

Геодезические системы отсчёта как важнейшая основа цифровой реальности

Ощепков Илья Алексеевич (ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»)

2-я Совместная Международная научно-техническая конференция

ЦИФРОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ:

космические и пространственные данные, технологии обработки,
12–15 сентября 2022 года, г. Санкт-Петербург

Геодезия как наука

Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).

Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).
- **Предметами** изучения геодезии являются:

Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).
- **Предметами** изучения геодезии являются:

Что такое геодезия?

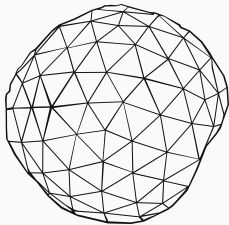
Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).
- **Предметами** изучения геодезии являются:

Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).
- **Предметами** изучения геодезии являются:

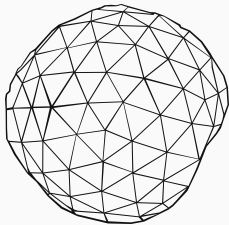


Геометрическая
форма физической
поверхности Земли

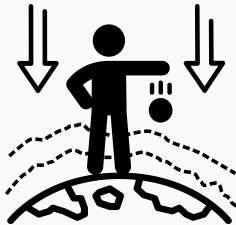
Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).
- **Предметами** изучения геодезии являются:



Геометрическая
форма физической
поверхности Земли

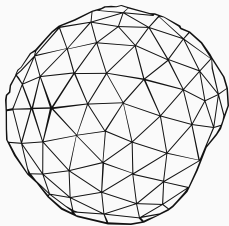


Внешнее
гравитационное поле
Земли

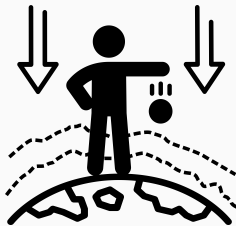
Что такое геодезия?

Геодезия — наука, изучающая физическую поверхность, внешнее гравитационное поле и вращение Земли и их изменение во времени.

- **Объектом** изучения геодезии является Земля (и другие планеты).
- **Предметами** изучения геодезии являются:



Геометрическая
форма физической
поверхности Земли

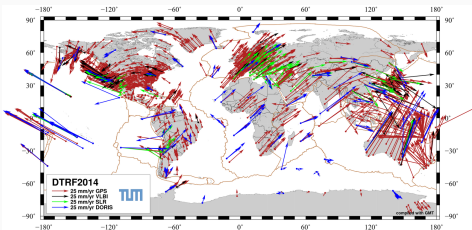
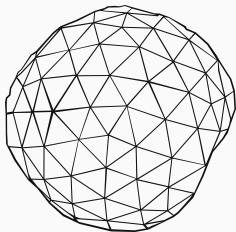


Внешнее
гравитационное поле
Земли



Вращение Земли,
её ориентация в
пространстве

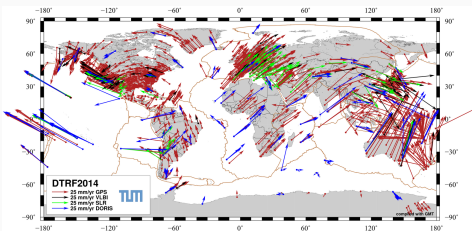
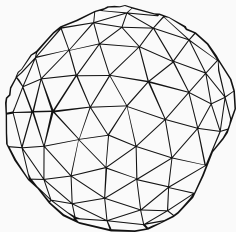
Изучение физической поверхности Земли



Единая система координат



Изучение физической поверхности Земли



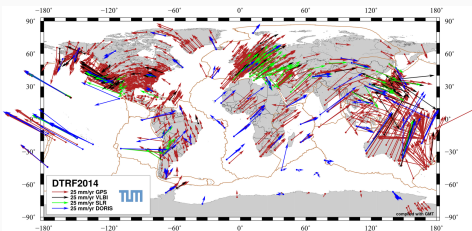
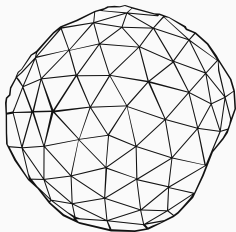
Единая система координат



**Сеть опорных пунктов
VLBI, SLR, DORIS, GNSS**



Изучение физической поверхности Земли



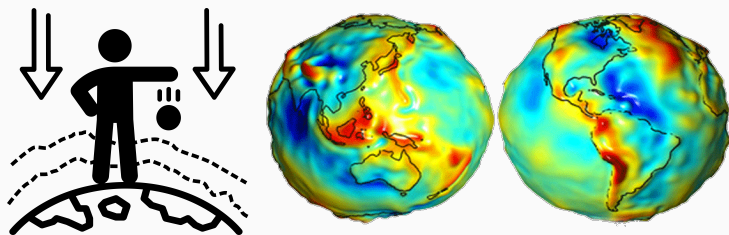
Единая система координат



**Сеть опорных пунктов
VLBI, SLR, DORIS, GNSS**

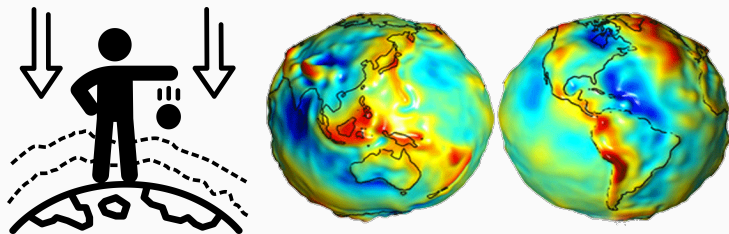


**Цифровые модели
Рельефа, поверхности, местности, 3D**



Единая гравиметрическая система





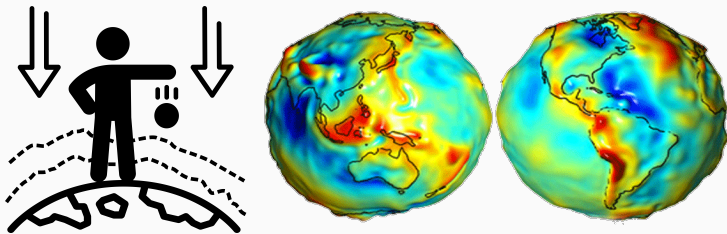
Единая гравиметрическая система



Сеть опорных гравиметрических пунктов



Изучение гравитационного поля Земли



Единая гравиметрическая система



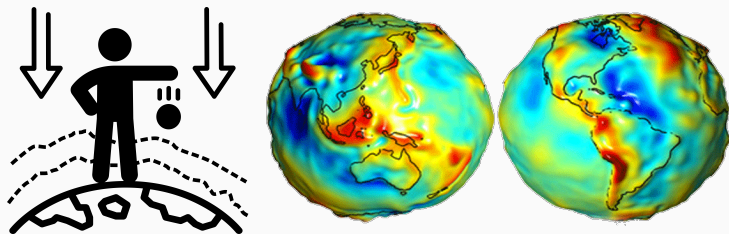
Сеть опорных гравиметрических пунктов



Площадные данные и модели



Изучение гравитационного поля Земли



Единая гравиметрическая система



Сеть опорных гравиметрических пунктов

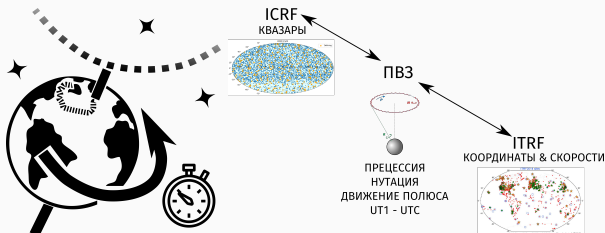


Площадные данные и модели



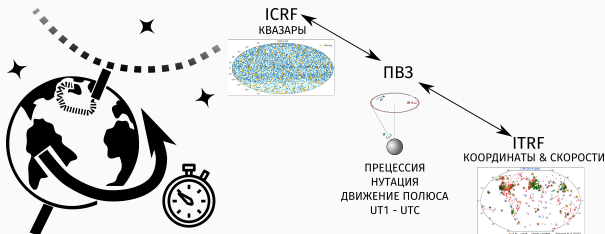
Единая система высот

Изучение вращения Земли



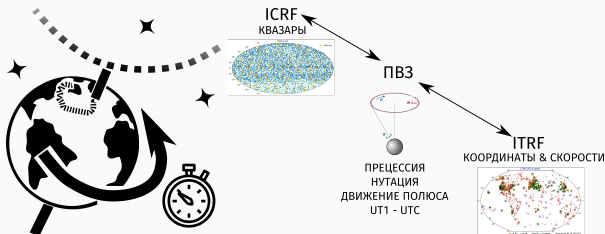
- Земная система координат закрепляется пунктами на земной поверхности, которая плохо подходит на роль стабильной опоры.

Изучение вращения Земли



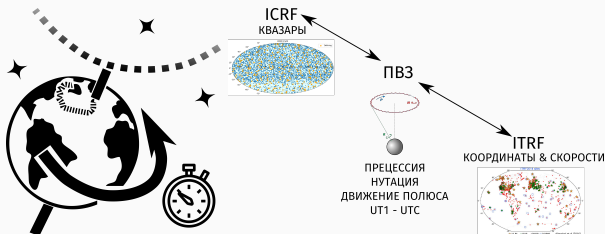
- **Земная система координат** закрепляется пунктами на земной поверхности, которая плохо подходит на роль стабильной опоры.
- **Небесная система координат** закрепляется внеземными источниками — квазарами, которые считаются неподвижными.

Изучение вращения Земли



- **Земная система координат** закрепляется пунктами на земной поверхности, которая плохо подходит на роль стабильной опоры.
- **Небесная система координат** закрепляется внеземными источниками — квазарами, которые считаются неподвижными.
- **Параметры вращения Земли (ПВЗ)** связывают небесную и земную системы координат и описывают ориентацию Земли в пространстве.

Изучение вращения Земли



- **Земная система координат** закрепляется пунктами на земной поверхности, которая плохо подходит на роль стабильной опоры.
- **Небесная система координат** закрепляется внеземными источниками — квазарами, которые считаются неподвижными.
- **Параметры вращения Земли (ПВЗ)** связывают небесную и земную системы координат и описывают ориентацию Земли в пространстве.
- ПВЗ всегда учитываются в задачах, связанных с наблюдением искусственных и естественных небесных тел с поверхности Земли.

Три столпа геодезии и системы отсчёта



- Все «три столпа» **непрерывно изменяются во времени**,
- поэтому их изучение — непрерывный процесс.
- Системы отсчёта устанавливаются в условиях динамической Земли.

Геодезия и цифровая реальность



Цифровая реальность
(или цифровой двойник) —

- цифровая копия реального мира:
- **пространственных** объектов и процессов,
- а также связей между ними.

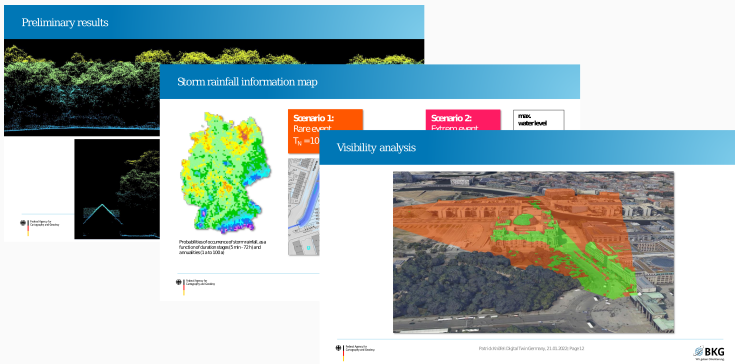


Цифровая реальность
(или цифровой двойник) —

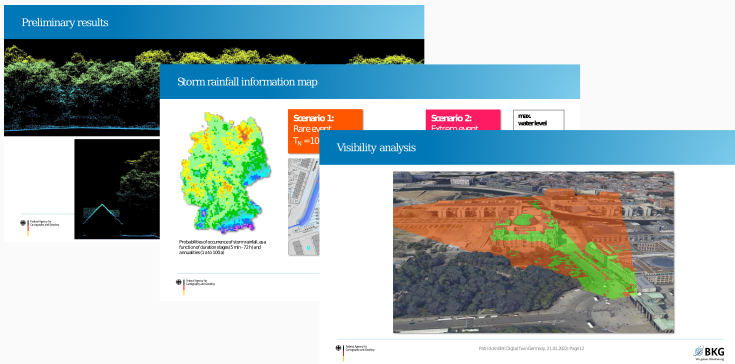
- цифровая копия реального мира:
- **пространственных** объектов и процессов,
- а также связей между ними.

Ключевые элементы:

1. Сбор и интеграция данных
2. Реальное время и визуализация
3. Взаимодействие и обмен
4. Анализ и прогнозирование



- **Высокоточная 3D модель всей территории Германии:**
 - технология — LiDAR;
 - плотность точек — > 40 точек / м² на всей территории страны;
 - разрешение — < 30 см; точность по высоте — < 10 см.
 - повторные измерения каждые три года (2023 и 2026 гг.).



- **Высокоточная 3D модель всей территории Германии:**
 - технология — LiDAR;
 - плотность точек — > 40 точек / м² на всей территории страны;
 - разрешение — < 30 см; точность по высоте — < 10 см.
 - повторные измерения каждые три года (2023 и 2026 гг.).
- **Интеграция:** климатические данные, инфраструктура, сельское хозяйство, транспортные потоки в реальном времени...

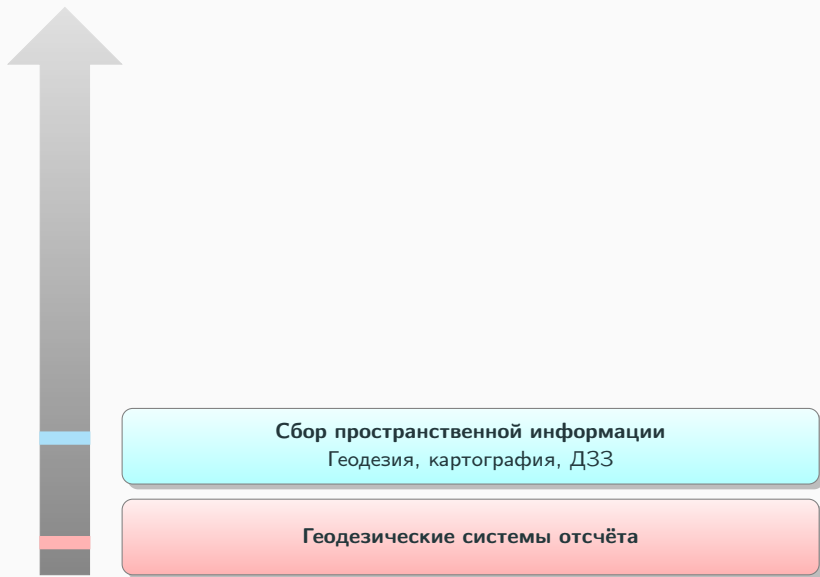


От геодезических систем отсчёта к геопространственной продукции

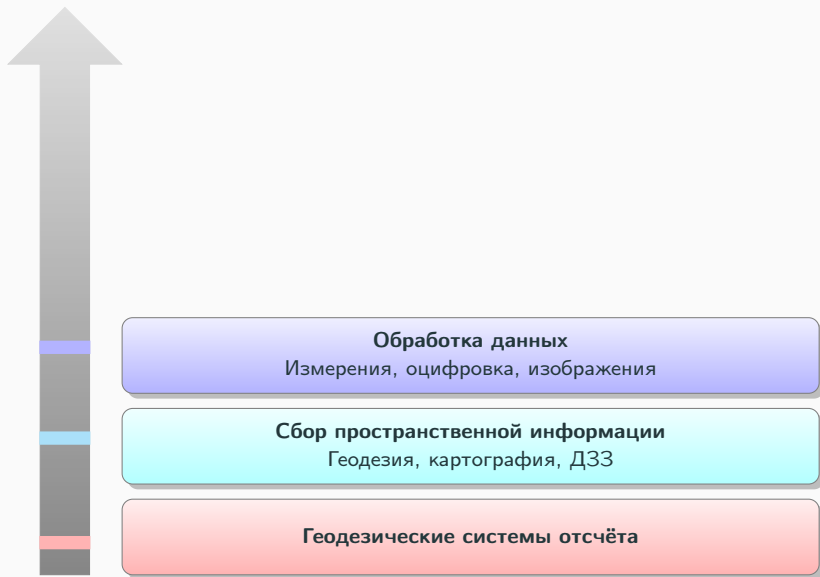


Геодезические системы отсчёта

От геодезических систем отсчёта к геопространственной продукции



От геодезических систем отсчёта к геопространственной продукции



От геодезических систем отсчёта к геопространственной продукции



От геодезических систем отсчёта к геопроостранственной продукции

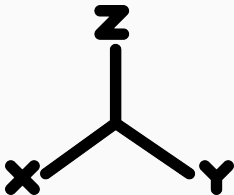


От геодезических систем отсчёта к геопространственной продукции



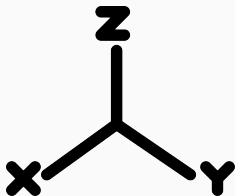
Геодезические системы отсчёта

Геодезическая система
(reference system)



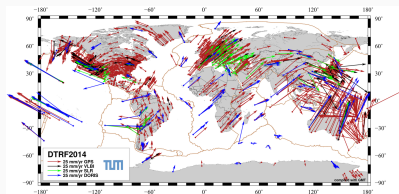
- теоретическое определение
- набором общих предписаний, конвенций и моделей,
- необходимых для задания «координатных осей».
- Одна система.

Геодезическая система (reference system)



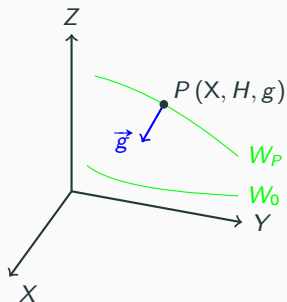
- теоретическое определение
- набором общих предписаний, конвенций и моделей,
- необходимых для задания «координатных осей».
- Одна система.

Геодезическая система отсчёта (отсчётная основа, reference frame)



- практическая реализация
- совокупностью координат (высот, ускорения силы тяжести)
- для реальных точек — геодезических пунктов.
- Множество систем отсчёта.

Виды геодезических систем и систем отсчёта



$X(t)$

Координаты

в принятой земной системе координат

$H(t)$

Физическая высота

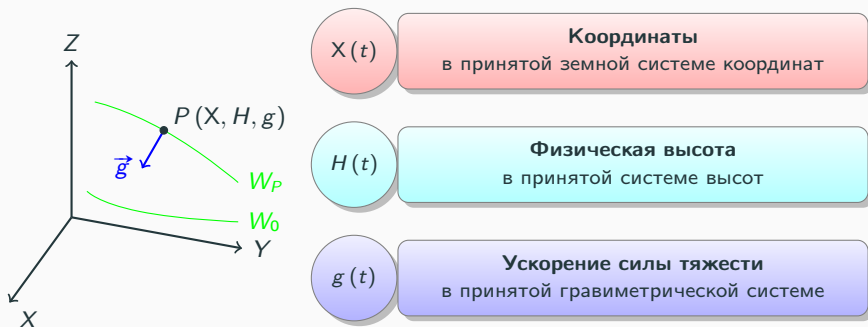
в принятой системе высот

$g(t)$

Ускорение силы тяжести

в принятой гравиметрической системе

Виды геодезических систем и систем отсчёта



Иерархия геодезических систем отсчёта

Международные

Региональные

Национальные

Международные геодезические системы и отсчётные основы

ICRS
/
ICRF

International Celestial Reference System / Frame
Международная небесная система координат / система отсчёта

ITRS
/
ITRF

International Terrestrial Reference System / Frame
Международная земная система координат / система отсчёта

IHRS
/
IHRF

International Height Reference System / Frame
Международная система высот / система отсчёта высот

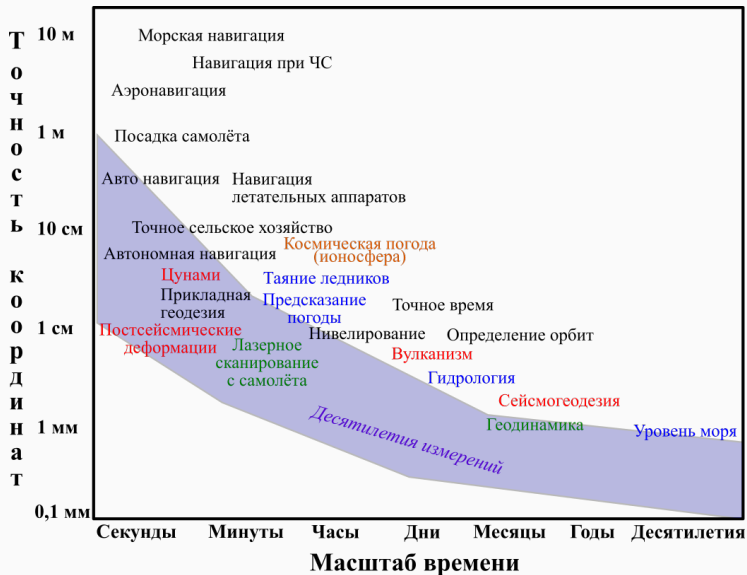
ITGRS
/
ITGRF

International Terrestrial Gravity Reference System / Frame
Международная гравиметрическая система / система отсчёта

Геодезические системы отсчёта

Системы отсчёта координат

Требования к точности и разрешению



Метод установления Международной земной системы отсчёта (ITRF)



VLBI



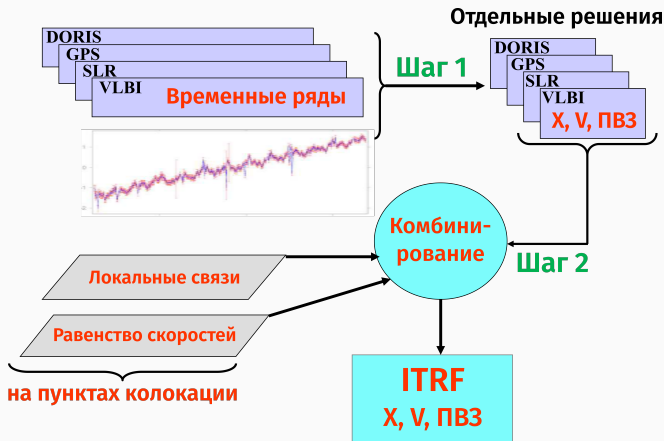
SLR и LLR



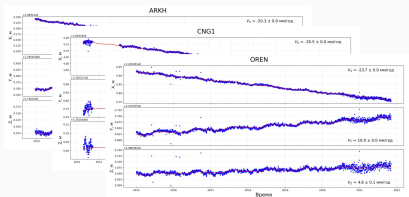
DORIS



GNSS

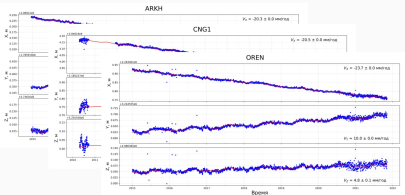


Региональные и национальные системы отсчёта координат



- Строятся на основе GNSS сетей
- постоянно действующих станций.
- путём встраивания в ITRF/IGS.
- Непрерывно работающая инфраструктура — важнейший элемент.

Региональные и национальные системы отсчёта координат

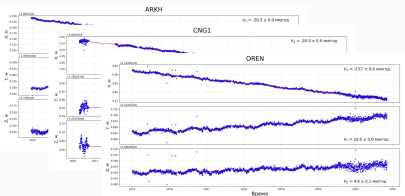


- Строятся на основе GNSS сетей
- постоянно действующих станций.
- путём встраивания в ITRF/IGS.
- Непрерывно работающая инфраструктура — важнейший элемент.

Динамические и статические системы отсчёта координат

- Статическая системы отсчёта — (X, Y, Z) на эпоху t_0
 - Двигается вместе с тектонической плитой (фиксирована на ней).
 - Задана фиксированная эпоха t_0 .
 - Координаты физических объектов **не изменяются** со временем.

Региональные и национальные системы отсчёта координат

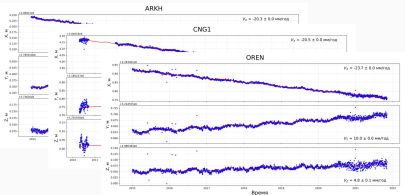


- Строятся на основе GNSS сетей
- постоянно действующих станций.
- путём встраивания в ITRF/IGS.
- Непрерывно работающая инфраструктура — важнейший элемент.

Динамические и статические системы отсчёта координат

- Статическая системы отсчёта — (X, Y, Z) на эпоху t_0
 - Двигается вместе с тектонической плитой (фиксирована на ней).
 - Задана фиксированная эпоха t_0 .
 - Координаты физических объектов **не изменяются** со временем.
- Динамическая системы отсчёта — (X, Y, Z, t)
 - **НЕ** движется вместе с тектонической плитой, фиксирована в Земле.
 - **НЕ** задана фиксированная эпоха t_0 .
 - Координаты физических объектов **изменяются** со временем
разные в разные эпохи, t — полноценная координата.
 - Требуется модель деформаций для сравнения разных эпох.

Региональные и национальные системы отсчёта координат



- Строятся на основе GNSS сетей
- постоянно действующих станций.
- путём встраивания в ITRF/IGS.
- Непрерывно работающая инфраструктура — важнейший элемент.

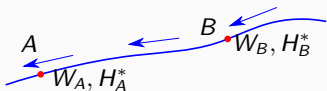
Динамические и статические системы отсчёта координат

- Статическая системы отсчёта — (X, Y, Z) на эпоху t_0
 - Двигается вместе с тектонической плитой (фиксирована на ней).
 - Задана фиксированная эпоха t_0 .
 - Координаты физических объектов **не изменяются** со временем.
- Динамическая системы отсчёта — (X, Y, Z, t)
 - **НЕ** движется вместе с тектонической плитой, фиксирована в Земле.
 - **НЕ** задана фиксированная эпоха t_0 .
 - Координаты физических объектов **изменяются** со временем
 - разные в разные эпохи, t — полноценная координата.
 - Требуется модель деформаций для сравнения разных эпох.
- Квазидинамические системы отсчёта

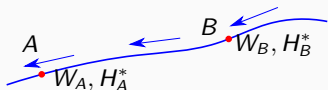
Геодезические системы отсчёта

Системы отсчёта высот

Физические высоты



Физические высоты связаны с **гравитационным полем** и только по ним решают энергетические задачи

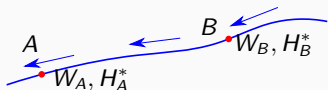


Физические высоты связаны с **гравитационным полем** и только по ним решают энергетические задачи

Теоретическое определение

$$H_P^* = \frac{W_0 - W_P}{\hat{g}}, \quad \hat{g} = \frac{1}{H_P^*} \int_0^{H_P^*} g dH_P^*$$

- W_0 — потенциал силы тяжести в начале счёта высот,
- W_P — потенциал силы тяжести точки P на физической поверхности,
- $\hat{g}$ — среднее значение g по выбранной модели силы тяжести вдоль вертикальной координатной линии H_P^* .



Физические высоты связаны с **гравитационным полем** и только по ним решают энергетические задачи

Теоретическое определение

$$H_P^* = \frac{W_0 - W_P}{\hat{g}}, \quad \hat{g} = \frac{1}{H_P^*} \int_0^{H_P^*} g \, dH_P^*$$

- W_0 — потенциал силы тяжести в начале счёта высот,
- W_P — потенциал силы тяжести точки P на физической поверхности,
- $\hat{g}$ — среднее значение g по выбранной модели силы тяжести вдоль вертикальной координатной линии H_P^* .

Выбор $\hat{g}$ определяет «**теоретическую**» систему физических **высот**: нормальную, ортометрическую, нормально–ортометрическую.

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные систематические ошибки, зависящие от расстояния.
- Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

2. Гравиметрический метод

- ГНСС, LiDAR. . . дают только высоту H над эллипсоидом.

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

2. Гравиметрический метод

- ГНСС, LiDAR. . . дают только высоту H над эллипсоидом.
- Она связана с физической высотой H^* выражением

$$H^* = H - \zeta$$

1. Геометрическое нивелирование

- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

2. Гравиметрический метод

- ГНСС, LiDAR. . . дают только высоту H над эллипсоидом.
- Она связана с физической высотой H^* выражением

$$H^* = H - \zeta$$

- ζ — геоидальная часть (аномалия высоты, квазигеоид / геоид),

1. Геометрическое нивелирование

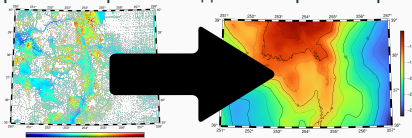
- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

2. Гравиметрический метод

- ГНСС, LiDAR. . . дают только высоту H над эллипсоидом.
- Она связана с физической высотой H^* выражением

$$H^* = H - \zeta$$

- ζ — геоидальная часть (аномалия высоты, квазигеоид / геоид),
- получаемая из решения краевой задачи по гравиметрическим данным



1. Геометрическое нивелирование

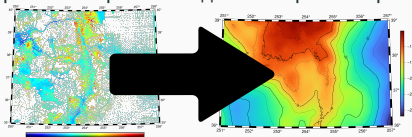
- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

2. Гравиметрический метод

- ГНСС, LiDAR. . . дают только высоту H над эллипсоидом.
- Она связана с физической высотой H^* выражением

$$H^* = H - \zeta$$

- ζ — геоидальная часть (аномалия высоты, квазигеоид / геоид),
- получаемая из решения краевой задачи по гравиметрическим данным



- Вообще никакого геометрического нивелирования!

1. Геометрическое нивелирование

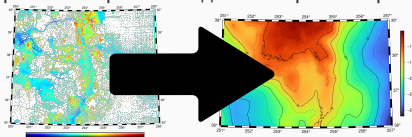
- Уравненная нивелирная сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Во многих национальных сетях обнаружены существенные **систематические ошибки**, зависящие от расстояния.
- **Долго, дорого, трудозатратно, ограниченные приложения.**
- Крупные развитые страны (Канада, США, Австралия) отказываются от использования нивелирных сетей в качестве высотной основы.

2. Гравиметрический метод

- ГНСС, LiDAR. . . дают только высоту H над эллипсоидом.
- Она связана с физической высотой H^* выражением

$$H^* = H - \zeta$$

- ζ — геоидальная часть (аномалия высоты, квазигеоид / геоид),
- получаемая из решения краевой задачи по гравиметрическим данным



- Вообще никакого геометрического нивелирования!

Гравиметрический метод — это «новая реальность»

Геодезические системы отсчёта

Системы отсчёта силы тяжести

Система силы тяжести ITGRS

- **Измеряемая величина:** мгновенное ускорение свободного падения
- **Набор обязательных поправок:**
 - Система нулевого прилива для поправки за прилив.
 - Стандартная атмосфера ISO 2533:1975 (DIN 5450) для поправки за вариацию атмосферного давления.
 - Полюс IERS для поправки за движение полюса.
- В сумме — «**ускорение силы тяжести**» или просто «**сила тяжести**».

Система силы тяжести ITGRS

- **Измеряемая величина:** мгновенное ускорение свободного падения
- **Набор обязательных поправок:**
 - Система нулевого прилива для поправки за прилив.
 - Стандартная атмосфера ISO 2533:1975 (DIN 5450) для поправки за вариацию атмосферного давления.
 - Полюс IERS для поправки за движение полюса.
- В сумме — «**ускорение силы тяжести**» или просто «**сила тяжести**».

Система отсчёта силы тяжести ITGRF (реализация)

- **Абсолютные измерения силы тяжести**, прослеживаемые к СИ.
- Общий опорный уровень: **участие в сравнениях или калибровке.**
- Принятый набор моделей временных вариаций ITGRS2020.
- Глобальная сеть опорных пунктов с известным значением силы тяжести с **точностью** $10^{-7} \text{ м/с}^2 = 10 \text{ мкГал}$ и лучше.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- Гравиметрическая сеть традиционно служит отсчётной основой.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- Гравиметрическая сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Абсолютные измерения ускорения силы тяжести.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- Гравиметрическая сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Абсолютные измерения ускорения силы тяжести.
- Не требуется никакая информация с соседних пунктов, «сеть» строится через абсолютные гравиметры.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- **Гравиметрическая сеть** традиционно служит отсчётной основой.
- **Абсолютные измерения** ускорения силы тяжести.
- Не требуется никакая информация с соседних пунктов, «сеть» строится через абсолютные гравиметры.
- Баллистические гравиметры: механические и квантовые.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- **Гравиметрическая сеть** традиционно служит отсчётной основой.
- **Абсолютные измерения** ускорения силы тяжести.
- Не требуется никакая информация с соседних пунктов, «сеть» строится через абсолютные гравиметры.
- Баллистические гравиметры: механические и квантовые.
- Требуется участие в **сравнениях абсолютных гравиметров**.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- **Гравиметрическая сеть** традиционно служит отсчётной основой.
- **Абсолютные измерения** ускорения силы тяжести.
- Не требуется никакая информация с соседних пунктов, «сеть» строится через абсолютные гравиметры.
- Баллистические гравиметры: механические и квантовые.
- Требуется участие в **сравнениях абсолютных гравиметров**.
- Постоянно действующие **сверхпроводящие гравиметры** используются для **непрерывного мониторинга** изменения силы тяжести.

Принцип установления системы отсчёта силы тяжести



- Гравиметрическая сеть традиционно служит отсчётной основой.
- Абсолютные измерения ускорения силы тяжести.
- Не требуется никакая информация с соседних пунктов, «сеть» строится через абсолютные гравиметры.
- Баллистические гравиметры: механические и квантовые.
- Требуется участие в сравнениях абсолютных гравиметров.
- Постоянно действующие сверхпроводящие гравиметры используются для непрерывного мониторинга изменения силы тяжести.
- Относительные гравиметры служат как вспомогательные СИ для определения вертикального градиента ускорения силы тяжести.

1. Геодезические системы и системы отсчёта:
координат, высот, силы тяжести (гравиметрические)
2. Все они — основа для создания пространственных данных, включая и концепцию **цифрового двойника (цифровой реальности)**.
3. Необходимо принять новые принципы:
 - динамические системы отсчёта координат;
 - системы отсчёта высот, построенные гравиметрическим методом;
 - гравиметрические системы отсчёта на основе абсолютных и непрерывных измерений.
4. Таким образом, ожидается уход от привычных геодезистам методов и технологий, что ожидаемо вызовет трудности в принятии.
5. Однако этого уже требуют многие приложения, не только научные.
6. В будущем число потребителей актуальной пространственной информации будет только увеличиваться.

1. Геодезические системы и системы отсчёта:
координат, высот, силы тяжести (гравиметрические)
2. Все они — основа для создания пространственных данных, включая и концепцию **цифрового двойника** (цифровой реальности).
3. Необходимо принять новые принципы:
 - динамические системы отсчёта координат;
 - системы отсчёта высот, построенные гравиметрическим методом;
 - гравиметрические системы отсчёта на основе абсолютных и непрерывных измерений.
4. Таким образом, ожидается уход от привычных геодезистам методов и технологий, что ожидаемо вызовет трудности в принятии.
5. Однако этого уже требуют многие приложения, не только научные.
6. В будущем число потребителей актуальной пространственной информации будет только увеличиваться.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!