

НИИ ПИиМГ БФУ имени И.Канта  
ООО БалтСибГео

# **Выборочно о системах координат Земли**

*Алсынбаев Камиль Салихович,*

*г. Калининград, 2020-2025*

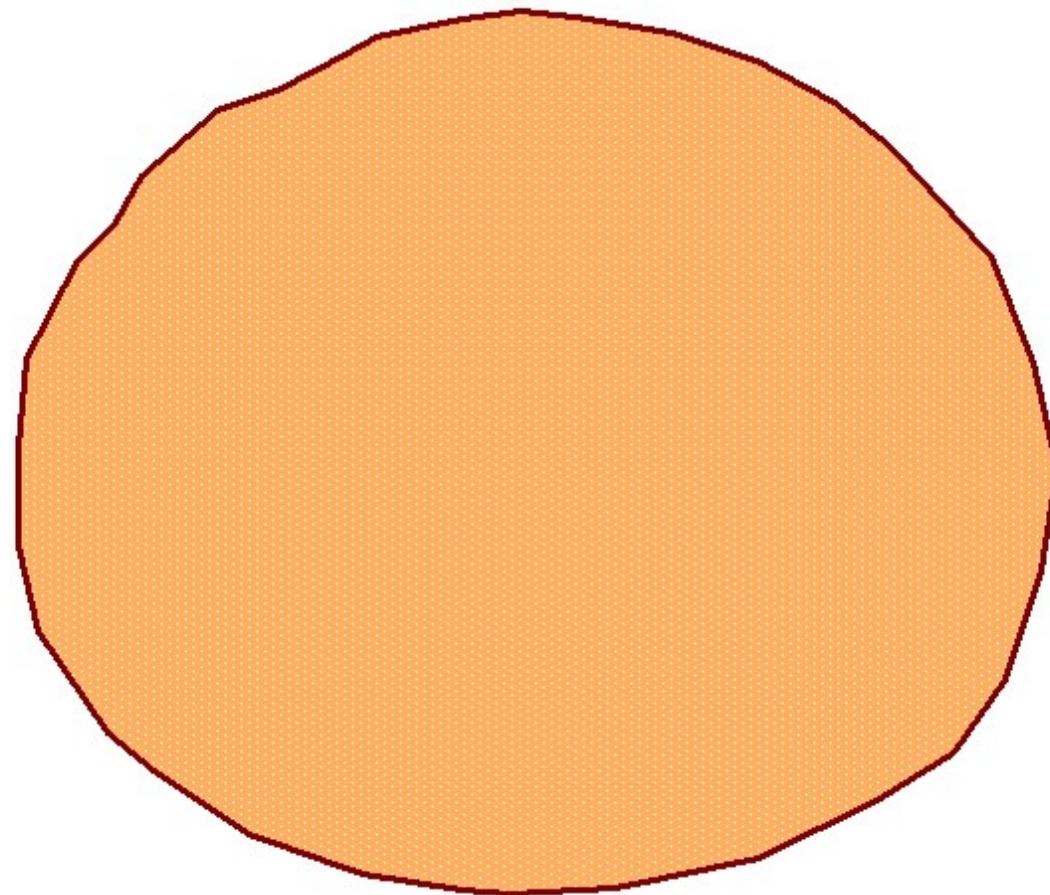
# Термины и понятия

- Форма Земли и её приближения: геоид, квазигеоид, сфера, эллипсоид вращения, сфEROид.
- Эллипсоиды: WGS-84, Красовского, Бесселя, Эверест, ПЗ-90 (Параметры Земли 1990), ПЗ-90.02, ПЗ-90.11
- Географические системы координат: геоцентрическая и геодезическая.
- Картографическая проекция.
- Конформные проекции УTM и Гаусса-Крюгера, зоны.
- Системы координат (СК): Пулково-42, СК-42, (система координат 1942 г.), СК-63, СК-95 (система координат 1995 г.), МСК-\*\*\*, ГСК-2011.
- ITRF-2008 по решениям IERS (Международной службы вращения Земли)

# О форме Земли. Приближение формы Земли

- Для создания системы координат нужна математика, чтобы определиться, какую математическую форму имеет Земля.
- Строго говоря, Земля имеет форму Земли, нет математической формулы, эту форму описывающей ! 😊
- Форма Земли – Геоид – эта форма (эквипотенциальной) поверхности поля тяжести Земли, соответствующая по значению среднему значению уровня мирового океана в идеальных условиях.
- Поле тяжести Земли – совокупность гравитационного поля Земли и центробежной силы вращения Земли (не путать просто с гравитационным полем).

# Геоид

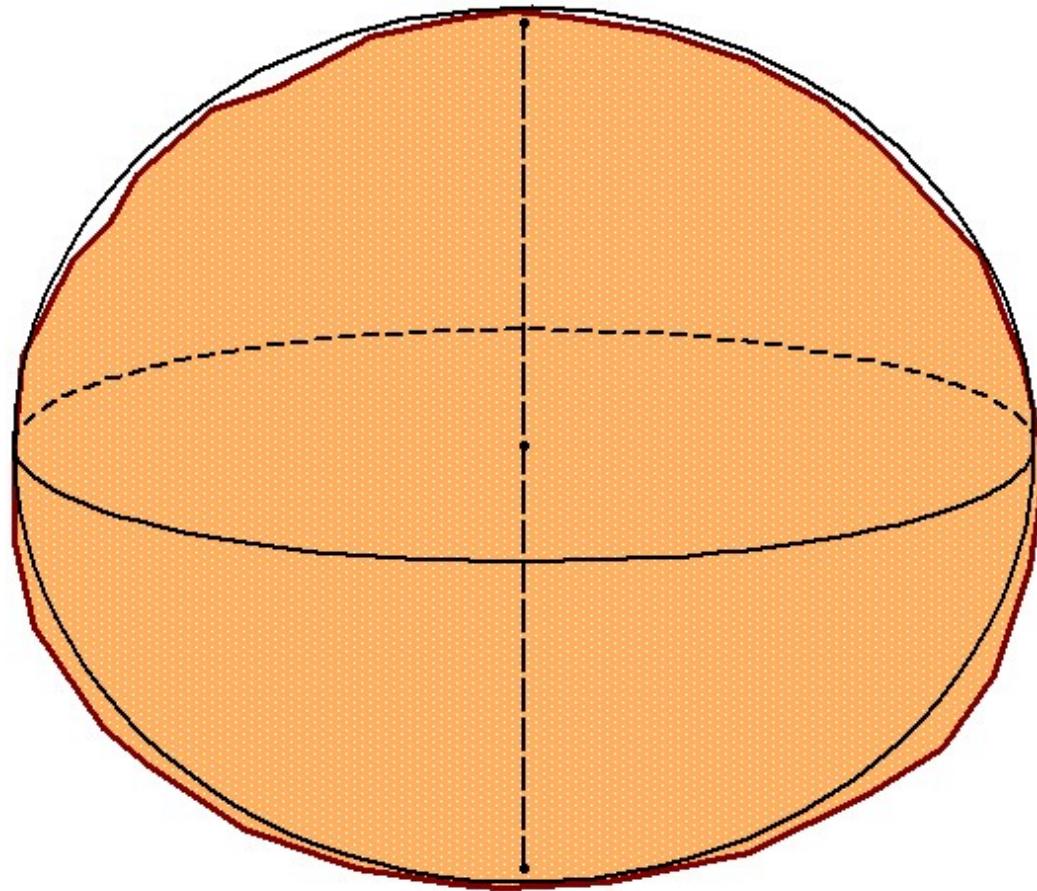


Это форма, которую приняла бы жидкая планета Земля, вращающаяся вокруг своей оси в идеальных условиях

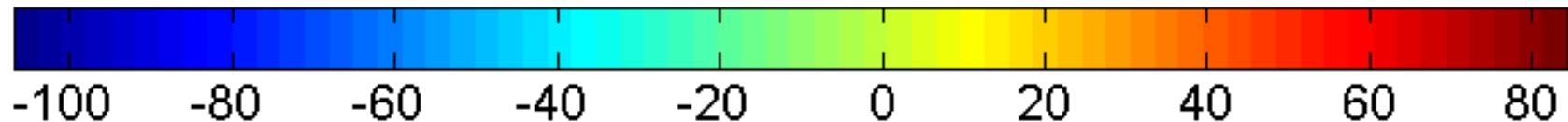
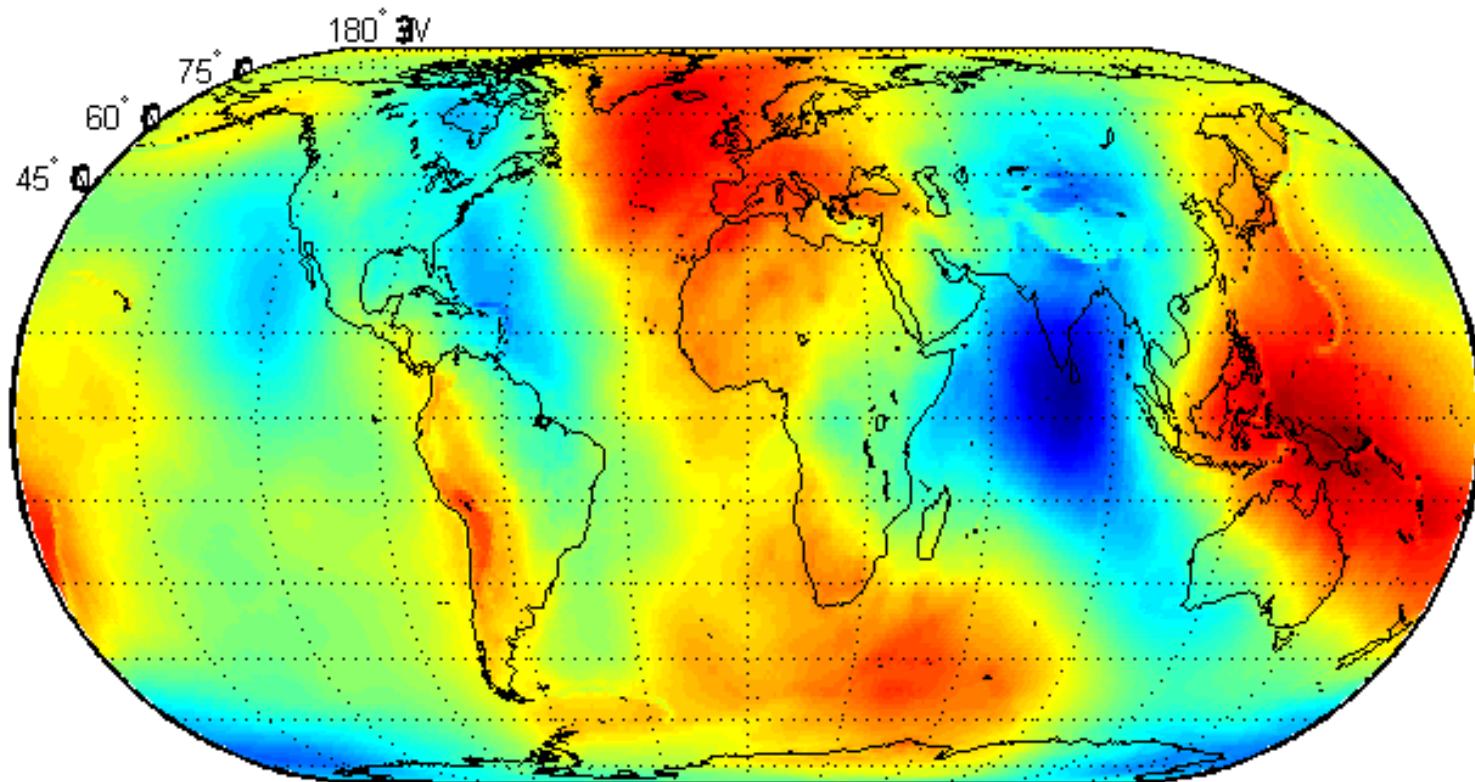
# Приближение формы Земли

- Есть почти математически определяемая форма – квазигеоид. В докомпьютерную эпоху – очень трудоёмкие вычисления.
- Чтобы иметь практически применимую математическую основу систем координат и их расчета, геоид приближают эллипсоидом вращения (сфера не устраивает для точных построений уже с 18-19 века). Эллипс вращается вокруг малой полуоси, малую полуось пытаются совместить с осью вращения Земли (точнее, с **международным условным началом**), центр эллипсоида – с центром масс Земли. Но это уводит от геоида.
- Каждая страна исторически искала для своей территории наилучший эллипсоид. Поэтому их множество. Термины: референц – эллипсоид, методы привязки оси и центра – датум .
- Почему существуют референц-эллипсоиды? Субъективно – исторически, объективно – для наилучшего приближения геоида.

# Приближение геоида эллипсоидом вращения



# Отличие геоида и WGS-84



Волнистость геоида (отклонение в метрах от параметров модели EGM96).

# Приближение формы Земли эллипсоидами и референц-эллипсоидами

- В СССР в 1946 г - принят эллипсоид Красовского. Он является референц-эллипсоидом (Пулково-42).
- Эллипсоид **Бесселя**. (Фридрих Вильгельм Бессель). Использовался царской России и СССР до 1946 г. (СК-23, СК-35), до сих пор используется в МСК Москвы.
- Референц-эллипсоид «Эверест» - для Индии и Непала (1956)
- **WGS84** (*World Geodetic System*). Усреднённый для Земли. Важен для GPS.
- В СССР и России разработана ПЗ-90 - параметры Земли 1990 года — для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полётов и решения навигационных задач (ГЛОНАСС и ДР.). Датум уточняется каждые 10 лет. Сейчас действует версия ПЗ-90.11.
- International Terrestrial Reference Frame (ITRF)  
«Международная земная система отсчета»)

# Эллипсоид Красовского

- Малая полуось (полярный радиус) 6 356 863 м
- Большая полуось (экваториальный радиус) 6 378 245 м
- Средний радиус Земли, принимаемой за шар 6 371 100 м
- Сжатие (flattening, отношение разницы полуосей к большой полуоси) — 1/298,3
- Длина меридиана 19 980 км Длина экватора 40 075,7 км
- Длина дуги  $1^\circ$  по меридиану = 110,6 - 111,7 км
- Длина дуги  $1^\circ$  по широте на широте  $0^\circ$  = 111,3 км
- Длина дуги  $1^\circ$  по широте на широте  $55^\circ$  = 63,8 км

# WGS-84

- $a = 6378137$  м
- $b = 6356752.314\ 245$  м
- Сжатие =  $1/298,257$
- WGS 84 определяет координаты относительно центра масс Земли, ошибка составляет менее 2 см.

# Географические системы координат

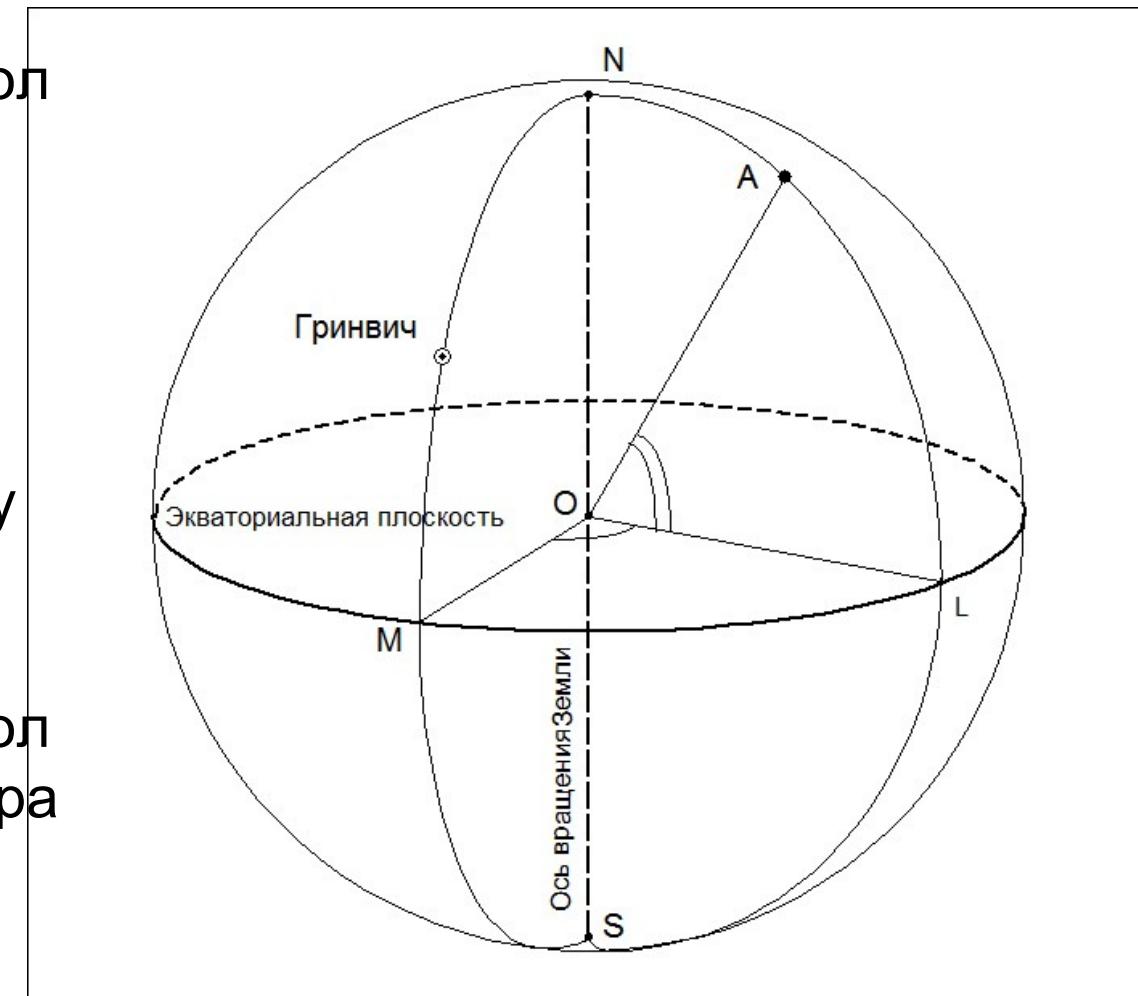
- В географической системе координат точка определяется широтой и долготой, измеряемых в градусах, третья координата – высота над уровнем моря.
- Различают геоцентрическую и геодезическую СК.
- Долгота точки А в этих системах определяется одинаково: «Угол между плоскостью, проходящей через ось сфEROида Гринвический меридиан и через точку А.

# Прямоугольная система координат



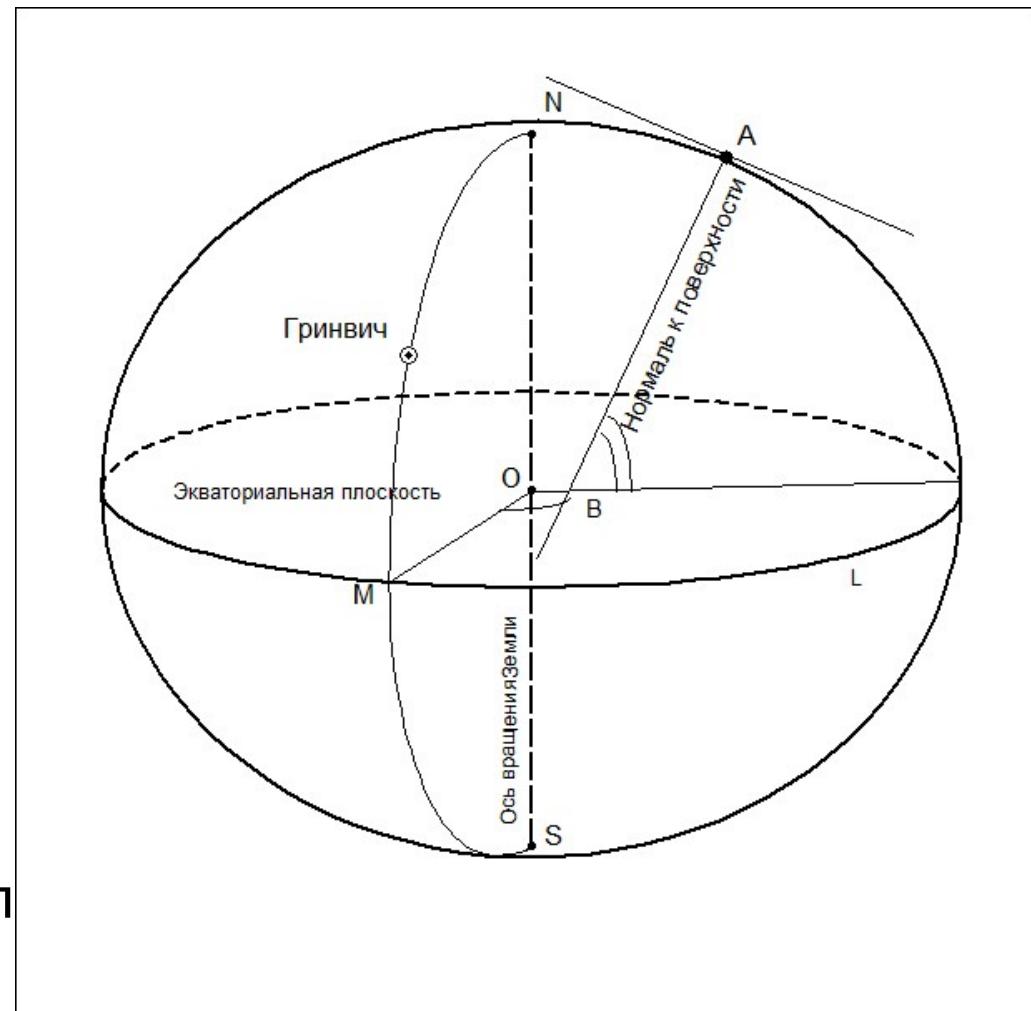
# Геоцентрическая система координат

- Долгота точки А в геоцентрической СК: «Угол между плоскостью, проходящей через ось вращения сфEROИда и Гринвич, и плоскостью, проходящей через ось вращения сфEROИда точку А». Угол AOL.
- Широта точки А в геоцентрической СК: «Угол между плоскостью экватора и радиус вектором от центра сфEROИда к точке А». Угол MOL.



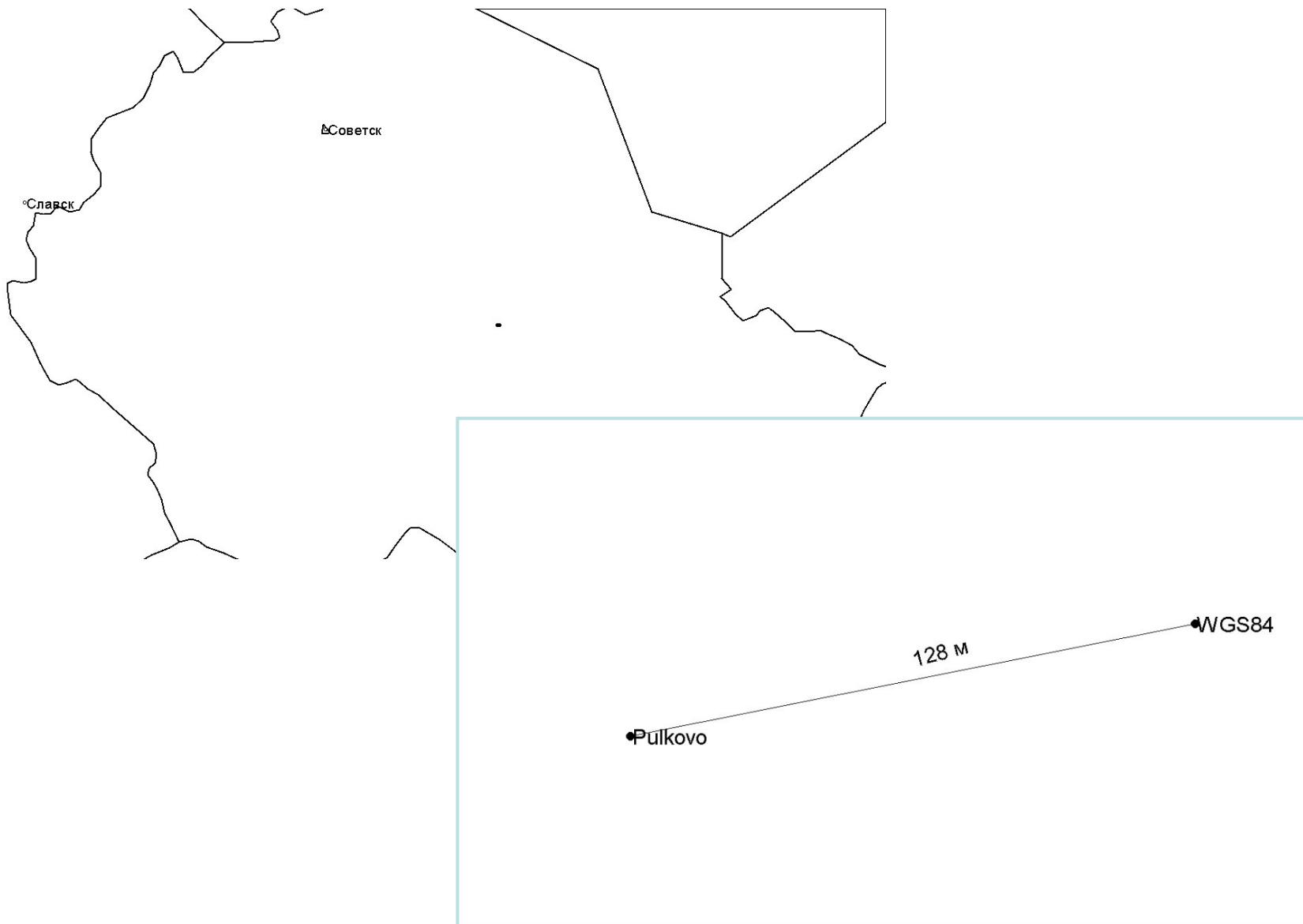
# Геодезическая система координат (Земля – эллипсоид)

- Долгота точки А в геодезической СК: «Угол между плоскостью, проходящей через ось вращения эллипсоида и Гринвич, и плоскостью, проходящей через ось вращения сфера-оида точку А». Угол MOL.
- Широта точки А в геодезической СК: «Угол между плоскостью экватора и нормалью к точке А». Угол ABL.

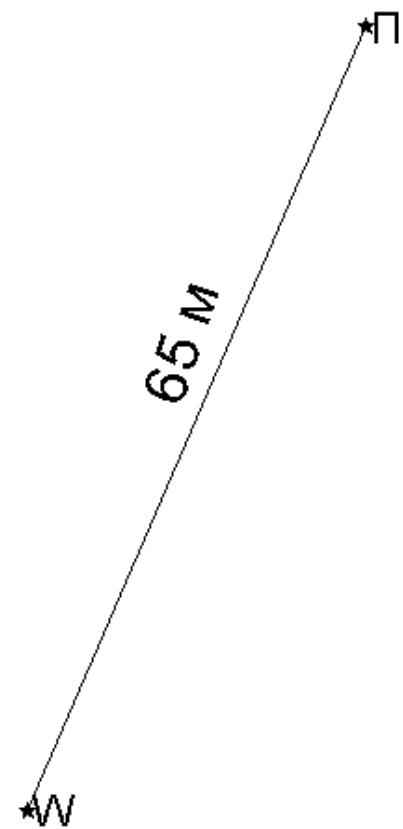


Долготы имеют значения от 0 до 180 на запад и на восток от Гринвича, в ГИС – от -180 до +180, широты – от 0 до 90 на север и на юг от экватора, в ГИС от -90 до +90

# Точки с координатами $(22^\circ$ в.д., $55^\circ$ с.ш.) в Пулково-42 и WGS-84 (128 м)



Чаянда, точка (111 в.д., 65 с.ш.)



# Картографические проекции

- Картографическая проекция – определенный математический закон отображения одной поверхности (сфера или сфериоид) на другую (плоскость бумаги или экрана), при следующих условиях:
  - точки, взятые на одной поверхности, соответствуют точкам на другой поверхности и наоборот;
  - непрерывному перемещению точки на одной поверхности соответствует перемещение на второй поверхности.

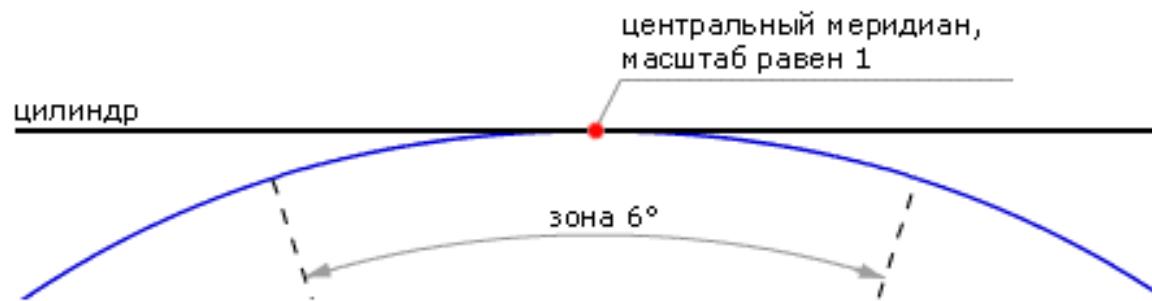
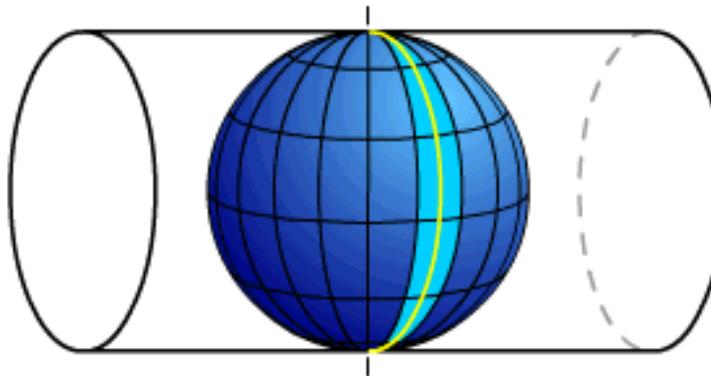
# Особенности картографических проекций

- Проекции искажают поверхность эллипсоида (нет проекций, сохраняющих отношения и длин, и площадей, и углы).
- Некоторые проекции сохраняют углы (равноугольные), некоторые – соотношение площадей (равноплощадные), некоторые – расстояний , но не одновременно!.
- Есть проекции, сохраняющие подобия для бесконечно малых (конформные проекции).
- В подавляющем большинстве используют в проекции прямоугольные системы координат (метры, футы, километры).

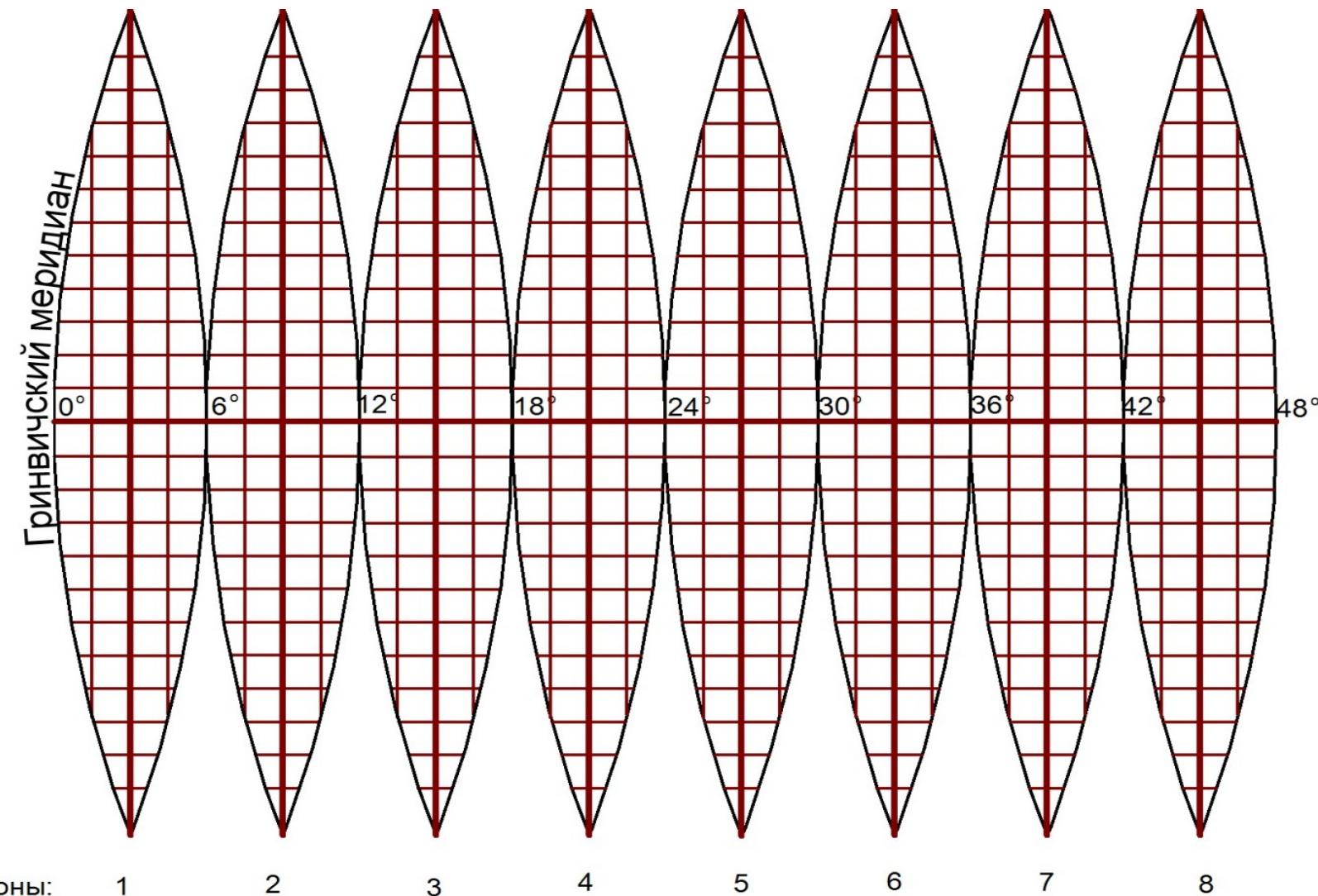
# Некоторые сведения о конформных проекциях Гаусса-Крюгера и UTM

- Проекции UTM (*Universal Transverse Mercator*) и Гаусса-Крюгера (1820 – 1910) – разбиение поверхности земного эллипсоида на «апельсиновые дольки».
- Каждая долька проецируются на поверхность цилиндра, цилиндр расправляется в плоскость (приближенное объяснение!). На самом деле формула. При этом используются линии сечения или касания нулевых искажений (рисунок).
- Формула обеспечивает подобие бесконечно малых фигур.
- Проекция Гаусса-Крюгера – частный случай проекции UTM.
- Это определяется характером размещения линий нулевых искажений – сечений или касаний цилиндра.
- При слиянии вертикальных линий UTM – проекция Г-К.
- Параметризация – фактор масштаба центрального меридиана
- Искажения длин в ГК – на краях до 1/750 (у экватора), искажения UTM – не более 1/10000.

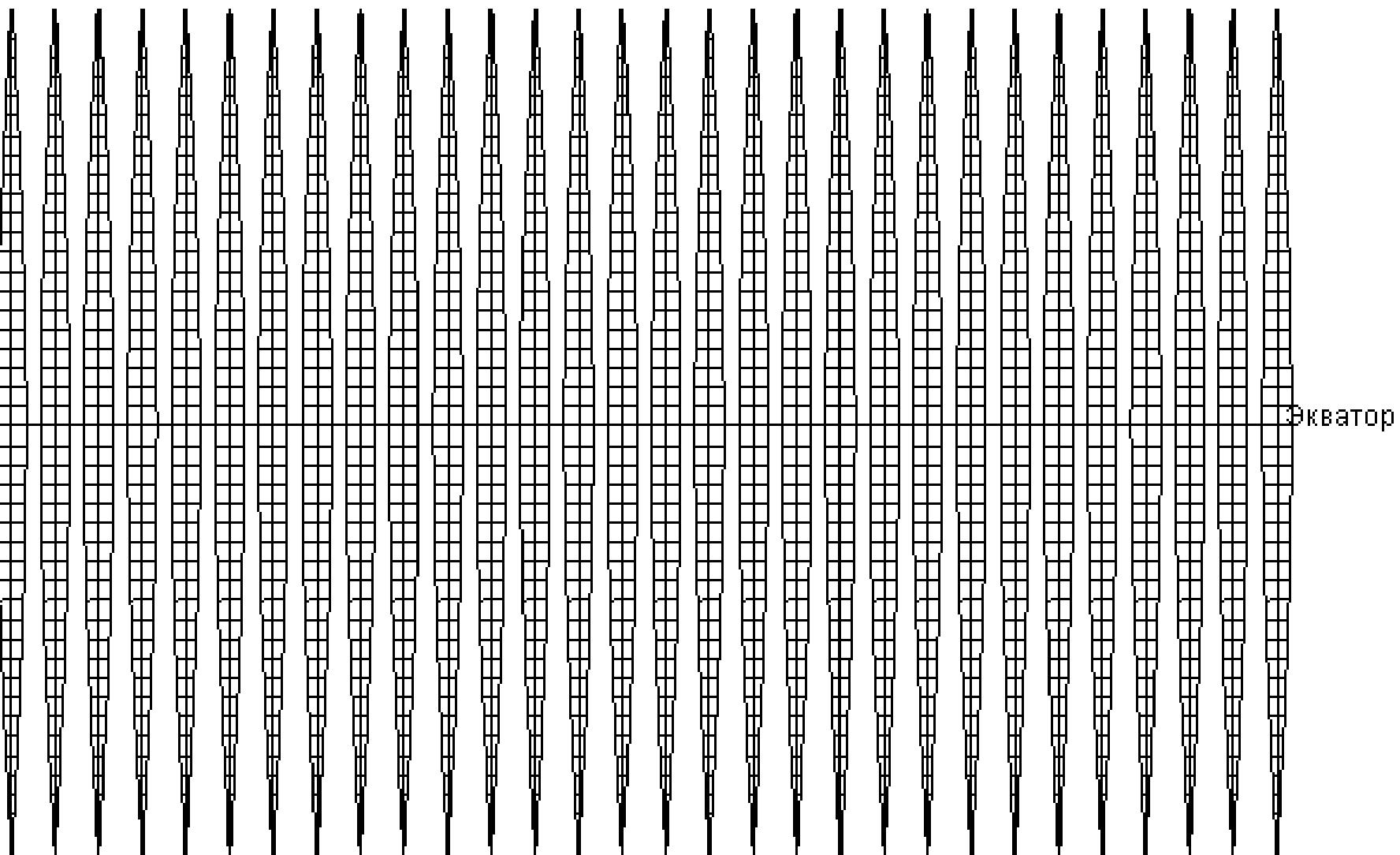
# Интерпретация Гаусса-Крюгера и UTM



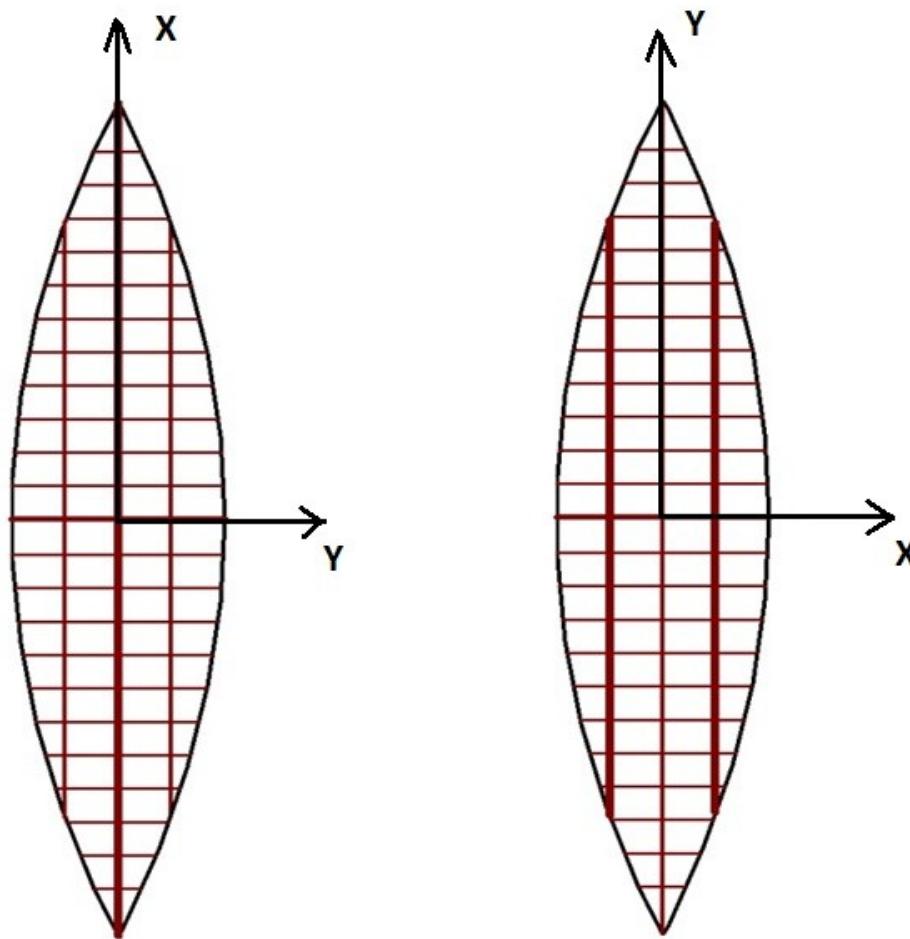
# Развертка первых 8 зон проекции Гаусса-Крюгера



# Реальные пропорции зон Гаусса-Крюгера



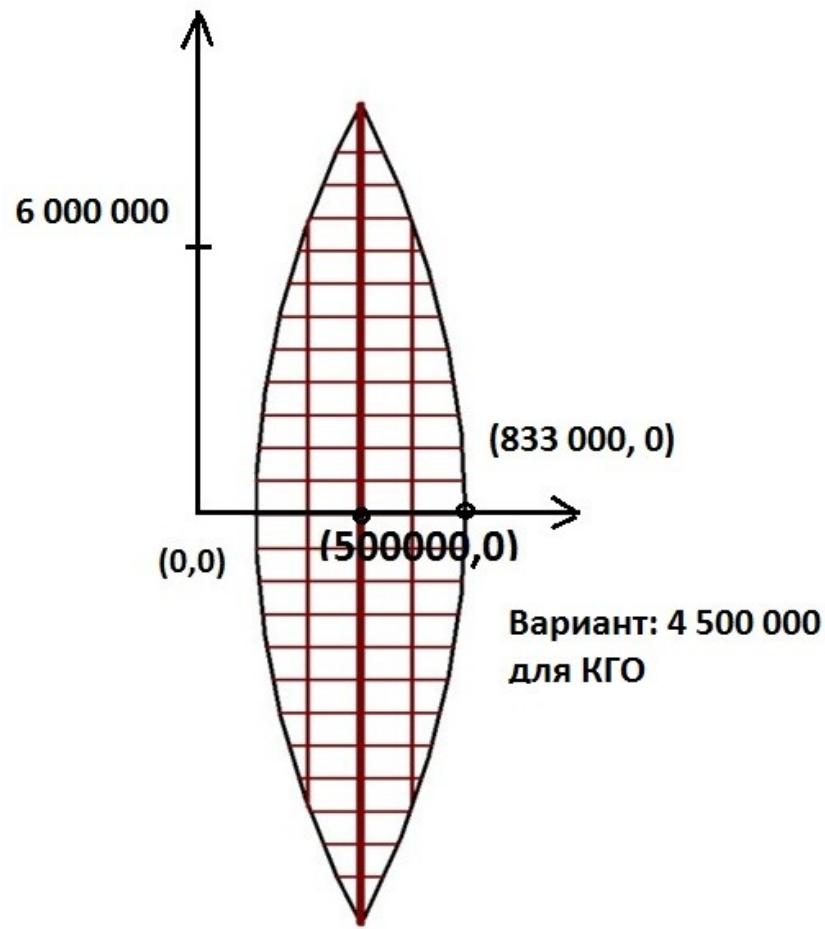
Развертки одного шестиградусного двухугольника Гаусса-Крюгера (слева) и для UTM (справа) с линиями касания цилиндра.



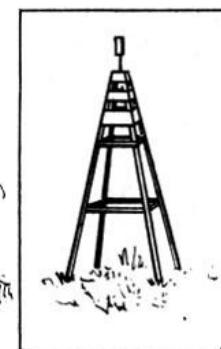
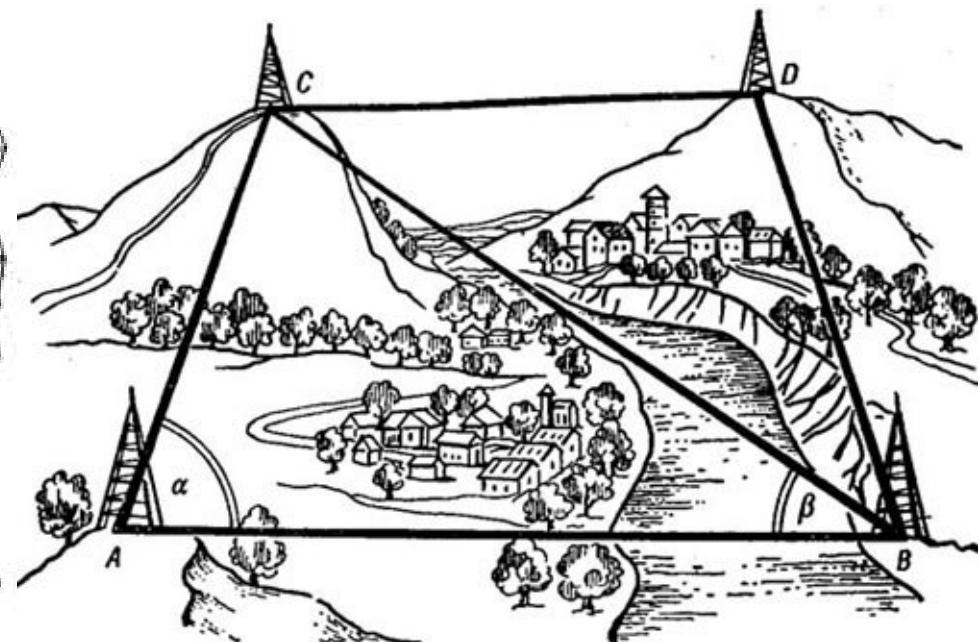
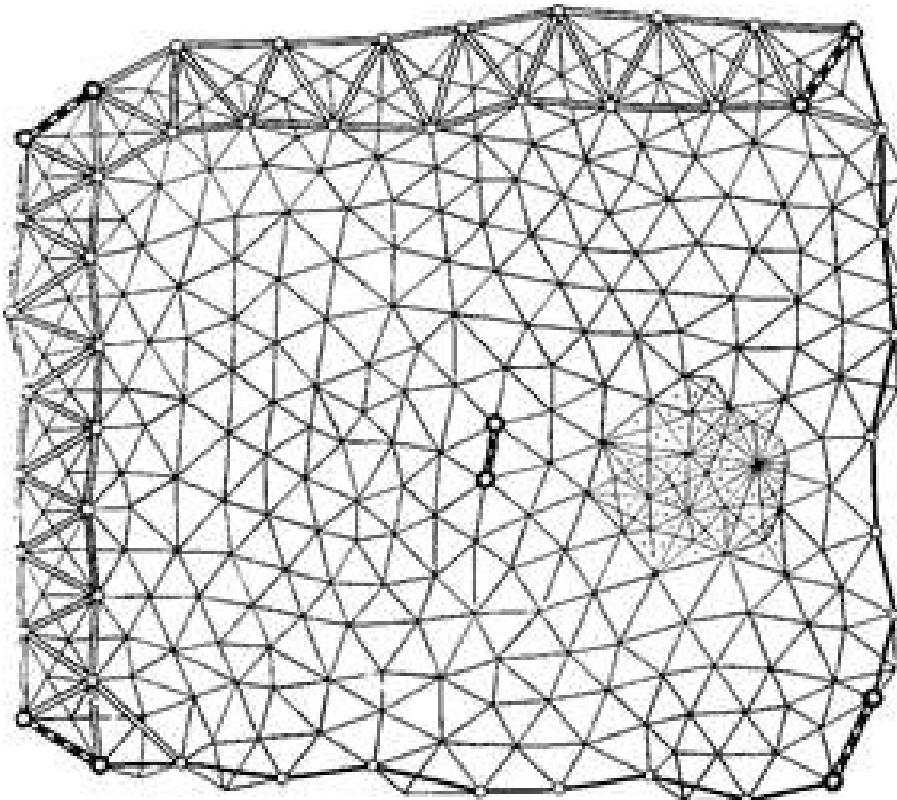
# Некоторые сведения о координатных системах картографических проекций

- Для каждой проекции выбирается начало координат. Бывает каноническое (стандартное), и параметризуемое.
- Направление осей обычно определяется правилом проекции. У геодезистов для ГК направлением X считается направление на север, направлением Y – направление на восток. В UTM – направление X – горизонтальное, Y – вертикальное. Практически для всех компьютерных систем направление X – горизонтально, Y – вертикально и для UTM, и для ГК.
- Начало прямоугольной СК в обеих проекциях смещается влево – на 500000 м.
- В ГК есть вариант добавления для каждой зоны её номера в старшие разряды, то есть прибавление к канонической координате  $N*1000000+500000$ .
- Нумерация зон в ГК идет от Гринвича (нулевого меридиана), в UTM – от 180 (меридиана сменяемости дат). Разница в 30.

# Сдвиги начала координат в ГК.



# Государственная геодезическая сеть



# Государственная геодезическая сеть, тригопunkты. Некоторые сведения.

- Сети бывают 1-го, 2-го, 3-го и 4-го классов. Главное для нас в сети – пункты триангуляции (тригопunkты).
- Сторона треугольников (4-х угольников) примерно 25 км.
- Для каждого тригопunkта хранится информация о всех трех координатах. К тригопunktам привязывают координаты объектов любого строительства, в.т.ч. скважины, теодолитными ходами или иными геодезическими приборами.
- Высоты считаются в Балтийской системе (нормальных) высот, за нуль принят средние многолетние значения Балтийского моря в расположении Кронштадского футштока.
- Сеть в основном была создана в 50-70-е годы в СССР на основе эллипсоида Красовского. **СК-42 = эллипсоид Красовского + ГГС + проекция Гаусса-Крюгера.**
- Ошибки в значениях для окраинных и северных территорий могут достигать десятков метров.

# Решения и изменения последних лет

- В конце 80-х была предпринята попытка значительно улучшить точность вычисления параметров тригонопунктов, уточнен датум эллипсоида Красовского. Как результат – СК-95.
- В России приняты постановления Правительства и стандарты ГОСТ Р- 51794-2008, ГОСТ 32453-2013, ГОСТ 32453-2017 с учетом **WGS-84** и **ITRF**.
- Есть служба **IERS** (International Earth Rotation and Reference Systems Service - Международная служба вращения Земли, базируется в Париже), ответственна за стандарты времени, систем координат.
- **ITRF** - (International Terrestrial Reference System, Международная земная система координат), ITRF2000, ITRF2008, ITRF2014.

# Решения и изменения последних лет

- Термины учитывают изменяемость земных параметров, которые вычисляются и задаются IERS:
- Начало координат в центре масс Земли
- Z направлена у условному земному полюсу (международному условному началу);
- X – лежит в плоскости начального астрономического меридиана
- Разработаны ПЗ-90, ПЗ-90.02, ПЗ-90.11, СК ГСК-2011.
- **ГСК-2011** предполагает совместимость международными системами и спутниковыми, действует с 2017 г.
- Применение «устаревших» систем СК-42 и СК-95 - будет разрешено до 1 января 2021. ГСК-2011 - должна заменить СК-95 и СК-42.

# Некоторые другие конформные проекции и СК в России

- СК-63. Проекция СК-42 (?) поворачивалась на секретный угол вокруг секретной точки (поблочно). Ключи хранятся в Отделах геодезии и картографии Управления Федеральной службы государственной регистрации. Секретно до сих пор.
- Местные системы координат. Строго говоря, ГОСТ Р 51794-2008 предполагает возможность любой проекции, повороты и др.. Практически – в основном созданы для эллипсоида Красовского путем установки центрального меридиана в секретной позиции и сдвига начала координат на неизвестные значения. Секрет Полишинеля, значения есть в Интернет. Созданы для каждого СФ, от одной до нескольких в зависимости от протяженности СФ по долготе. Для КГО: МСК-39 (2 варианта). Для Якутии; МСК-14. 9 штук, начиная с 108.45 в качестве центрального меридиана Для Москвы в МСК используется эллипсоид Бесселя!
- Есть совершенно какие-то непонятные СК, мне встречались, не могу отнести ни к СК-42, ни к СК-63, ни к местным.

# Как производятся преобразования координат

- Обычно преобразуются двумерные координаты.  
Преобразования высот – более сложная и редко встречающаяся задача.
- В геоинформационных системах преобразования стандартных СК – встроенные функции.
- Если необходимо преобразовать из/в местную СК, нужно сначала в геоинформационной системе построить проекцию для необходимой местности, используя «секретные» данные из Интернет.
- **МСК-39 Калининградская область**

"МСК-39 зона 1", 8, 1001, 7, 21.45, 0, 1, 1250000, -5711057.628

**МСК-39 Калининградская область ГОСТ 51794-2008**  
"МСК-39 зона 1", 8, 9999, 3, 23.57, -140.95, -79.8, 0, -0.35, -0.79, -0.22, 0, 7, 21.45, 0, 1, 1250000, -5711057.628

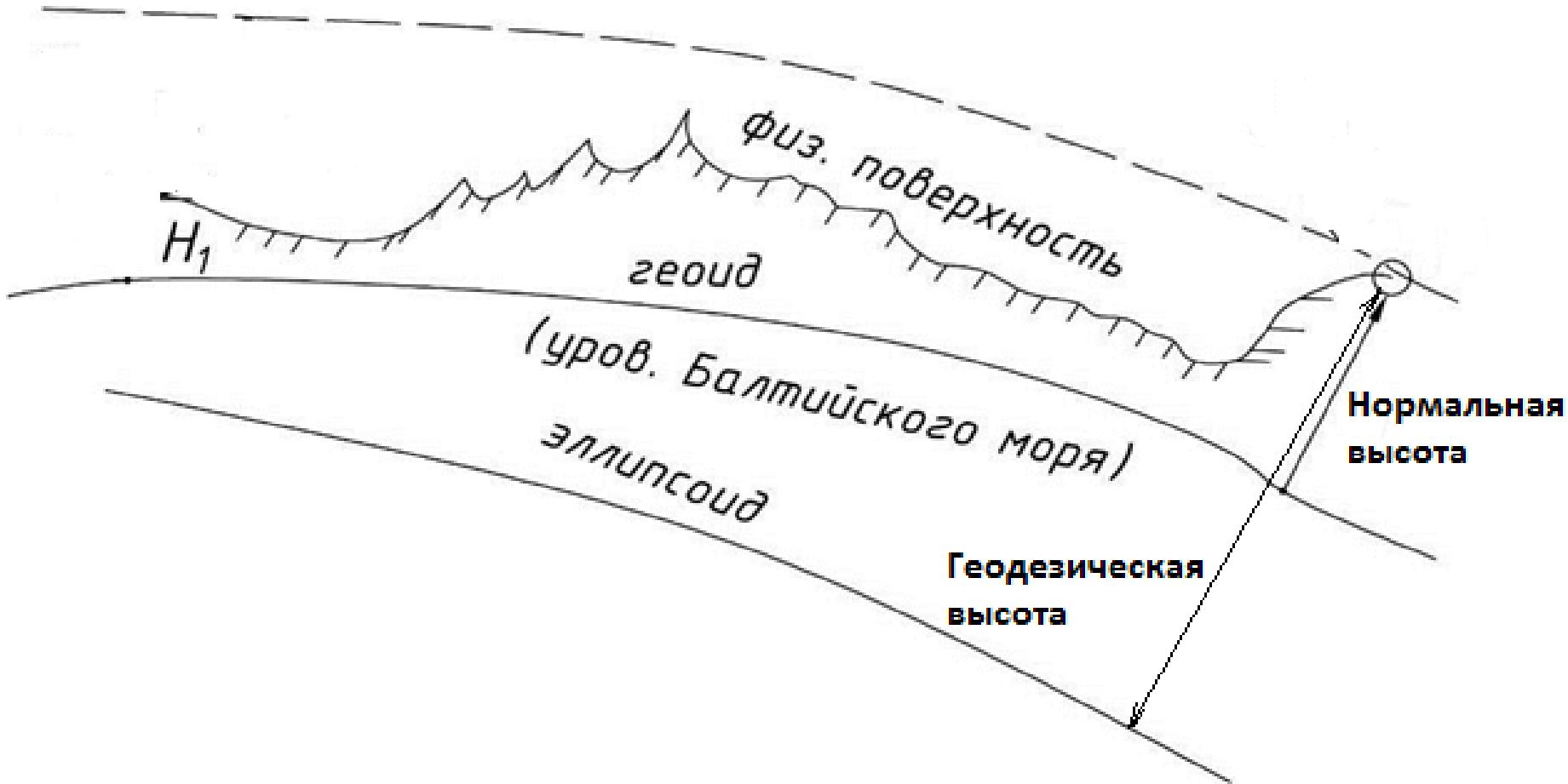
# Как производятся преобразования координат, продолжение

- Есть геокалькуляторы в сети для преобразований стандартных координатных систем (например из WGS-84 в UTM: geo2utm.exe). <https://www.latlong.ru/sk.php> доверия у меня не вызывает. Для точки (21,55) преобразование из Пулково-42 в WGS-84 по сравнению с MapInfo разница в 47 м. <https://geometer3d.ru/geocalc.html> - вроде было правильно, но список СК – с которыми работал GepMetr3D.
- Если СК неизвестной природы, преобразование можно построить, если есть минимум 4 точки, для которых известны координаты в неизвестной СК, и в какой-либо стандартной. Либо в ArcGIS, или программно с применением проективных преобразований.
- Рекомендуемые: **Кредо Диалог ТРАНСФОРМ, PHOTOMOD, GeoCalculator.**
- С высотами – нужно выяснить, что за высота дана. Может быть геодезическая (над эллипсоидом), нормальная (над квазигеодом), от местного футштока и прочее. Потом искать ключи для этой СК.

# Немного о высотах

- Геодезическая высота. Расстояние по нормали от поверхности от заданной точки до поверхности эллипсоида.
- Нормальная высота. Расстояние по отвесу от заданной точки до поверхности квазигеоида. В ГОСТе 32453—2017 «нормальная высота: Измеренная разность геопотенциала в данной точке и начале счета высот, деленная на среднее значение нормальной силы тяжести»!!!
- Относительные высоты

# Немного о высотах



Благодарю за внимание !