

УДК: 528.235.1

Обзор геодезических проекций, используемых при создании координатной основы пространственного описания объектов железнодорожной инфраструктуры

Overview of geodetic projections used to create the coordinate basis for the spatial description of railway infrastructure objects



Духин С.В., к.т.н., начальник Научно-технического комплекса, АО «НИИАС»,

E-mail: s.duhin@vnias.ru, Москва, Россия

Dukhin S.V., Ph.D., Head of Department, JSC NIIS, E-mail: s.duhin@vnias.ru, Moscow, Russia

Нуйкин А. В., начальник Центра, АО «НИИАС», E-mail: a.nuykin@vnias.ru, Москва, Россия

Nuykin A.V., Head of the Center, JSC NIIS, E-mail: a.nuykin@vnias.ru, Moscow, Russia

Базлов Ю.А., главный специалист, АО «НИИАС», E-mail: u.bazlov@vnias.ru, Москва, Россия

Bazlov U.A., Chief Specialist, JSC NIIS, E-mail: u.bazlov@vnias.ru, Moscow, Russia



Аннотация

В статье описываются способы проецирования поверхности Земли на плоскость и правила установления зависимости (соответствия) между геодезическими координатами точек земного эллипсоида и прямоугольными координатами тех же точек на плоскости. Подробно рассмотрены равноугольные проекции, применяемые для решения геодезических задач на плоскости: проекция Гаусса-Крюгера, универсальная проекция Меркатора UTM, равноугольная коническая проекция Ламберта.

Ключевые слова: транспорт, картографические проекции, геодезические проекции.



Abstract

The article describes the methods of projecting the Earth's surface onto a plane and the rules for establishing the relationship (correspondence) between the geodetic coordinates of the points of the Earth's ellipsoid and the rectangular coordinates of the same points on the plane. The equiangular projections used to solve geodesic problems on the plane are considered in detail: the Gauss-Kruger projection, the universal Mercator UTM projection, the equiangular conic Lambert projection.

Keywords: transport, cartographic projections, geodetic projections.



Введение

Достижение целевых параметров развития холдинга Российские железные дороги в последние годы тесно связано с созданием цифровых платформ и технологий, представляющих собой комплексы специализированного оборудования и информационных систем, интегрированные бизнес-процессы и технологические производственные процессы железнодорожного транспорта с целью обеспечения единства представления объектных и процессных моделей для использования всеми участниками процессов, включая производственный персонал, руководство, клиентов и партнеров, поставщиков и потребителей услуг [1–3]. В состав информационно-технологического обеспечения таких бизнес-блоков как строительство, эксплуатация, ремонт и эксплуатация производственной инфраструктуры, организация управления движением, управление тяговыми ресурсами входят современные геоинформационные технологии, в том числе высокоточные методы координатно-временного обеспечения, внедряемые в производственные процессы.

Одним из важнейших назначений применения геоинформационных технологий является использование постоянно актуализируемых и верифицируемых пространственных данных об объектах инфраструктурного комплекса в ходе их проектирования, строительства и эксплуатации, в том числе в качестве информационного обеспечения технологий информационного моделирования (ТИМС). Накопленные в ходе проектных, изыскательских и строительных работ сведения и построенные цифровые модели (цифровые двойники) построенных объектов позволяют обеспечить эффективный технический контроль их состояния на всех стадиях жизненного цикла. Внедрение цифровых моделей позволяет вывести эффективность строительных работ на качественно новый уровень, объединить «цифровые паспорта» построенных инфраструктурных объектов в единый информационный ресурс ОАО «РЖД» [4].

Особенностью цифрового представления линейно-протяженных объектов производственной инфраструктуры железнодорожного транспорта является необходимость обеспечения точности, близкой к масштабу 1:1, и в пределах измерений обеспечивающей такой масштаб. Среднеквадратическое отклонение геодезических измерений при выполнении инженерных изысканий для проектирования железнодорожного пути, например, составляет 1 сантиметр. Для создания систем координат, обеспечивающих такие измерения, используются специальные локальные или местные геодезические сети, создаваемые путем сгущения местных региональных геодезических сетей, точности которых значительно (на порядок и более) хуже, чем точности создаваемых сетей. Если размеры измеряемого объекта таковы, что система координат является плоской, то есть не имеет расхождений в измерении расстояний вследствие кривизны земной поверхности, задача решается просто закреплением созданной системы координат на местности путем закладки долговременных реперов. Но и в этом случае в процессе эксплуатации построенного объекта могут возникнуть проблемы вслед-

ствие утери опорных реперов или их координат, так как повторное построение специальной реперной сети путем сгущения одной и той же местной региональной сети, даст результат, отличный от первого вследствие низкой точности исходной сети. Если же объект имеет значительную протяженность, необходимо создание такой системы координат, которая учитывает кривизну земной поверхности и не зависит от параметров местных сетей. В противном случае, неизбежно возникают коллизии при попытке стыковки проектных решений различных проектировщиков, а также повторных изысканий [5].

То есть, с учетом вышесказанного, необходимо разработать методику построения специальных геодезических сетей в любом месте земной поверхности, точность которых приближается к абсолютной. Для этого необходимо, прежде всего, определить тип проекции, наиболее подходящий для создания специальных геодезических сетей.

Поскольку поверхность земного эллипсоида не может быть развернута на плоскости без деформаций и разрывов, в геодезии, как и в картографии, применяют различные законы взаимного отображения (проекции) поверхности эллипсоида на плоскости.

В какой бы проекции ни строилось изображение земной поверхности на плоскости, поверхность эллипсоида никогда не может быть развернута в плоскость без растяжения или сжатия площади территории, поэтому при проецировании изображение на плоскости всегда искажено.

При переходе с эллипсоида на плоскость могут искажаться углы, площади, формы и длины линий, поэтому для конкретных целей можно создать проекции, которые значительно уменьшают какой-либо один вид искажений. Искажения всех видов тесно связаны между собой. Они находятся в такой зависимости, что уменьшение одного вида искажения сразу же влечет за собой увеличение другого вида искажений. Например, при уменьшении искажений площадей увеличиваются искажения углов и т. д. При этом, необходимо отметить, что искажения длин вообще невозможно исключить полностью.

При проецировании земной поверхности на плоскость необходимо, чтобы в обязательном порядке были выполнены следующие **требования**:

- изображение территории должно быть непрерывным, без разрывов и перекрытий;
- каждой точке земной поверхности должна соответствовать только одна точка на плоскости.

Для выполнения этих требований в местах разрывов территории производят её равномерное растяжение, а в местах перекрытий – сжатие. В результате этого на плоскости всегда возникают искажения территорий. Полностью избавиться от искажений невозможно, но можно уменьшить их влияние.

Проекции предназначены для отображения объектов, находящихся на поверхности эллипсоида (шара), на плоскость, и устанавливают зависимость (соответствие) между геодезическими координатами точек земного эллипсоида и прямоугольными координатами тех же точек на плоскости.



Из данного определения следует, что прямоугольные координаты x и y заданной точки на плоскости можно вычислить по значениям геодезической широты B и геодезической долготы L этой же точки на поверхности земного эллипсоида [6] с привлечением значений параметров принятого земного эллипсоида (большая полуось и сжатие):

$$\begin{aligned} x &= f_1(B, L), \\ y &= f_2(B, L). \end{aligned}$$

Функции f_1 и f_2 могут быть бесконечно разнообразными и поэтому количество проекций может быть неограниченным.

В **математической картографии** подробно рассматриваются различные виды проекций, а также вопросы учета искажений геометрических элементов на поверхности эллипсоида при их отображении на плоскости с целью создания самых различных **карт**: от наиболее точных – **топографических**, до обзорных – **географических**.

По характеру искажений применяемые в картографии проекции подразделяются на: равноугольные, равновеликие, произвольные и равнопромежуточные [8].

Равноугольными (конформными) проекциями называют такие, в которых отсутствуют искажения углов и азимутов линейных элементов, но в них деформируются длины линий и площади.

Равновеликими (равноплощадными) проекциями называют проекции, в которых площади соответствующих областей на поверхности эллипсоидов и на плоскости тождественно равны (пропорциональны). В этих проекциях искажены углы и формы объектов.

Произвольные проекции имеют искажения углов, площадей и длин, но эти искажения распределены по карте таким образом, что они минимальны в центральной части и возрастают на периферии.

Равнопромежуточными называют проекции, сохраняющие длину по одному из главных направлений. Как правило, это проекции с ортогональной картографической сеткой. В этих случаях главными являются направления вдоль меридианов и параллелей.

В качестве **геодезических проекций** [7] предпочтение отдается проекциям, обеспечивающим медленное нарастание в них искажений элементов геодезических построений при постепенном увеличении площади территории. Особенно важным является требование, чтобы в проекции обеспечивалась высокая точность и удобство учета этих искажений, причем по наиболее простым формулам.

По характеру искажений геодезические проекции относятся к классу равноугольных проекций.

Равноугольными (конформными) проекциями называют такие, в которых отсутствуют искажения углов и азимутов линейных элементов. Эти проекции сохраняют без искажений углы (например, между севером и востоком всегда угол должен быть прямым) и формы малых объектов, но в них резко деформируются длины и площади. Следует отметить, что сохранение углов для больших территорий труднодостижимо, и этого можно добиться только на сравнительно небольших участках.

Анализ проекций для решения **геодезических задач** на плоскости (геодезических проекций), получивших наибольшее применение в мировой геодезической практике, показывает следующее:

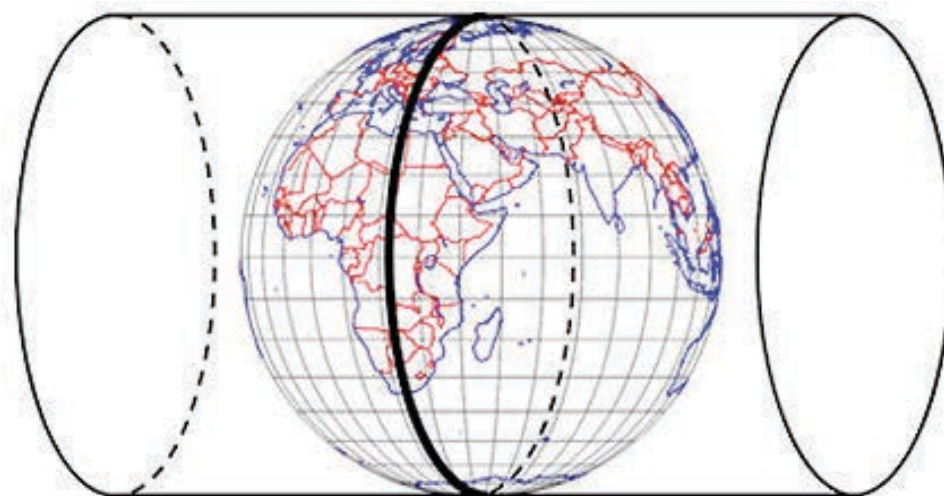


Рисунок 1. Проецирование поверхности Земли на цилиндр

- геодезические проекции получают на основе теории равноугольного (конформного) отображения поверхностей, когда частный масштаб длин в точке не зависит от направления и сохраняется подобие бесконечно малых фигур;
- геодезические построения на отдельных объектах и в отдельных государствах, как правило, охватывают небольшие по сравнению со всей площадью Земли территории;
- все геодезические проекции относятся к весьма узкому классу перспективных и симметричных проекций, когда все виды искажений возрастают по мере удаления от линии или точки симметрии;
- в геодезических проекциях по крайней мере один из меридианов эллипсоида на плоскости изображается прямой линией и принимается за одну из координатных осей, в левой системе – за ось абсцисс, и этот меридиан называется осевым меридианом.

В настоящее время в Российской Федерации наиболее широкое применение для создания топографических карт масштабов 1:10 000 – 1:1 000 000 и планов масштабов 1:500 – 1:5 000, а также для обработки геодезических измерений, получила **равноугольная проекция Гаусса-Крюгера** [6,7]. Вообще говоря, и в других странах, как правило, для этих целей применяется та же проекция или система плоских координат, что обеспечивает удобство совместного применения топографических карт, каталогов координат геодезических пунктов и результатов геодезических измерений при геодезическом обеспечении проектирования, строительства и эксплуатации самых различных объектов [7].

Следовательно, топографические карты и планы также имеют искажения и переменный масштаб. Однако эти искажения при измерениях на картах и планах можно считать незначительными, и поэтому считается, что масштаб любой топографической карты и плана для всех ее участков является практически постоянным.

Еще раз подчеркнем, что, благодаря принятой в России единой геодезической проекции, все наши топографические карты и планы связаны с единой системой плоских прямоугольных координат, в которой определяется и положение геодезических пунктов, а это позволяет получать координаты точек в одной и той же систе- ➤➤➤

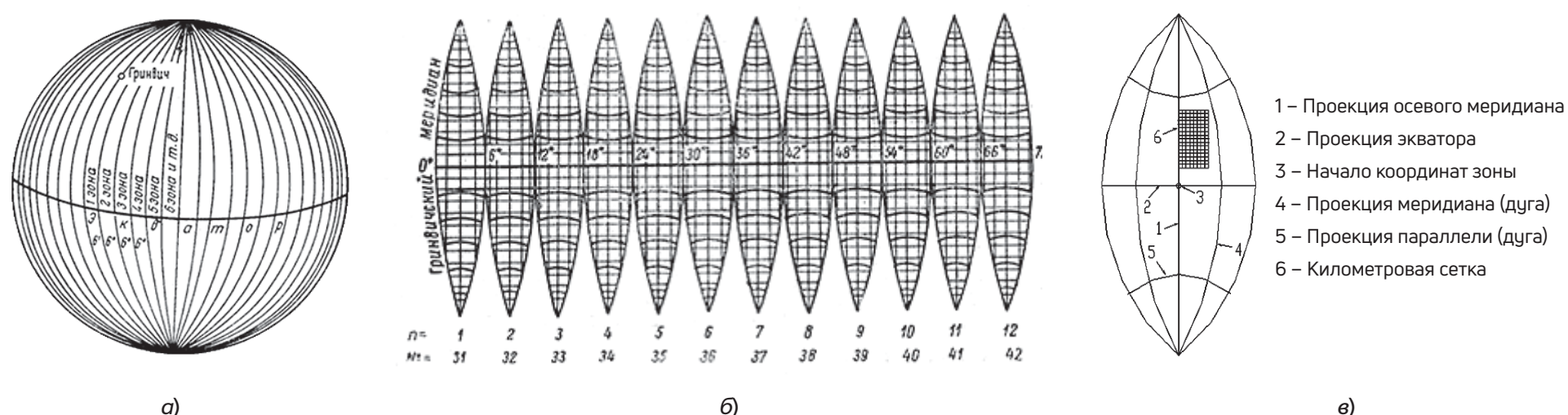


Рисунок 2. Деление поверхности земного эллипсоида на шестиградусные зоны

ме как по карте, так и при выполнении геодезических измерений на местности.

Геометрическую сущность равноугольной проекции Гаусса-Крюгера, применяемой при создании российских топографических карт, можно представить, вообразив цилиндр, который касается осевого меридиана одной из зон земного эллипсоида, расположенного поперек цилиндра (рисунок 1). Цилиндр используется потому, что форма его боковой поверхности приближена на линии касания к форме Земли и в то же время может быть развернута в плоскость без искажений. Отсюда и происходит полное название проекции Гаусса-Крюгера: **равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция**.

Весь земной эллипсоид (в России для проецирования на плоскость преимущественно применяется референц-эллипсоид Красовского) делят на зоны и для каждой зоны в отдельности составляют карты. При этом устанавливают такие размеры зон, чтобы можно было каждую из них развернуть в плоскость, то есть изобразить на плоскости (карте или плане), практически без заметных искажений. Для получения картографической сетки и составления по ней карты в проекции Гаусса-Крюгера поверхность земного эллипсоида разбивают по меридианам, начиная с Гринвичского меридиана, на 60 зон по 6° каждая (рисунок 2).

Зона проецируется по математическим законам на боковую поверхность цилиндра так, чтобы при этом сохранилось свойство равноугольности изображения (равенство всех углов на поверхности цилиндра их величине на эллипсоиде). Затем, поворачивая земной эллипсоид вокруг малой оси, последовательно проецируются на боковую поверхность цилиндра все остальные зоны, одна рядом с другой (рисунок 2а). Далее, разрезав цилиндр по образующей и развернув его боковую поверхность в плоскость, получим изображение земной поверхности на плоскости в виде совокупности отдельных зон (рисунок 2б).

Осевой меридиан и экватор каждой зоны изображаются прямыми линиями, перпендикулярными друг к другу. Все осевые меридианы зон изображаются без искажения длин и сохраняют масштаб на всем своем протяжении. Остальные меридианы в каждой зоне изображаются в проекции кривыми линиями, поэтому они длиннее осевого меридиана, то есть искажены. Все

параллели также изображаются кривыми линиями с некоторым искажением (рисунок 2в). Искажения длин линий увеличиваются по мере удаления от осевого меридиана на восток или запад и на краях зоны становятся наибольшими, достигая величины порядка 1/1000 длины линии, измеряемой по карте. Например, если вдоль осевого меридиана, где нет искажений, масштаб равен 500 м в 1 см, то на краю зоны он будет равен 499,5 м в 1 см.

Меридианы и параллели изображаются кривыми, симметричными относительно осевого меридиана зоны и экватора. Осевые меридианы шестиградусных зон совпадают с центральными меридианами листов карты масштаба 1:1 000 000. Порядковый номер зоны (n) отсчитывается к востоку от меридиана с долготой 0° (Гринвичский меридиан).

Долготы осевых меридианов шестиградусных зон определяются по формуле: $Ln = 6n - 3$, где n – номер зоны.

Прямоугольные координаты x и y в пределах зоны вычисляются относительно экватора и осевого меридиана, которые изображаются прямыми линиями.

В пределах территории бывшего СССР абсциссы координат проекции Гаусса-Крюгера (x) положительные; ординаты (y) положительные к востоку, отрицательные к западу от осевого меридиана. Чтобы избежать отрицательных значений ординат, точкам осевого меридиана условно придают значение $y = 500\,000$ м с обязательным указанием впереди условного значения абсциссы любой точки зоны номера соответствующей зоны (n) [6,7].

В странах западного полушария для составления топографических карт применяют универсальную поперечно-цилиндрическую проекцию Меркатора UTM (*Universal Transverse Mercator*) в шестиградусных зонах. Проекция Гаусса-Крюгера и UTM – это разновидности поперечно-цилиндрической проекции. Проекция UTM близка по своим свойствам и распределению искажений к проекции Гаусса-Крюгера [6,7].

В отличие от проекции Гаусса-Крюгера, UTM – это проекция на секущий, а не на касательный, цилиндр (рисунок 3а). При этом на осевом меридиане зоны реализуется масштабный коэффициент, равный 0,9996. В этой проекции коэффициент масштаба, равный единице, находится не на линии центрального меридиана, а на некотором расстоянии (около 180 км) по обе стороны от него, благодаря чему максимальное искажение в пределах шестиградусной зоны не превышает 0,1% (рисунок 3б). >>>

Проекции отличаются также нумерацией зон. Центральный меридиан первой зоны UTM имеет долготу 177° з.д. Таким образом, например, 7-я зона в проекции Гаусса-Крюгера соответствует 37-й зоне UTM.

Отличается и порядок записи координат: в проекции Гаусса-Крюгера ось абсцисс направлена на север, а в UTM ось абсцисс направлена на восток, а ось ординат – на север. Во избежание отрицательных значений координат, к значению абсциссы прибавляются 500 000 м, а к значению ординаты в южном полушарии – 10 000 000 м.

К геодезическим проекциям относится и **равноугольная коническая проекция Ламберта**.

Коническая проекция Ламберта, обычно основана на двух стандартных параллелях, что делает ее секущей проекцией. Стандартными параллелями называются параллели касания или сечения, образующиеся в результате касания или сечения поверхности эллипсоида заданной поверхностью (рисунок 4) [8].

Все линии координатной сетки пересекаются под углом 90° . Коническая проекция Ламберта – это равноугольная проекция, поэтому направления, углы и формы сохраняются в бесконечно малом масштабе. Расстояния являются точными вдоль стандартных параллелей. Искажения масштаба, площади и расстояний постепенно возрастают по мере удаления от стандартных параллелей, но одинаковы вдоль любой заданной параллели и симметричны относительно центрального меридиана.

Наилучшие результаты применения равноугольной конической проекции Ламберта получаются при её использовании для регионов (объектов), вытянутых в направлении с востока на запад, расположенных в средних северных или южных широтах. При этом, общий диапазон широт не должен превышать 35° .

Как правило, стандартные параллели проходят на расстоянии одной шестой части широтного диапазона ниже верхней и выше нижней части картируемой области.

На рисунке 5 приведен пример равноугольной конической проекции Ламберта со стандартными параллелями на северном полушарии (слева) и южном полушарии (справа). ■

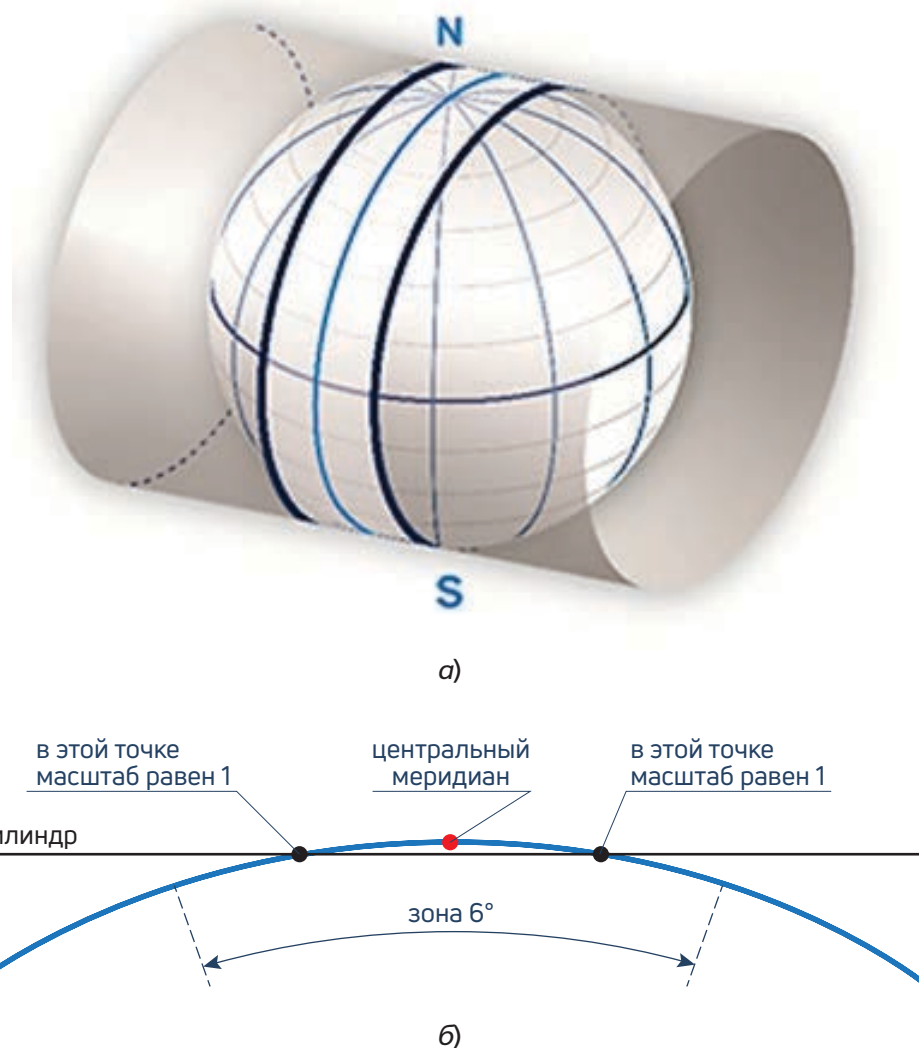


Рисунок 3. Универсальная поперечно-цилиндрическая проекция Меркатора

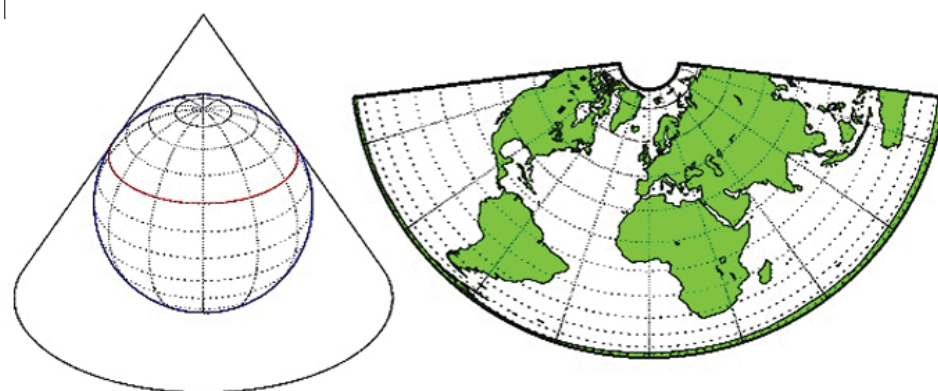


Рисунок 4. Равноугольная коническая проекция Ламберта

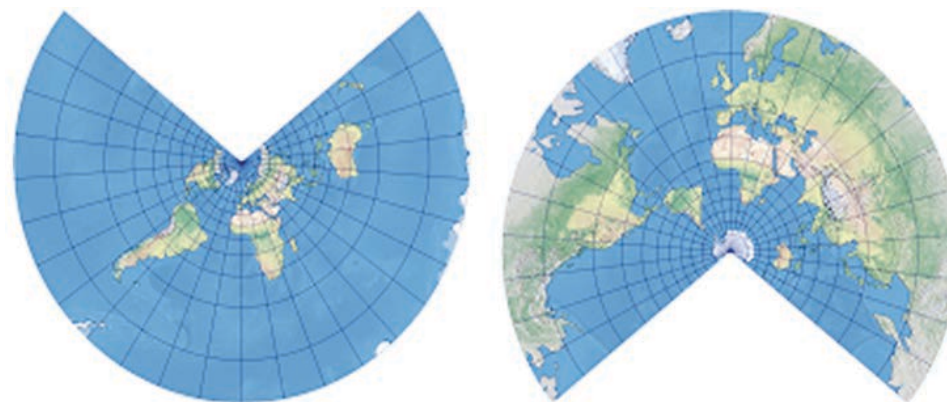


Рисунок 5. Равноугольная коническая проекция полушарий Ламберта

Список литературы

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации 19 марта 2019 г. № 466-р.
2. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года («Белая книга»), утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769р.
3. Стратегия цифровой трансформации ОАО «РЖД» до 2025 года (приложение № 4 к протоколу заседания совета директоров ОАО «РЖД» от 25 октября 2019 г. № 5).
4. Концепция внедрения геоинформационных технологий, в том числе высокоточных методов координатно-временного обеспечения, в производственные процессы строительства, эксплуатации, ремонта и диагностики инфраструктуры, организации движения, управления тяговыми ресурсами. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №2976/р 30 декабря 2020 г.
5. С.В.Духин, А.В.Нуйкин, А.О.Куприянов, Е.С.Бекчанова. Разработка высокоточной координатной системы высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург – Буловская. //Известия высших учебных заведений, раздел Геодезия и аэрофотосъемка, №2, М.: 2013.
6. Л.А.Вахрамеева, Л.М.Бугаевский, З.Л.Казакова. Математическая картография: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1986. – 286 с.
7. Б.Б.Серапинас. Математическая картография. Учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
8. О.А.Лебедева. Картографические проекции: Методическое пособие, Новосибирский учебно-методический центр по ГИС и ДЗ, Новосибирск, 2000. – 35 с.