которая расположена посередине между полюсами, носит название экватора. Она соответствует линии нулевой широты. Линия нулевой долготы носит название нулевого (или начального) меридиана. Для большинства географических систем координат нулевой меридиан – это линия долготы, проходящая через обсерваторию Гринвич в Англии. Некоторые страны используют в качестве нулевых меридианов линии долготы, проходящие через Берн, Боготу или Париж.

Начальная точка картографической сетки (0,0) определяется местом пересечения экватора и нулевого меридиана. Затем глобус делится на четыре географических квадранта (четверти шара), которые определяются показаниями компаса в начальной точке. Север и юг расположены соответственно выше и ниже экватора, а запад и восток – соответственно слева и справа от нулевого меридиана.

Значения широты и долготы, как правило, измеряются либо в десятичных градусах, либо в градусах, минутах, секундах (DMS). Значения широты отсчитываются относительно экватора и могут изменяться от  $-90^\circ$  на Южном полюсе до  $+90^\circ$  на Северном полюсе. Значения долготы отсчитываются относительно нулевого меридиана. Они могут меняться от  $-180^\circ$  при движении на запад от нулевого меридиана и до  $180^\circ$  при движении на восток от нулевого меридиана.

Если за нулевой меридиан принят Гринвич, то координаты в Австралии, расположенной к югу от экватора и к востоку от Гринвича, будут иметь положительные значения долготы и отрицательные значения широты.

Хотя значения широты и долготы используются для определения точного положения точки на поверхности шара, эти величины не являются универсальными единицами измерения. Только вдоль экватора расстояние, соответствующее одному градусу долготы примерно равно расстоянию, соответствующему одному градусу широты. Это происходит из-за того, что экватор – это единственная параллель, чья длина равна длине меридиана. (Окружности, у которых тот же радиус, что и у сфероида Земли, носят название больших окружностей. Экватор и все меридианы являются большими окружностями.)

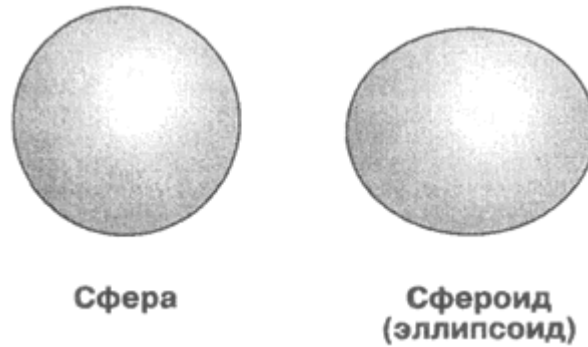
Выше и ниже экватора, окружности, которые определяют параллели, становятся постепенно все короче и короче, пока не превратятся в точку на Северном и Южном полюсах, в которой сходятся меридианы. По мере того, как меридианы сходятся к полюсам, расстояние, соответствующее одному градусу широты уменьшается до нуля. На сфероиде Кларка 1866 один градус широты на экваторе равен 111.321 км, в то время как на широте  $60^\circ$  – только 55.802 км. Поскольку градусы широты и долготы не имеют стандартной длины, вы не можете точно измерять расстояния или площади или легко отображать данные на плоской карте или экране компьютера.

## 1.2. Сфероиды и сферы

Форма и размер поверхности географической системы координат определяется сферой или сфероидом. Хотя форма Земли лучше отображается сфероидом, форма Земли иногда принимается за сферу, что облегчает выполнение математических вычислений.

Допущение, что Земля является сферой, возможно для мелкомасштабных карт (для карт, чей масштаб мельче 1 : 5 000 000). В этом масштабе разница между сферой и сфероидом не различима по карте. Тем не менее, для получения точности на крупномасштабных картах (картах масштаба 1 : 1 000 000 или крупнее), для описания формы Земли необходимо пользоваться сфероидом. Для карт, чей масштаб лежит в диапазоне между этими двумя масштабами, использование сферы или сфероида зависит от назначения карты и от требуемой точности данных.

рис.1.3.



Основой сферы является круг, в то время как сфероид (или эллипсоид) основан на эллипсе. Форма эллипса определяется двумя радиусами. Более длинный радиус называется большой полуосью, а меньший (короткий) – малой полуосью.

рис.1.4.

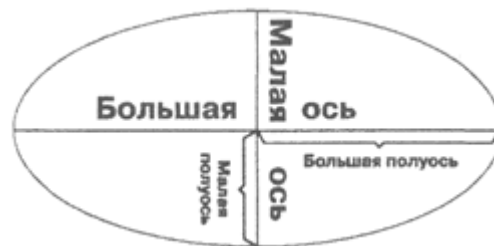


Рис.1.4. Большая и малая оси эллипса.

Вращение эллипса вокруг малой оси образует сфероид. Сфероид также известен как сплюснутый у полюсов эллипсоид вращения.

рис.1.5.



Рис.1.5. Большая полуось и малая полуось сфероида.

Сфероид определяется либо большой полуосью  $a$ , и малой полуосью  $b$ , либо величиной  $a$  и сжатием. Сжатие – разность в длине между двумя осями, выраженная простой или десятичной дробью. Сжатие  $f$ , равно:

$$f = (a - b) / a$$

Сжатие выражается маленькой величиной, поэтому обычно вместо нее используется величина  $1/f$ . Параметры сфероидов для Международной геодезической системы координат 1984 года (World Geodetic System of 1984 – WGS1984 или WGS84) следующие:

$$a = 6378137.0 \text{ метров}$$

$$1/f = 298.257223563$$

Величина сжатия может меняться от 0 до 1. Нулевое значение сжатия означает, что две оси равны, что верно для сферы. Сжатие Земли приблизительно равно 0.003353.

Другой показатель, который, подобно сжатию описывает форму сфероидов, – квадрат эксцентриситета,  $e^2$ . Он выражается формулой:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

### 1.2.1 Определение различных сфероидов для точного картографирования

Чтобы помочь нам лучше понять объекты земной поверхности и особенности ее неровностей, неоднократно проводились геодезические съемки Земли. Эти исследования дали определение многих сфероидов, описывающих форму Земли. Как правило, сфероид выбирается для одной страны или определенной территории. Сфероид, наилучшим образом подходящий для одного географического региона, не обязательно подойдет для другого региона. До недавнего времени в геодезических измерениях в Северной Америке использовался сфероид, определенный Кларком в 1866. Большая полуось сфероидов Кларка 1866 равна 6 378 206.4 метра, малая полуось – 6 356 583.8 метра.

Из-за гравитационных различий и разнообразия объектов поверхности, Земля не является ни правильной сферой, ни правильным сфероидом. Использование спутниковых технологий позволило выявить несколько отклонений от правильного эллипса; например, Южный полюс расположен ближе к экватору, чем Северный полюс. Сфероиды, определенные при помощи спутников, вытесняют старые сфероиды, полученные с использованием наземных вычислений. Например, новым стандартным эллипсоидом для Северной Америки является эллипсоид «Геодезическая система привязки 1980 года» (Geodetic Reference System of 1980 – GRS 1980), радиусы которого равны 6 378 137.0 и 6 356 752.31414 метрам.

Поскольку изменение системы координат сфероидов приводит к изменению всех значений предыдущих измерений, многие организации не перешли на новые (и более точные) сфероиды.

### 1.3. Датумы

В то время как сфероид аппроксимирует форму Земли, датум определяет положение сфероидов относительно центра Земли. Датум предоставляет систему отсчета для определения местоположения объектов на поверхности Земли. Он определяет начальную точку и направление линий широты и долготы.

Если вы измените датум, или, более точно, географическую систему координат, значения координат ваших данных изменятся. Ниже приведены координаты (в градусах, минутах, секундах) для контрольной точки в г. Редландс, штат Калифорния, в системе координат Североамериканского датума 1983 года (NAD 1983 или NAD83):

$$-117 \ 12 \ 57.75961 \quad 34 \ 01 \ 43.77884$$

Та же точка в системе координат Североамериканского датума 1927 года (NAD 1927 или NAD27) будет иметь координаты:

**-117 12 54.61539 34 01 43.72995**

Значение долготы отличается примерно на три секунды, в то время как значение широты отличается примерно на 0.05 секунды.

В последние 15 лет спутниковые данные предоставили геодезистам новые измерения для определения эллипсоида, который наилучшим образом определяет форму Земли и который соотносит координаты с центром массы Земли. Геоцентрический датум использует центр масс Земли в качестве начальной точки. Наиболее поздним из разработанных и одним из широко используемых датумов является Геодезическая система мира 1984 года (WGS84 – World Geodetic System of 1984). Она служит основой для поддержки определения местоположения по всему миру.

рис.1.6.



Местный датум центрирует сфероид таким образом, что он наилучшим образом описывает поверхность Земли для данной конкретной территории. Точка на поверхности сфероида поставлена в соответствие определенной точке на поверхности Земли. Эта точка известна как начальная точка датума. Координаты "начальной точки" зафиксированы, и все остальные точки являются расчетными по отношению к этой точке. Начало системы координат местного датума не расположено в центре Земли. Центр сфероида местного датума смещен относительно центра Земли. Местными датумами являются системы координат NAD27 и Европейский датум 1950 года (ED 1950). Датум NAD 1927 разработан для Северной Америки, а датум ED 1950-для использования в Европе. Поскольку местный датум столь тесным образом связывает сфероид с определенной территорией на поверхности Земли, он не подходит для использования за пределами того региона, для которого он был разработан.

#### 1.4. Североамериканские датумы

Два горизонтальных датума, которые используются почти исключительно в Северной Америке, это Североамериканская система координат 1927 г. (NAD27) и Североамериканская система координат 1983 г.(NAD83).

##### NAD 1927

Североамериканская система координат 1927 г. NAD 1927 для представления формы Земли использует сфероид Кларка 1866 г. Начало координат этого датума – это точка на поверхности Земли, известная как Мидес Рэнч (Meades Ranch), шт. Канзас. Многие контрольные точки датума NAD27 были рассчитаны на основе наблюдений, выполненных в 1800-х гг. Эти расчеты выполнялись вручную по частям в течение многих лет. Поэтому ошибки варьировали от станции к станции.

## NAD 1983

Многие технологические достижения в методах ведения съемки и геодезических работ со времени введения NAD27 – электронные теодолиты, системы спутникового позиционирования GPS, интерферометрия сверхдлинной линии базиса и доплеровские системы – позволили обнаружить слабые места в существующей сети контрольных точек. Различия стали особенно заметными при попытках привязать существующие контрольные точки к новым точкам, полученными при вновь проведенных съемках. Введение нового датума позволило использовать для всей территории США и прилегающих районов единый датум.

Североамериканский датум 1983 года основан на данных как наземных, так и спутниковых наблюдений, и использует сфероид GRS80. Начальная точка этого датума – центр масс Земли. Это влияет на значения широты-долготы точек на поверхности, и привело к смещению местоположения предыдущих контрольных точек в Северной Америке, иногда на расстояние до 500 футов. Усилия нескольких стран в течение десяти лет связали воедино сеть контрольных точек для Соединенных Штатов, Канады, Мексики, Гренландии, стран Центральной Америки и Карибского бассейна.

Сфероид GRS 1980 практически совпадает со сфероидом WGS1984. Системы координат WGS1984 и NAD 1983 являются геоцентрическими системами. Поскольку обе системы близки, датум NAD 1983 сопоставим с данными GPS. Необработанные данные GPS даются фактически в системе координат WGS 1984.

## HARN или HPGN

В США на государственном уровне продолжают попытки привести датум NAD83 к более высокому уровню точности на основе использования современных методов съемки, доступность которых при разработке датума NAD83 была ограничена. Этот проект известен под названием Сеть высокоточной привязки (High Accuracy Reference Network – HARN), или Высокоточная геодезическая сеть (High Precision Geodetic Network – HPGN) и является совместным проектом Национальной Геодезической службы США (National Geodetic Survey) и отдельных штатов. К настоящему моменту съемка была проведена для всех штатов, но не все данные были обнародованы. К сентябрю 2000 года были опубликованы grids для 44 штатов и двух территорий.

## Другие датумы для Соединенных Штатов

Для Аляски, Гавайев, Пуэрто-Рико, Виргинских островов и некоторых Алеутских островов использовались другие датумы, отличные от NAD 1927. Обратитесь к главе 3. "Географические преобразования", для более подробной информации. Новые данные привязаны к системе координат NAD 1983.

## 2. Системы координат проекций

Системы координат проекций определяют правила проецирования координат на плоскую двухмерную поверхность. В отличие от географической системы координат спроецированная система координат имеет постоянные длины, углы и площади на плоской двумерной поверхности. Спроецированная система координат является производной от географической системы координат, которая основывается на сфере или сфероиде.

В спроецированной системе координат местоположения определяются координатами  $x$ ,  $y$  на сетке с началом координат в центре сетки. Положение каждой точки определяется двумя координатами, определяющими ее положение относительно центра. Одно определяет его положение по горизонтали, а другое – его положение по вертикали. Эти два значения называются координатой  $x$  и координатой  $y$ . Если использовать эти обозначения, то начальные координаты имеют значения  $x=0$  и  $y=0$ .

На регулярной сетке из отстоящих на одинаковом расстоянии друг от друга горизонтальных и вертикальных линий, горизонтальная линия в центре называется осью  $x$ , а центральная вертикальная линия – осью  $y$ . Единицы измерения постоянны и имеют равные интервалы во всем диапазоне  $x$  и  $y$ . Горизонтальным линиям выше начала координат и вертикальным линиям справа от начала координат приписываются положительные значения; линиям ниже или слева – отрицательные значения. Четыре квадранта представляют четыре возможные комбинации положительных и отрицательных  $x$ - и  $y$ -координат.

рис.1.7.

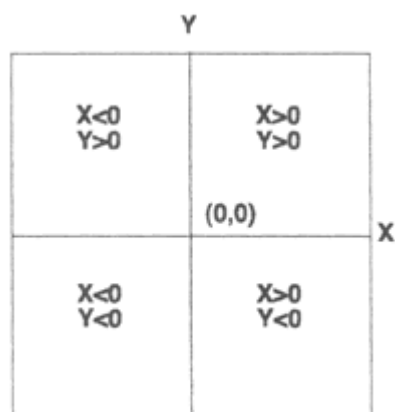


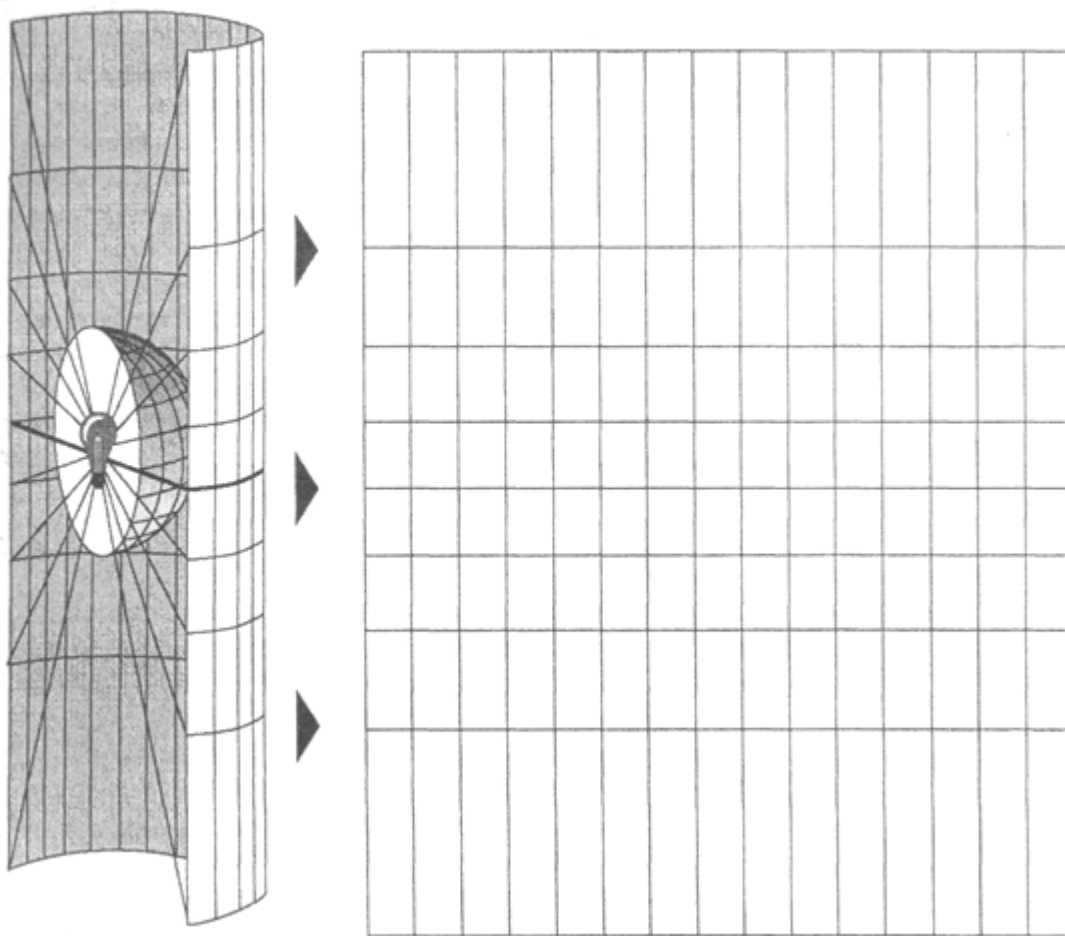
Рис.1.7. Знаки  $x$ ,  $y$  координат в спроецированной системе координат

### 2.1. Что такое картографическая проекция?

Независимо от того, рассматриваете ли Вы Землю как сферу или как сфероид, Вы должны преобразовать ее трехмерную поверхность в плоское изображение на карте. Это преобразование, выполняемое по математическим законам, называется *картографической проекцией*. Одним из простых способов понимания того, как картографические проекции изменяют пространственные свойства, является визуализация проекции света сквозь Землю на поверхность, которая называется проекционной поверхностью.

Представьте себе, что поверхность Земли прозрачна, и на ней нанесена картографическая сетка. Оберните кусок бумаги вокруг Земли. Источник света в центре Земли отбросит тени от сетки координат на кусок бумаги. Вы можете теперь развернуть бумагу и положить ее на плоскость. Форма координатной сетки на плоской поверхности бумаги очень отличается от ее формы на поверхности Земли. Проекция карты исказила картографическую сетку.

рис.1.8.



*Рис.1.8. Картографическая сетка географической системы координат, спроецированная на цилиндрическую поверхность.*

Разложить сфероид на плоскость несколько не легче, чем расплющить кусок апельсиновой кожуры – он будет разорван. При отображении Земной поверхности в двухмерном пространстве искажается форма, площадь, длина или направление объектов.

Картографические проекции используют математические формулы, определяющие связь между сферическими координатами точек на поверхности эллипсоида или шара и соответствующими координатами точек на плоскости карты.

Различные проекции имеют разные типы искажений. Некоторые проекции разработаны с учетом минимизации искажений одной или двух характеристик данных. Проекция может сохранять площадь объектов, но изменять их форму. На графике, представленном ниже, объекты, расположенные у полюса, вытянуты. Диаграмма на следующей странице показывает, как трехмерные объекты сжимаются для того, чтобы их можно было поместить на плоскую поверхность.



рис.1.9.



Картографические проекции предназначены для определенных целей. Одни картографические проекции могут использоваться для отображения крупномасштабных объектов на ограниченной площади, другие – для составления мелкомасштабных карт мира. Картографические проекции, используемые для мелкомасштабных карт, обычно основываются на сферической, а не сфероидальной географической системе координат.

### Равноугольные проекции

Равноугольные проекции сохраняют без искажений малые локальные формы. Для сохранения отдельных углов, описывающих пространственные отношения, равноугольная проекция должна также представлять линии картографической сетки пересекающимися под углом  $90^\circ$  на карте. Это достигается в этой проекции с помощью сохранения всех углов. Недостаток заключается в том, что площадь, ограниченная рядом кривых, может быть в процессе преобразования значительно искажена. Ни одна из картографических проекций не может сохранять большие территории без искажения формы.

### Равновеликие проекции

Равновеликие проекции сохраняют площадь изображаемых объектов. Вследствие этого другие свойства: форма, углы, масштаб – искажаются. В равновеликих проекциях параллели и меридианы могут не пересекаться под правильными углами. В некоторых случаях, особенно на картах небольших территорий, искажение форм не является очевидным, и очень трудно отличить равноугольную проекцию от равновеликой, если только она не была соответствующим образом определена по документации или путем измерений.

### Равнопромежуточные проекции

Карты с равнопромежуточными проекциями сохраняют расстояния между определенными точками. Правильный масштаб не сохраняется никакой проекцией на всей карте; однако, в большинстве случаев существует одна или более линий на карте, вдоль которых масштаб сохраняется постоянным. В большинстве равнопромежуточных проекций есть одна или несколько линий, длина которых на карте равна (в масштабе карты) длине соответствующей с нею линии на глобусе, независимо от того, является ли эта линия большой или малой окружностью, прямой или кривой линией. О таких расстояниях говорят, что они *истинные*. Например, в Синусоидальной проекции экватор и все параллели имеют свою истинную длину. В других равнопромежуточных проекциях могут быть истинными Экватор и все меридианы. Иные проекции (например, равнопромежуточная проекция двух точек) показывают истинный масштаб между одной или двумя точками и каждой другой точкой на карте. Необходимо иметь в виду, что ни одна проекция не бывает равнопромежуточной по отношению ко всем точкам на карте.

### Проекция истинного направления

Кратчайший путь между двумя точками на сферической поверхности, такой как поверхность Земли, пролегает вдоль сферического эквивалента прямой линии на плоской поверхности. Это большая окружность, на которой лежат две точки. Проекции истинного направления, или *азимутальные* проекции, используются для сохранения некоторых кривых, описывающих большие окружности, и придают правильные азимутальные направления всем точкам на карте относительно центра. Некоторые проекции этого типа являются также равноугольными, равновеликими или равнопромежуточными.

## 2.2. Типы проекций

Поскольку карты являются плоскими, в качестве вспомогательных поверхностей некоторых простейших проекций используются геометрические фигуры, которые можно развернуть на плоскость без растяжения их поверхностей. Они называются *развертывающимися* поверхностями. Типичными примерами являются конусы, цилиндры и плоскости. Картографические проекции систематически проецируют местоположения с поверхности сфероида на условные местоположения на плоской поверхности, используя уравнения картографических проекций.

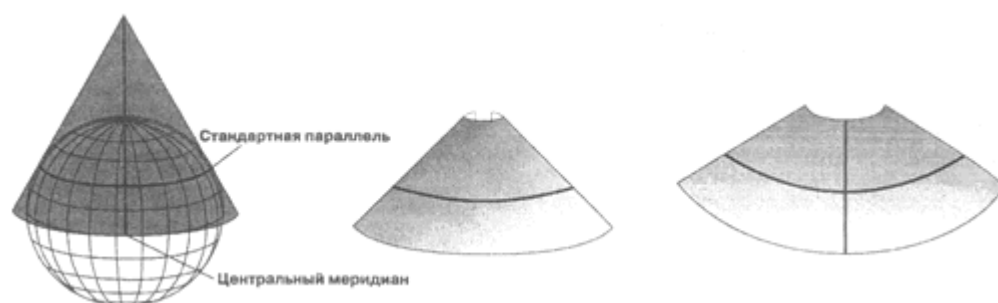
Первым шагом при проецировании одной поверхности на другую является создание одной или более точек контакта. Каждая такая точка называется *точкой касания*. Азимутальная проекция проходит по касательной к глобусу только в одной точке. Конусы и цилиндры касаются глобуса вдоль линии. Если поверхность проекции пересекает глобус вместо того, чтобы просто коснуться его поверхности, то полученная в результате проекция является секущей, а не касательной. Независимо от того, является ли контакт касательным или секущим, его место очень значимо, поскольку определяет точку или линии нулевого искажения. Эту линию истинного масштаба часто называют *стандартной линией*. В общем случае, искажение проекции увеличивается с увеличением расстояния от точки контакта.

Многие обычные картографические проекции можно классифицировать в соответствии с используемой для них проекционной поверхностью: конические, цилиндрические или азимутальные (проекции на плоскость).

### Конические проекции

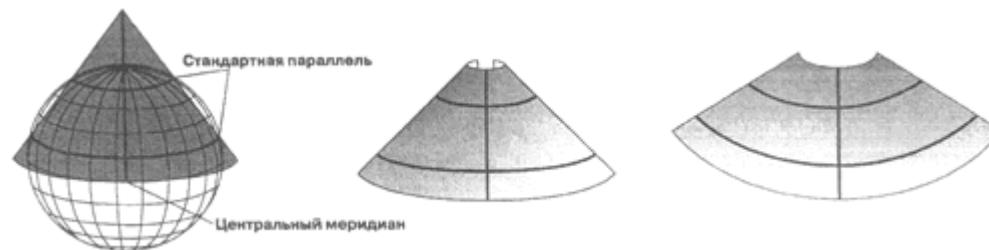
Самая простая коническая проекция проходит по касательной к глобусу вдоль линии широты. Эта линия называется *стандартной параллелью*. Меридианы проецируются на коническую поверхность, сходясь на вершине или в точке конуса. Параллели проецируются на коническую поверхность как кольца. Конус затем "разрезается" вдоль любого меридиана для создания конечной конической проекции, в которой имеются прямые сходящиеся меридианы и параллели, представленные концентрическими окружностями. Меридиан, противоположный линии сечения, становится *центральным меридианом*.

рис.1.10.



В целом, чем дальше от стандартной параллели, тем больше искажение. Соответственно, отсечение верхушки конуса создает более точную проекцию. Этого можно достичь, если не использовать полярную область при проецировании объектов. Конические проекции используются для среднеширотных зон, имеющих ориентацию с востока на запад.

рис.1.11.



Более сложные конические проекции соприкасаются с поверхностью глобуса в двух местах. Эти проекции называются *секущими* коническими проекциями и определяются двумя стандартными параллелями. Характер искажений при секущих проекциях различается для районов, расположенных между стандартными параллелями, и для районов, расположенных за их пределами. Как правило, секущая проекция дает меньшее суммарное искажение, чем касательная проекция. В еще более сложных конических проекциях ось конуса не совпадает с полярной осью глобуса. Такие проекции называются *косыми*.

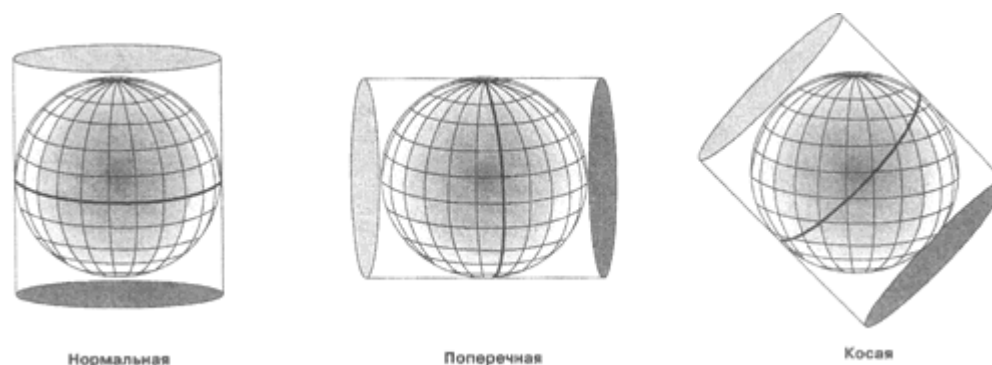
Изображение географических объектов зависит от расстояния между параллелями. При их равном удалении друг от друга проекция получается равнопромежуточной в направлении с севера на юг, но не равноугольной и не равновеликой. Примером такого типа проекций является Равнопромежуточная Коническая проекция. Для небольших областей общее искажение минимально. На Конической Равноугольной проекции Ламберта расстояние между центральными параллелями меньше, чем у параллелей ближе к границам, и не искажаются формы малых географических объектов на мелкомасштабных и крупномасштабных картах. На Равновеликой Конической проекции Альберса параллели вблизи северного и южного полюса-расположены ближе друг к другу, чем центральные параллели, и проекция отображает эквивалентные площади.

### Цилиндрические проекции

Подобно коническим проекциям цилиндрические проекции могут также быть касательными или секущими. Проекция Меркатора является одной из наиболее простых цилиндрических проекций, и экватор обычно является ее линией касания. Меридианы проецируются геометрически на цилиндрическую поверхность, а параллели проецируются математически. При этом создается координатная сетка с углами  $90^\circ$ . Цилиндр "рассекается" вдоль любого меридиана для получения конечной цилиндрической проекции. Меридианы расположены через равные интервалы, в то время как интервал между параллельными линиями широты возрастает по направлению к полюсам. Эта проекция является равноугольной и показывает истинное направление вдоль прямых линий. В проекции Меркатора прямыми линиями являются *линии румбов* – линии постоянного азимута, а не большинство больших окружностей.

При создании более сложных цилиндрических проекций цилиндр вращают, изменяя, таким образом, линии касания или сечения. Поперечные цилиндрические проекции, такие как Поперечная проекция Меркатора, используют меридианы как линии касательного контакта или линии, параллельные меридианам, как линии сечения. Стандартные линии располагаются в направлении север-юг, и вдоль них масштаб является истинным. Наклонные цилиндры вращают вокруг линии большой окружности, расположенной где-нибудь между экватором и меридианами. В этих более сложных проекциях большинство меридианов и линий широты больше не являются прямыми.

рис.1.12.



Во всех цилиндрических проекциях линия касания или линии сечения не имеют искажений, и, таким образом, являются линиями равных расстояний. Другие географические свойства варьируют в зависимости от конкретной проекции.

### Проекция на плоскость (азимутальные проекции)

Проекция на плоскость проецирует картографические данные на плоскую поверхность, касающуюся глобуса. Проекция на плоскость также известна также как азимутальная или зенитная проекция. Этот вид проекции обычно идет по касательной к глобусу в одной точке, но может быть и секущим. Точкой контакта может быть Северный полюс, Южный полюс, точка на экваторе или любая точка между ними. Эта точка определяет используемую ориентировку и является фокусом проекции. Фокус определяется центральной долготой и центральной широтой. Ориентировка проекций может быть *полярной (нормальной)*, *экваториальной (поперечной)* и *косой*.

рис.1.13.



Полярные проекции представляют собой простейшую форму этого вида проекций. Параллели широты отходят от полюса как концентрические окружности, а меридианы представлены прямыми линиями, которые пересекаются на полюсе под своими истинными углами. При всех остальных ориентировках проекции на плоскость будут иметь углы координатной сетки  $90^\circ$  в своем центральном фокусе. Направления из фокуса являются точными.

Большие окружности, проходящие через фокус, представлены прямыми линиями, таким образом, кратчайшим расстоянием от центра до любой другой точки на карте является прямая линия. Модели искажения площадей и форм представляют собой круги вокруг фокуса. Поэтому азимутальные проекции лучше приспособлены для отображения округлых территорий, чем прямоугольных. Проекция на плоскость используется чаще всего для картографирования полярных регионов.

В некоторых проекциях на плоскость данные о поверхности рассматриваются со специфической точки в пространстве. Эта точка обзора определяет, как сферические данные будут спроецированы на плоскую поверхность. Перспектива, в которой рассматриваются все местоположения, в различных азимутальных проекциях различная. Точкой перспективы может быть центр Земли, точка на поверхности, прямо противополо-

ложная фокусу, или внешняя точка по отношению к глобусу, как будто ее рассматривают со спутника или с другой планеты.

Азимутальные проекции частично классифицируются по своему фокусу и, если это возможно, по перспективе. На рисунке ниже приведено сравнение трех плоскостных проекций с полярными аспектами, но с различными положениями точки перспективы. В Гномонической проекции данные о поверхности рассматриваются от центра Земли, в то время как в Стереографической проекции они рассматриваются от одного полюса к противоположному полюсу. В Ортографической проекции Земля рассматривается с бесконечно удаленной точки, как будто бы из далекого космоса. Обратите внимание на то, как различия в перспективе определяют степень искажения по направлению к экватору.

рис.1.14.



### 2.3. Другие проекции

Проекции, которые мы обсуждали до настоящего времени, – это такие проекции, которые можно создать проецированием одной геометрической фигуры (сферы) на другую (конус, цилиндр или плоскость). Многие другие проекции нельзя так просто соотнести с одной из этих трех поверхностей.

*Модифицированные проекции* представляют собой модифицированные версии других проекций (например, Пространственная косая проекция Меркатора является модификацией проекции Меркатора). Эти модификации вносятся для уменьшения искажения, часто путем введения дополнительных стандартных линий или изменения модели искажения.

*Псевдопроекции* обладают только несколькими характеристиками другого класса проекций. Например, Синусоидальную проекцию называют псевдоцилиндрической проекцией, потому что все линии широты являются прямыми и параллельными, а все меридианы имеют равный промежуток. Однако она не может быть истинной цилиндрической проекцией, потому что все меридианы, за исключением центрального меридиана, имеют кривизну. В результате Земля на карте имеет овальную, а не прямоугольную форму.

Другие категории можно отнести к специальным группам, таким как круговые или звездообразные.

### 2.4. Параметры проекций

Знание проекции карты не является само по себе достаточным для того, чтобы определить систему координат проекции. Вы можете утверждать, что ваш набор данных относится к Поперечной проекции Меркатора, но это не является достаточной информацией. Где находится центр проекции? Был ли использован коэффициент маш-

таба? Без знания точных значений параметров проекции, нельзя перепроецировать ваш набор данных.

Вы можете также получить некоторое представление об искажениях, которые проекция добавила к данным. Если вас интересует Австралия, но вы знаете, что центр проекции вашего набора данных находится в точке с координатами 0, 0, или на пересечении экватора и Гринвичского нулевого меридиана, вы, пожалуй, захотите подумать об изменении центра проекции.

Каждая картографическая проекция имеет набор параметров, которые вы должны задать. Параметры устанавливают начало координат и определяют проекцию в зависимости от территории, которая вас интересует. Угловые параметры используют единицы измерения географической системы координат, в то время как линейные параметры используют единицы измерения системы координат проекции.

### **Линейные параметры**

Сдвиг по оси  $x$  — линейное значение, применяемое для определения начала координат по оси  $x$ .

Сдвиг по оси  $y$  — линейное значение, применяемое для определения начала координат по оси  $y$ .

Сдвиг по оси  $x$  и сдвиг по оси  $y$  обычно используется для того, чтобы убедиться, что все значения координат  $x$  и  $y$  являются положительными. Вы можете также использовать параметры сдвига по  $x$  и по  $y$  для того, чтобы сузить диапазон значений координат  $x$  и  $y$ . Например, если вам известно, что все значения  $y$  больше, чем пять миллионов метров, вы можете применить значение сдвига по  $x$  равное -5 000 000.

Коэффициент масштаба — безразмерная величина, применяемая для центральной точки или линии проекции.

Коэффициент масштаба обычно чуть меньше единицы. В системе координат UTM, использующей Поперечную проекцию Меркатора, коэффициент масштаба равен 0.9996. Это означает, что масштаб вдоль центрального меридиана проекции равен 0.9996, а не 1.0. При этом на двух почти параллельных линиях, находящихся на расстоянии примерно 180 км, масштаб равен 1.0. Использование коэффициента масштаба уменьшает общие искажения проекции для области интереса.

### **Угловые параметры**

Азимут — Определяет центральную линию проекции. Угол вращения измеряется по часовой стрелке от направления на север. Используется в азимутальных случаях косоугольной проекции Меркатора в версии Хотина (Hotine Oblique Mercator).

Центральный меридиан — Определяет начало координат по оси  $x$ .

Широта начала координат — Определяет начало координат по оси  $x$ . Центральный меридиан и широта начала координат являются синонимичными параметрами.

Центральная параллель — Определяет начало координат по оси  $y$ .

Долгота начала координат — Определяет начало координат по оси  $y$ . Этот параметр может не находиться в центре проекции. В частности, в конических проекциях этот параметр используется для того, чтобы задать начало координат по оси  $y$  за пределами области интереса. В таком случае, вам не нужно задавать параметр сдвига по оси  $y$ , чтобы быть уверенным, что все значения координат  $y$  будут положительными.

Долгота центра — Используется с косоугольной проекцией Меркатора в версии Хотина (Hotine Oblique Mercator) (и для проекции двух точек, и для азимутальной проекции)

для того, чтобы определить начало координат по оси  $x$ . Обычно этот параметр синонимичен параметрам долготы начала координат и центрального меридиана.

Широта центра проекции — Используется с косою проекцией Меркатора в версии Хотина (Hotine Oblique Mercator) (и для проекции двух точек, и для азимутальной проекции) для того, чтобы определить начало координат по оси  $y$ . Этот параметр почти всегда является центром проекции.

Стандартная параллель 1 и стандартная параллель 2 — Используется в конических проекциях для определения линий широты, для которых масштаб равен 1.0. При определении равноугольной конической проекции Ламберта с одной стандартной параллелью, первая стандартная параллель определяет начало координат по оси  $y$ .

Для других случаев конических проекций, начало координат по оси  $y$  определяется параметром 'широта начала координат'.

Долгота первой точки

Широта первой точки

Долгота второй точки

Широта второй точки

Четыре параметра, приведенные выше, используются для равнопромежуточной проекции двух точек и для косою проекции Меркатора в версии Хотина (Hotine Oblique Mercator). Они устанавливают две географические точки, которые определяют центральную ось проекции.

### 3. Географические преобразования

#### 3.1. Методы геометрических преобразований

Перемещение ваших данных между системами координат иногда включает преобразования между географическими системами координат.

рис.1.15.



Поскольку географические системы координат содержат датумы, основанные на сфероидах, географическое преобразование меняет также лежащий в основе датума сфероид. Существует несколько методов, которые имеют различные уровни погрешности, для выполнения преобразований между датумами. Точность конкретного преобразования может меняться от сантиметров до метров в зависимости от метода и от

качества и числа контрольных точек, используемых для определения параметров преобразований.

Географическое преобразование всегда конвертирует географические (широту-долготу) координаты. Некоторые методы переводят географические координаты в геоцентрические  $(X, Y, Z)$  координаты, преобразуют координаты  $X, Y, Z$ , и приводят новые значения обратно к географическим координатам.

рис.1.16.

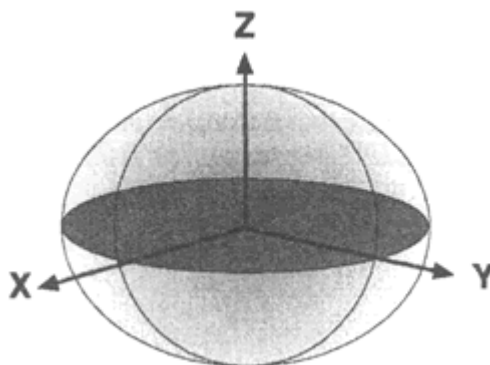


Рис.1.16. Система координат  $X, Y, Z$ .

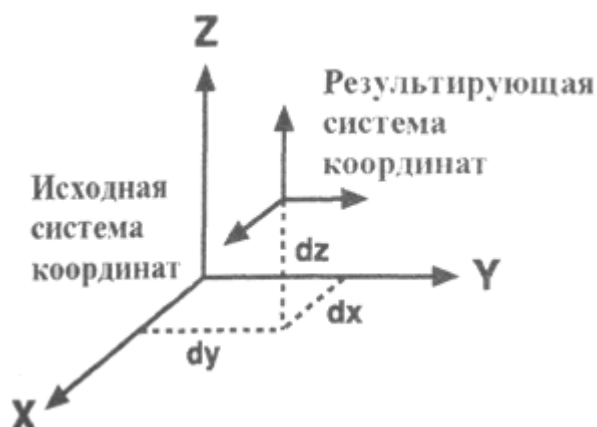
Преобразования включают методы геоцентрического сдвига, метод Молоденски и метод системы координат.

### 3.2. Методы, основанные на решении уравнений

#### Методы, использующие три параметра

Простейший метод преобразования датумов – это геоцентрическое преобразование по трем параметрам. Геоцентрическое моделирование моделирует разницу между двумя датумами в системе координат  $X, Y, Z$ . Для одного датума центр определяется в точке с координатами  $0, 0, 0$ . Центр другого датума определяется на некотором расстоянии в метрах  $(DX, DY, DZ)$  от этой точки.

рис.1.17.





Обычно параметры трансформирования определяются как переход 'от' местного датума 'к' WGS 1984 или другому геоцентрическому датуму.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{new} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{original}$$

Три параметра являются линейными сдвигами и всегда выражаются в метрах.

### Методы, использующие семь параметров

Более сложное и точное преобразование датума возможно выполнить, если к геоцентрическому преобразованию добавить четыре дополнительных параметра. Семь параметров – это три линейных сдвига (DX, DY, DZ), три угловых поворота вокруг каждой оси ( $r_x, r_y, r_z$ ), и коэффициент(ы) масштаба.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{new} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+s) \cdot \begin{bmatrix} 1 & r_z & -r_y \\ -r_z & 1 & r_x \\ r_y & -r_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{original}$$

Значения поворота даются в десятичных секундах, в то время как коэффициент масштаба выражается в частях на миллион (parts per million – ppm). Поворот можно определить двумя различными способами. Угол поворота может иметь положительные значения либо при повороте по направлению по часовой стрелке, либо по направлению против часовой стрелки, если смотреть на начало системы координат X, Y, Z.

рис.1.18.

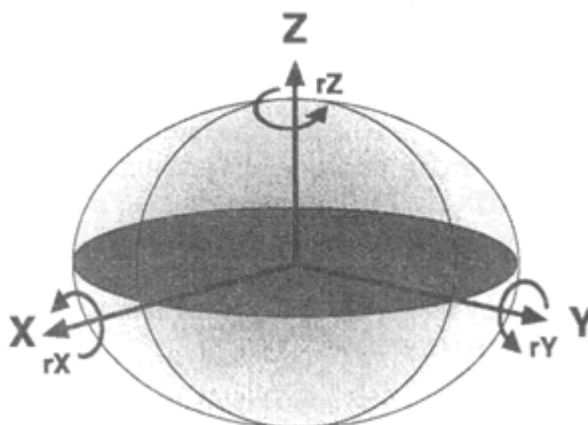


Рис.1.18. Определение углов поворота в системе координат (или определение Бурса-Вольфа).

Уравнение, приведенное в предыдущем столбце, показывает, как такие уравнения записываются в Соединенных Штатах и в Австралии, и носит название 'преобразования путем поворота системы координат'. Значения поворота положительны при вращении против часовой стрелки. В Европе используется другое преобразование, называемое 'преобразованием радиуса-вектора'. Оба метода иногда называют методом Бурса-Вольфа. В Projection Engine метод преобразования систем координат и метод Бурса-Вольфа – это одно и то же. Поддерживаются и метод преобразования систем координат, и метод радиуса-вектора, и достаточно просто конвертировать значения преобразований из одного метода в другой путем простого изменения знаков трех значений углов поворота. Например, для перехода от датума WGS 1972 к датуму WGS 1984 методом преобразования системы координат необходимы следующие параметры (в следующем порядке, DX, DY, DZ,  $r_x, r_y, r_z, s$ ):

**(0.0, 0.0, 4.5, 0.0, 0.0, -0.554, 0.227)**

Для того, чтобы использовать те же самые параметры для преобразования по методу радиуса-вектора, измените знак угла поворота. Новые параметры выглядят так:  
**(0.0, 0.0, 4.5, 0.0, 0.0, +0.554, 0.227)**

Если нет дополнительных данных, только по параметрам невозможно определить, какой используется метод преобразования. Если вы воспользуетесь неправильным методом, ваши результаты могут содержать неточные координаты. Единственный способ установить, как заданы параметры, – это проверить значения координат контрольной точки, которые известны для обеих систем.

### Метод Молоденски (Molodensky method)

Метод Молоденски выполняет прямые преобразования между двумя географическими системами координат без фактического перехода к системе координат X, Y, Z. Для метода Молоденски необходимо задать три сдвига (DX, DY, DZ) и разности между размерами больших полуосей (Da) и сжатиями (Df) двух сфероидов. Projection Engine автоматически пересчитывает разницу между сфероидами в зависимости от используемых датумов.

$$(M+h)\Delta\varphi = -\sin\varphi\cos\lambda\Delta X - \sin\varphi\sin\lambda\Delta Y + \cos\varphi\Delta Z + \frac{e^2\sin\varphi\cos\varphi}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{1/2}}\Delta a + \sin\varphi\cos\varphi\left(M\frac{a}{b} + N\frac{b}{a}\right)\Delta f$$

$$(N+h)\cos\varphi\Delta\lambda = -\sin\lambda\Delta X + \cos\lambda\Delta Y$$

$$\Delta h = \cos\varphi\cos\lambda\Delta X + \cos\varphi\sin\lambda\Delta Y + \sin\varphi\Delta Z - (1-e^2\sin^2\varphi)^{1/2}\Delta a + \frac{a(1-f)}{(1-e^2\sin^2\varphi)}\sin^2\varphi\Delta f$$

$h$  – высота эллипсоида (в метрах)

$j$  – широта

$l$  – долгота

$a$  – большая полуось сфероида (в метрах)

$b$  – малая полуось сфероида (в метрах)

$f$  – сжатие сфероида

$e$  – эксцентриситет сфероида

$M$  и  $N$  – это радиусы кривизны меридиана и первого вертикала соответственно для данной широты. Значения  $M$  и  $N$  вычисляются по следующим формулам:

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{3/2}}$$

$$N = \frac{a}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{1/2}}$$

Вы находите значения D $i$  и D $j$ . Итоговые значения автоматически добавляются Projection Engine.

### Сокращенный метод Молоденски

Сокращенный метод Молоденски – это упрощенная версия метода Молоденски. В нем используются следующие формулы:

$$M\Delta\varphi = -\sin\varphi\cos\lambda\Delta X - \sin\varphi\sin\lambda\Delta Y + \cos\varphi\Delta Z + (a\Delta f + f\Delta a) \cdot 2\sin\varphi\cos\varphi$$

$$N\cos\varphi\Delta\lambda = -\sin\lambda\Delta X + \cos\lambda\Delta Y$$

$$\Delta h = \cos\varphi \cos\lambda \Delta X + \cos\varphi \sin\lambda \Delta Y + \sin\varphi \Delta Z + (a\Delta f + f\Delta a) \sin^2\varphi - \Delta a$$

### 3.3. Методы, основанные на гриде

#### Методы NADCON и HARN

В Соединенных Штатах для преобразований между географическими системами координат используется метод, основанный на гриде. Методы, основанные на гриде, позволяют моделировать различия между системами и потенциально являются наиболее точными методами. Область интереса делится на ячейки. Национальная Геодезическая Служба (National Geodetic Survey – NGS) публикует гриды для осуществления перехода от системы координат NAD 1927 к другим географическим системам и датуму NAD 1983. Мы объединяем эти преобразования под названием метода NADCON. Основной грид NADCON, CONUS, осуществляет преобразования для континентальных 48 штатов. Другие гриды NADCON конвертируют старые географические системы координат в систему NAD 1983 для

- \* Аляски
- \* Гавайских островов
- \* Пуэрто-Рико и Виргинских островов
- \* Островов св. Георгия, св. Лаврентия и св. Павла на Аляске

Точность метода для континентальных штатов составляет около 0.15 м, для Аляски и ее островов – 0.50 м, 0.20 м – для Гавайских островов и 0.05 м – для Пуэрто-Рико и Виргинских островов. Точности могут варьировать в зависимости от того, насколько достоверными были геодезические данные для данной территории на момент вычисления гридов (NADCON, 1999).

NADCON EXTRACTED REGION				NADGRID			
37	21	1	-122.00000	.25000	32.00000	.25000	.00000
0.007383	.004806	.002222	-.000347	-.002868	-.005296		
-0.007570	-.009609	-.011305	-.012517	-.013093	-.012901		
-.011867	-0.009986	-.007359	-.004301	-.001389	.001164		
.003282	.004814	.005503	.005361	.004420	.002580		
.000053	-.002869	-.006091	-.009842	-.014240	-.19217		
-.025104	-.03027	-.050254	-.072636	-.087238	-.099279		
-.110968							

#### Часть файла для грида системы HARN

Для Гавайских островов никогда не использовался датум NAD 1927. Их картографирование осуществлялось с использованием нескольких датум под общим названием Старые Гавайские датумы.

Новые геодезические съемки и спутниковые измерения позволили Национальной геодезической службе NGS и штатам обновить сети геодезических контрольных точек. По мере того, как заканчиваются работы для каждого штата, NGS публикует данные грида, который осуществляет преобразования между NAD 1983 и более точные данные о координатах контрольных точек. Вначале, эти работы были названы Высокоточная геодезическая сеть (High Precision Geodetic Network – HPGN). В настоящее время они носят название Сеть высокоточной привязки (High Accuracy Reference Network – HARN). К сентябрю 2000 года более 40 штатов опубликовали гриды HARN. Преобразования с использованием метода HARN имеют точность около 0.05 метров (NADCON, 2000).

Значения разницы в десятичных секундах хранятся в двух файлах: один для долгот и один для широт. Для вычисления точных значений разницы между двумя системами географических координат для данной точки используется билинейная интерполяция. Гриды представляют собой бинарные файлы, но программа Национальной геодезической службы NADGRD позволяет конвертировать гриды в формат ASCII (American Standard Code for Information Interchange – стандартный американский код для обмена информацией). Внизу страницы показаны заголовок и первая 'строка' файла CSHPGN.LOA. Это грид долготы для Южной Калифорнии. Формат первого ряда чисел – это (по порядку следования): число столбцов, число строк, число значений  $z$  (всегда одно), минимальная долгота, размер ячейки, минимальная широта, размер ячейки, и неиспользуемое значение.

Следующие 37 значений (в данном случае) – это смещение долготы с  $-122^\circ$  до  $-113^\circ$  на  $32^\circ$  Ш с интервалом  $0.25^\circ$  по долготу.

### Преобразования для национальных датумов (National Transformation), версия 2

Как и в Соединенных Штатах, в Канаде для перехода от системы координат NAD 1927 к системе координат NAD 1983 используется метод, основанный на гриде. Метод Национального Преобразования, версия 2 (NTv2) практически аналогичен методу NADCON. Набор бинарных файлов содержит разницы между двумя системами географических координат. Для вычисления точных значений для каждой точки используется метод билинейной интерполяции.

В отличие от метода NADCON, который одновременно может использовать только один грид, метод NTv2 разработан таким образом, что он проверяет несколько гридов для получения наиболее точной информации о смещении. Для Канады существует набор гридов с низкой плотностью сетки. Определенные территории, такие как города имеют локальные подгриды с высокой плотностью сетки, которые перекрывают части базовых, или исходных гридов. Если точка находится в пределах одного из гридов с высокой плотностью сетки, метод NTv2 будет использовать этот грид; иначе, точка 'проваливается' в грид с низкой плотностью сетки.

рис.1.19.



Рис. 1.19. Подгрид с высокой плотностью, с четырьмя ячейками, наложенный на базовый с низкой плотностью, также с четырьмя ячейками.

Если точка попадает в нижнюю левую часть рисунка, приведенного выше, между звездочками, сдвиги координат рассчитываются по подгриду с высокой степенью точности. Для координат точки, находящейся где-либо еще, сдвиги будут вычисляться по базовому гриду с низкой плотностью сетки. Программное обеспечение автоматически рассчитывает, какой базовый грид или подгрид использовать.

Исходные гриды для Канады имеют промежутки, колеблющиеся от пяти до двадцати минут. Размер стороны ячейки гридов с высокой плотностью сетки обычно составляет 30 секунд.

В отличие от гридов NADCON, гриды NTv2 выдают список точности вычислений для каждой точки. Значения точности могут варьировать от нескольких сантиметров до примерно одного метра. Гриды с высокой плотностью сетки обычно обеспечивают точность до нескольких миллиметров.

Формат NTv2 также был принят для преобразований между датумами в Австралии и Новой Зеландии. Австралия опубликовала несколько гридов для штатов, которые осуществляют переход от Австралийского геодезического датума 1966 года (AGD 1966) либо 1984 года (AGD 1984) к Геодезическому датуму Австралии 1994 года (GDA 1994). Впоследствии, гри-ды для штатов будут объединены в единый грид для всей страны. В Новой Зеландии выпущен грид для всей страны, который позволяет осуществлять преобразования между Новозеландским геодезическим датумом 1949 (NZGD 1949) и датумом NZGD 2000.

### **Преобразования для национальных датумов (National Transformation), версия 2**

Как и метод NADCON, метод преобразования для национальных датумов, версия 1 (NTv1) использует единый грид для моделирования различий между системами координат NAD 1927 и NAD 1983 в Канаде. В ArcInfo™ (для рабочих станций) эта версия известна также как CNT. Точность этого метода – в пределах 0.01 м для действительных разностей для 74 процентов точек и в пределах 0.5 м для 93 процентов случаев.

