

Геодезический цифровой двойник Земли

Невретдинов И. Х. Ощепков И. А., Меженова И. И.

ППК Роскадастр

Цифровой двойник — это виртуальная модель объекта или процесса, повторяющая его форму вместе с основными свойствами и позволяющая:

Цифровой двойник — это виртуальная модель объекта или процесса, повторяющая его форму вместе с основными свойствами и позволяющая:

- точно моделировать состояние системы в режиме реального времени;

Цифровой двойник — это виртуальная модель объекта или процесса, повторяющая его форму вместе с основными свойствами и позволяющая:

- точно моделировать состояние системы в режиме реального времени;
- строить прогнозы касательно её состояния;

Цифровой двойник — это виртуальная модель объекта или процесса, повторяющая его форму вместе с основными свойствами и позволяющая:

- точно моделировать состояние системы в режиме реального времени;
- строить прогнозы касательно её состояния;
- выполнять симуляции и **тестировать различные сценарии**

Понятие цифрового двойника

Цифровой двойник — это виртуальная модель объекта или процесса, повторяющая его форму вместе с основными свойствами и позволяющая:

- точно моделировать состояние системы в режиме реального времени;
- строить прогнозы касательно её состояния;
- выполнять симуляции и тестировать различные сценарии



Понятие цифрового двойника

Цифровой двойник — это виртуальная модель объекта или процесса, повторяющая его форму вместе с основными свойствами и позволяющая:

- точно моделировать состояние системы в режиме реального времени;
- строить прогнозы касательно её состояния;
- выполнять симуляции и **тестировать различные сценарии**



Создание цифровых двойников — закономерное явление в эпоху ускоренной цифровизации всех сфер жизни

Система Земля

Климатические изменения приводят к необходимости создания модели, описывающей основные "сферы" планеты:

Система Земля

Климатические изменения приводят к необходимости создания модели, описывающей основные "сферы" планеты:

- атмосферу,
-
-
-



Система Земля

Климатические изменения приводят к необходимости создания модели, описывающей основные "сферы" планеты:

- атмосферу,
- гидросферу,
-
-



Система Земля

Климатические изменения приводят к необходимости создания модели, описывающей основные "сферы" планеты:

- атмосферу,
- гидросферу,
- литосферу,
-



Система Земля

Климатические изменения приводят к необходимости создания модели, описывающей основные "сферы" планеты:

- атмосферу,
- гидросферу,
- литосферу,
- биосферу.



Система Земля

Климатические изменения приводят к необходимости создания модели, описывающей основные "сферы" планеты:

- атмосферу,
- гидросферу,
- литосферу,
- биосферу.



Основные строительные блоки — **климатические переменные** (Essential Climate Variables)

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO_2 и др.);
-
-

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO_2 и др.);
-
-



Система Земля и моделирование климата

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO_2 и др.);
- они связаны между собой математическими уравнениями, включающими четвертую координату — время t ;
-



$$\frac{\partial f}{\partial t} = a + \exp(f)^2$$

Система Земля и моделирование климата

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO₂ и др.);
- они связаны между собой математическими уравнениями, включающими четвертую координату — время t ;
- решение этих уравнений полностью описывает состояние системы на заданные моменты времени.



$$\frac{\partial f}{\partial t} = a + \exp(f)^2$$

$$f(x, y, z, t)$$

Система Земля и моделирование климата

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO₂ и др.);
- они связаны между собой математическими уравнениями, включающими четвертую координату — время t ;
- решение этих уравнений полностью описывает состояние системы на заданные моменты времени.



$$\frac{\partial f}{\partial t} = a + \exp(f)^2$$

$$f(x, y, z, t)$$

Система Земля и моделирование климата

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO_2 и др.);
- они связаны между собой математическими уравнениями, включающими четвертую координату — время t ;
- решение этих уравнений полностью описывает состояние системы на заданные моменты времени.



$$\frac{\partial f}{\partial t} = a + \exp(f)^2$$

$$f(x, y, z, t)$$

Система Земля и моделирование климата

- Климатические переменные — параметры, необходимые для наблюдения, анализа и описания определенного аспекта системы Земля (модели осадков, температура, уровень CO₂ и др.);
- они связаны между собой математическими уравнениями, включающими четвертую координату — время t ;
- решение этих уравнений полностью описывает состояние системы на заданные моменты времени.

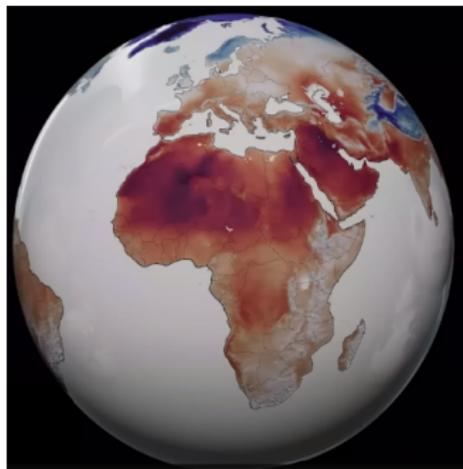


$$\frac{\partial f}{\partial t} = a + \exp(f)^2$$

$$f(x, y, z, t)$$



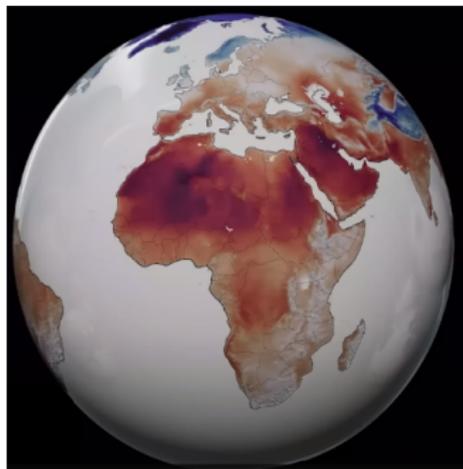
(a) Симуляция наводнений



(b) Предсказание жары

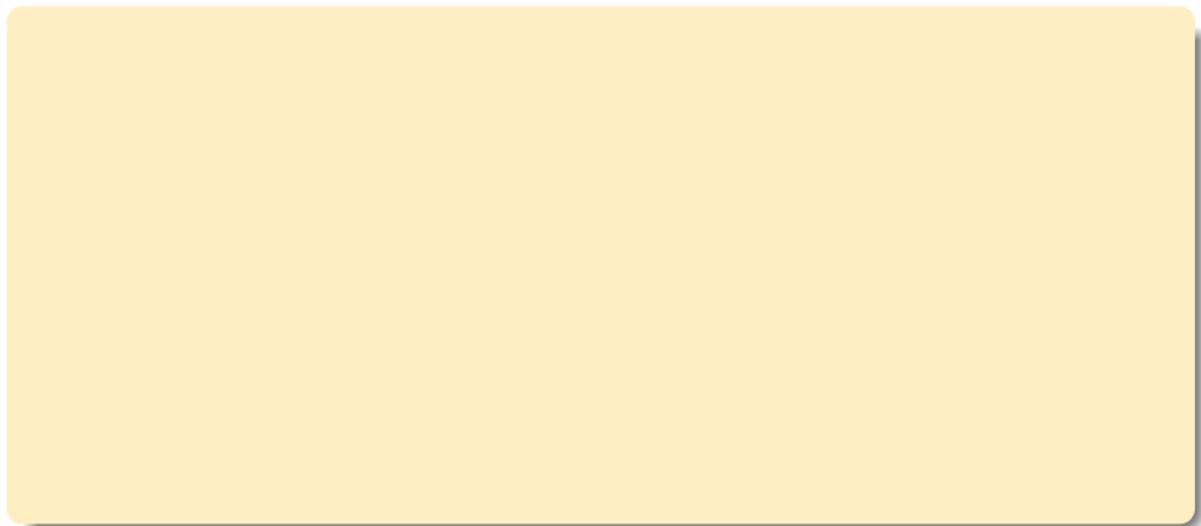


(a) Симуляция наводнений



(b) Предсказание жары

Климатические цифровые двойники могут сохранять свою эффективность на разных временных и пространственных масштабах



- Модели климата в Системе Земля являются прекрасными образцами для подражания в геонауках;

- Модели климата в Системе Земля являются прекрасными образцами для подражания в геонауках;
- они могут быть интегрированы с другими моделями, такими как модели оценки влияния природных бедствий на городскую инфраструктуру;

- Модели климата в Системе Земля являются прекрасными образцами для подражания в геонауках;
- они могут быть интегрированы с другими моделями, такими как модели оценки влияния природных бедствий на городскую инфраструктуру;
- для всего это требуется обработка огромных массивов пространственной информации в реальном времени;

- Модели климата в Системе Земля являются прекрасными образцами для подражания в геонауках;
- они могут быть интегрированы с другими моделями, такими как модели оценки влияния природных бедствий на городскую инфраструктуру;
- для всего это требуется обработка огромных массивов пространственной информации в реальном времени;
- они предоставляют важную для геодезии информацию о состоянии атмосферы и океана;

Создание геодезического цифрового двойника

В ППК «Роскадастр» выполняется работа¹ по формированию списка **геодезических параметров** — наблюдаемых или выводимых из наблюдений величин, характеризующих геодезические свойства Земли:

¹НИР «Геокарта-2030»

В ППК «Роскадастр» выполняется работа¹ по формированию списка **геодезических параметров** — наблюдаемых или выводимых из наблюдений величин, характеризующих геодезические свойства Земли:

- фигуру Земли,

¹НИР «Геокарта-2030»

В ППК «Роскадастр» выполняется работа¹ по формированию списка **геодезических параметров** — наблюдаемых или выводимых из наблюдений величин, характеризующих геодезические свойства Земли:

- фигуру Земли,
- её внешнее гравитационное поле,

¹НИР «Геокарта-2030»

В ППК «Роскадастр» выполняется работа¹ по формированию списка **геодезических параметров** — наблюдаемых или выводимых из наблюдений величин, характеризующих геодезические свойства Земли:

- фигуру Земли,
- её внешнее гравитационное поле,
- её вращение.

¹НИР «Геокарта-2030»

В ППК «Роскадастр» выполняется работа¹ по формированию списка **геодезических параметров** — наблюдаемых или выводимых из наблюдений величин, характеризующих геодезические свойства Земли:

- фигуру Земли,
- её внешнее гравитационное поле,
- её вращение.

Геодезические свойства тесно связаны с реализацией государственных систем отчёта: системы координат, системы высот и гравиметрической системы;

¹НИР «Геокарта-2030»

Понятие геодезического параметра

В ППК «Роскадастр» выполняется работа¹ по формированию списка **геодезических параметров** — наблюдаемых или выводимых из наблюдений величин, характеризующих геодезические свойства Земли:

- фигуру Земли,
- её внешнее гравитационное поле,
- её вращение.

Геодезические свойства тесно связаны с реализацией государственных систем отчёта: системы координат, системы высот и гравиметрической системы;

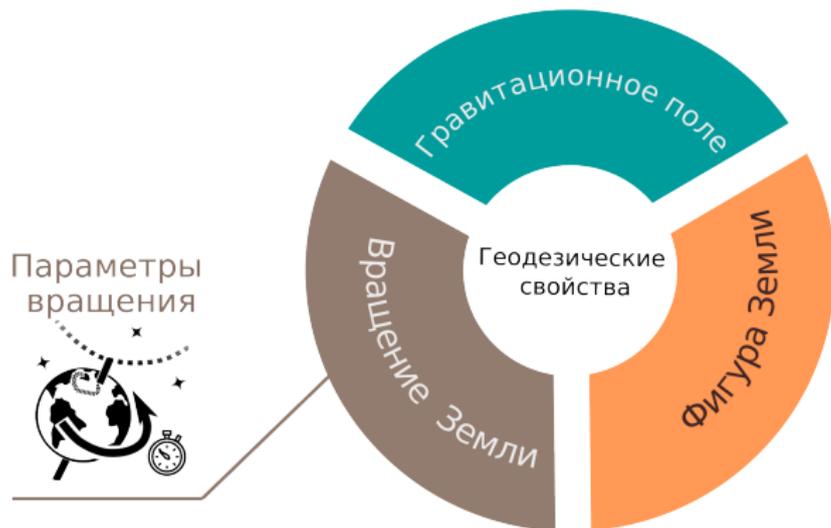
На основе выполненных исследований планируется создание
Единой службы вывода геодезических параметров

¹НИР «Геокарта-2030»

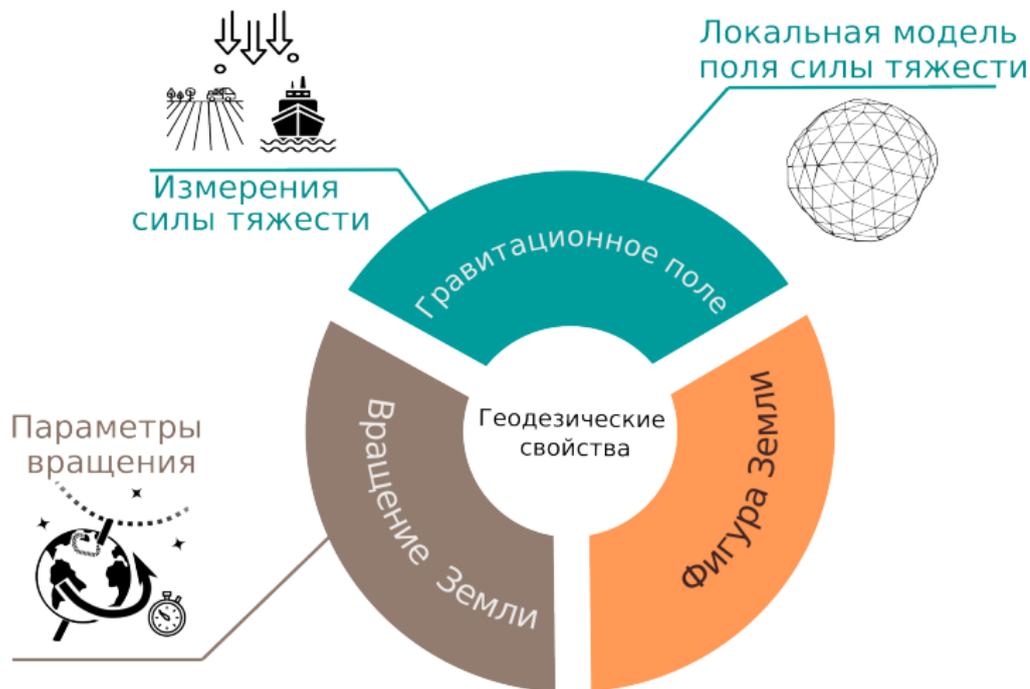
Классификация геодезических параметров



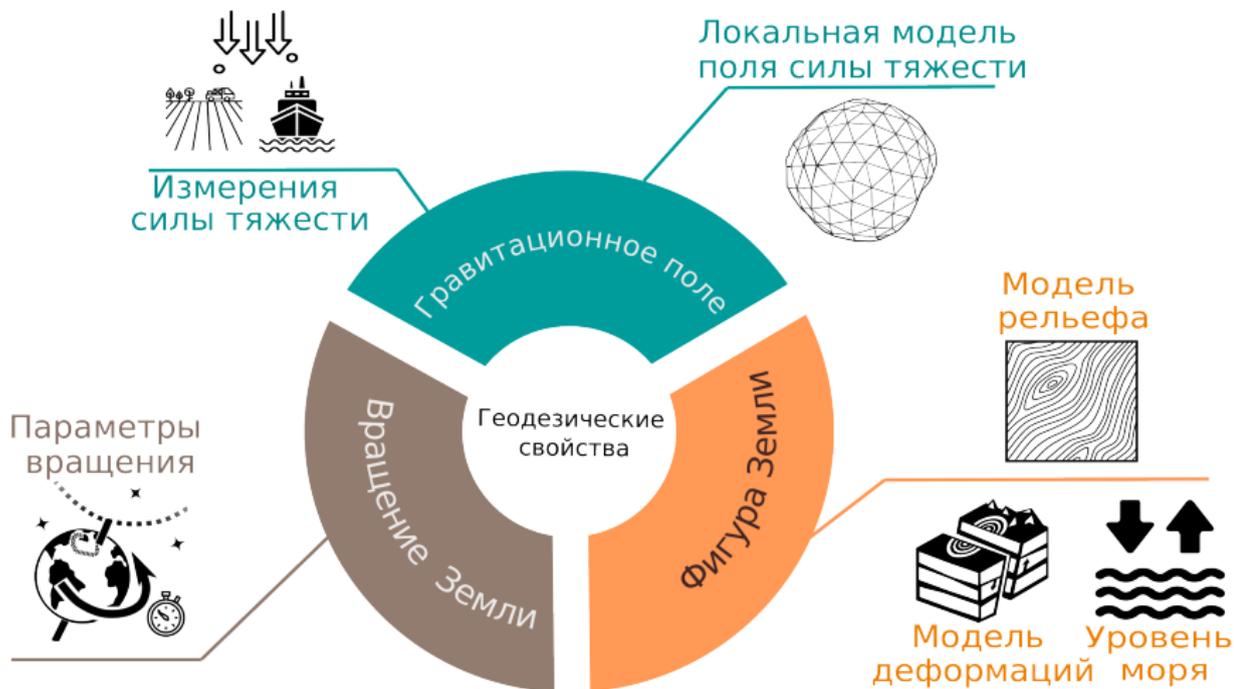
Классификация геодезических параметров



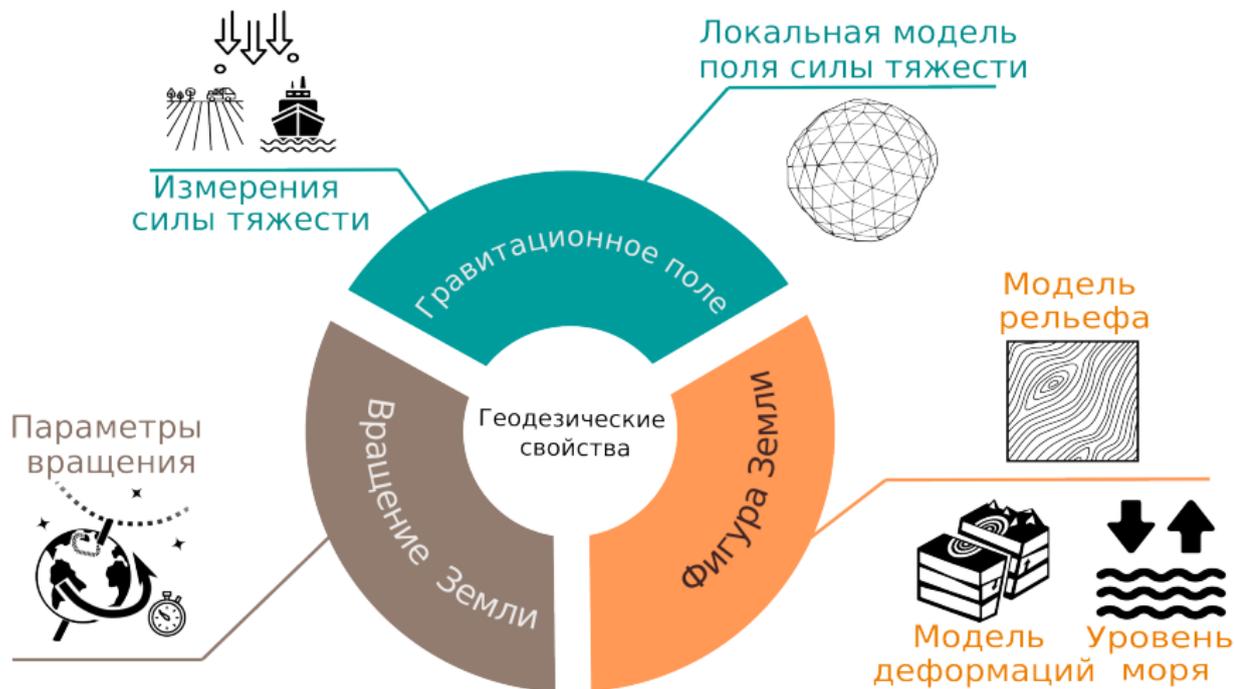
Классификация геодезических параметров



Классификация геодезических параметров



Классификация геодезических параметров



- координаты BL и высоты H — параметры тоже
- аналитическая связь между всеми ними неизвестна

Пример метаинформации для геодезических параметров

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;
3. исходные данные: аномалии силы тяжести, модели рельефа, нивелирные пункты, измерения ГНСС;

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;
3. исходные данные: аномалии силы тяжести, модели рельефа, нивелирные пункты, измерения ГНСС;
4. метод определения: решение третьей краевой задачи на основе теории Молоденского;

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;
3. исходные данные: аномалии силы тяжести, модели рельефа, нивелирные пункты, измерения ГНСС;
4. метод определения: решение третьей краевой задачи на основе теории Молоденского;
5. требования к точности:
 - установление государственной системы высот: 1—10 см;
 - реализация Международной системы высот: 1 см.

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;
3. исходные данные: аномалии силы тяжести, модели рельефа, нивелирные пункты, измерения ГНСС;
4. метод определения: решение третьей краевой задачи на основе теории Молоденского;
5. требования к точности:
 - установление государственной системы высот: 1—10 см;
 - реализация Международной системы высот: 1 см.
6. период переопределения: 5—10 лет;

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;
3. исходные данные: аномалии силы тяжести, модели рельефа, нивелирные пункты, измерения ГНСС;
4. метод определения: решение третьей краевой задачи на основе теории Молоденского;
5. требования к точности:
 - установление государственной системы высот: 1—10 см;
 - реализация Международной системы высот: 1 см.
6. период переопределения: 5—10 лет;
7. ответственная организация: ?

Пример метаинформации для геодезических параметров

1. Наименование параметра: модель аномалии высоты;
2. категория: гравитационное поле Земли;
3. исходные данные: аномалии силы тяжести, модели рельефа, нивелирные пункты, измерения ГНСС;
4. метод определения: решение третьей краевой задачи на основе теории Молоденского;
5. требования к точности:
 - установление государственной системы высот: 1—10 см;
 - реализация Международной системы высот: 1 см.
6. период переопределения: 5—10 лет;
7. ответственная организация: ?
8. система прилива: средний прилив.

Стадии создания геодезического цифрового двойника.

Сбор данных

Основные этапы

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Стадии создания геодезического цифрового двойника. Сбор данных

Основные этапы

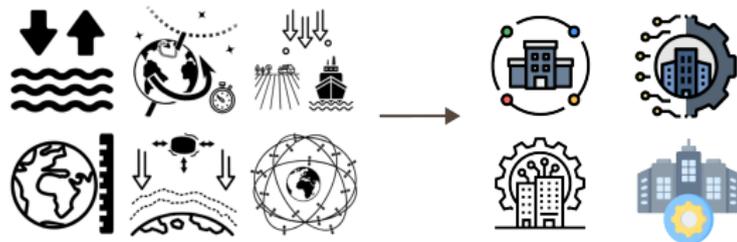
1. формирование списка геодезических параметров;
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Сбор данных

Основные этапы

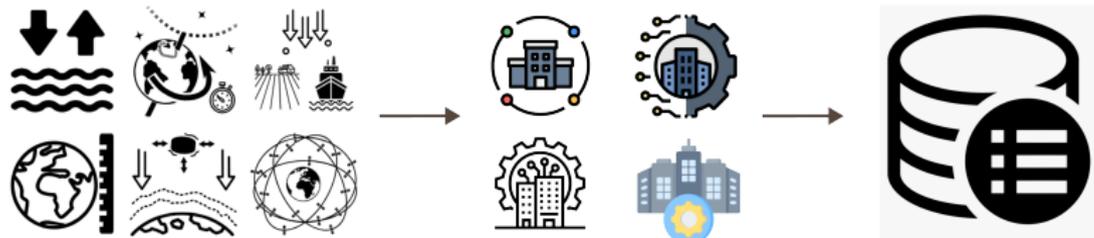
1. формирование списка геодезических параметров;
2. поиск организаций, предоставляющие исходные данные и значения параметров;
- 3.
- 4.
- 5.



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Сбор данных

Основные этапы

1. формирование списка геодезических параметров;
2. поиск организаций, предоставляющие исходные данные и значения параметров;
3. получение и компоновка данных;
- 4.
- 5.



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Сбор данных

Основные этапы

1. формирование списка геодезических параметров;
2. поиск организаций, предоставляющие исходные данные и значения параметров;
3. получение и компоновка данных;
4. проверка корректности предоставленных данных и их полноты;
- 5.



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Сбор данных

Основные этапы

1. формирование списка геодезических параметров;
2. поиск организаций, предоставляющие исходные данные и значения параметров;
3. получение и компоновка данных;
4. проверка корректности предоставленных данных и их полноты;
5. где возможно вычисляем отсутствующие данные на основе упрощенных моделей



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Объединение моделей

Основные этапы

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

Стадии создания геодезического цифрового двойника. Объединение моделей

Основные этапы

1. Использование известных связей между параметрами на основе теории Молоденского (гравитационное поле и фигура Земли) и теории вращения;
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.



+

$$\zeta_P = \frac{T_P}{\gamma_P}$$
$$\frac{d\vec{H}}{dt} + [\vec{\omega} \times \vec{H}] = \vec{L}$$

Стадии создания геодезического цифрового двойника. Объединение моделей

Основные этапы

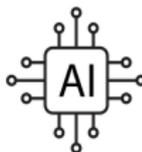
1. Использование известных связей между параметрами на основе теории Молоденского (гравитационное поле и фигура Земли) и теории вращения;
2. не забываем о машинном обучении!
- 3.
- 4.
- 5.



+

$$\zeta_P = \frac{T_P}{\gamma_P}$$
$$\frac{d\vec{H}}{dt} + [\vec{\omega} \times \vec{H}] = \vec{L}$$

+



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Объединение моделей

Основные этапы

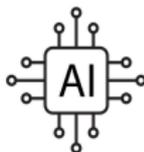
1. Использование известных связей между параметрами на основе теории Молоденского (гравитационное поле и фигура Земли) и теории вращения;
2. не забываем о машинном обучении!
3. Объединение ансамблей моделей в единую систему;
- 4.
- 5.



+

$$\zeta_P = \frac{T_P}{\gamma_P}$$
$$\frac{d\vec{H}}{dt} + [\vec{\omega} \times \vec{H}] = \vec{L}$$

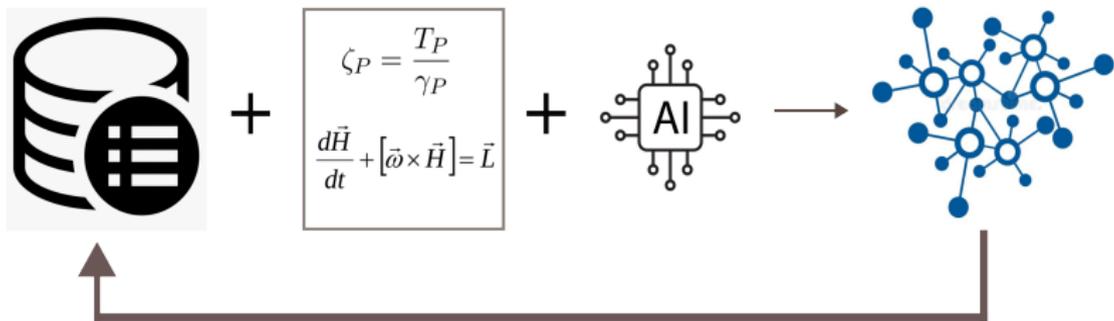
+



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Объединение моделей

Основные этапы

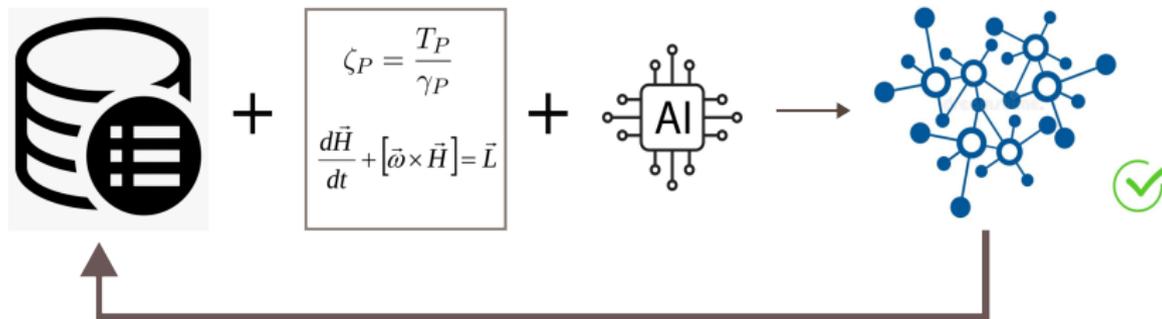
1. Использование известных связей между параметрами на основе теории Молоденского (гравитационное поле и фигура Земли) и теории вращения;
2. не забываем о машинном обучении!
3. Объединение ансамблей моделей в единую систему;
4. валидация на исходных данных;
- 5.



Стадии создания геодезического цифрового двойника. Объединение моделей

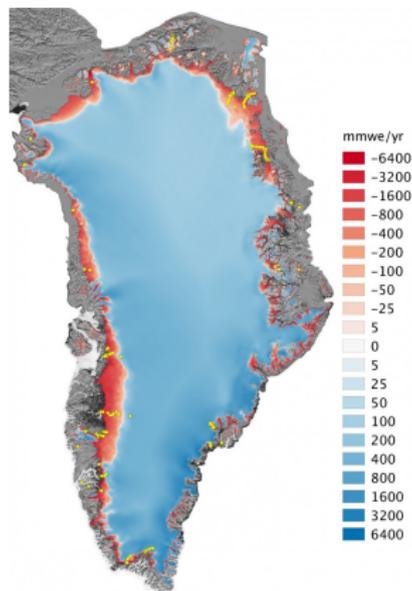
Основные этапы

1. Использование известных связей между параметрами на основе теории Молоденского (гравитационное поле и фигура Земли) и теории вращения;
2. не забываем о машинном обучении!
3. Объединение ансамблей моделей в единую систему;
4. валидация на исходных данных;
5. модель готова к выполнению симуляций.



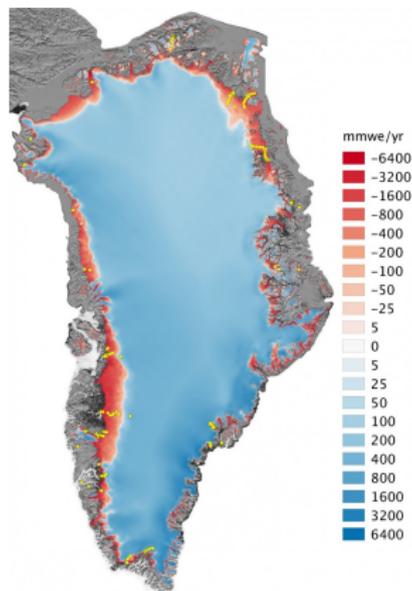
Наблюдаемое природное явление — таяние ледников. Оно приводит к:

- повышению уровня моря и перераспределению масс;
- временным вариациям состояния атмосферы и океана;
- изменениям координат XYZ , высот H и силы тяжести g .



Наблюдаемое природное явление — таяние ледников. Оно приводит к:

- повышению уровня моря и перераспределению масс;
- временным вариациям состояния атмосферы и океана;
- изменениям координат XYZ , высот H и силы тяжести g .



Как будут меняться геодезические величины в будущем **при сохранении текущих темпов** потери ледяной массы?

Основные этапы

1. определяем временной масштаб прогноза;

Основные этапы

1. определяем временной масштаб прогноза;
2. изменения поля силы тяжести на масштабе 100—200 км наблюдаются в данных GRACE-FO², обозначено переменной $g_{\text{спут}}$;

²Gravity Recovery And Climate Experiment Follow-On

Основные этапы

1. определяем временной масштаб прогноза;
2. изменения поля силы тяжести на масштабе 100—200 км наблюдаются в данных GRACE-FO², обозначено переменной $g_{\text{спут}}$;
3. изменения массы выражается как изменение прямого гравитационного влияния, $g_{\text{прям}}$;

²Gravity Recovery And Climate Experiment Follow-On

Основные этапы

1. определяем временной масштаб прогноза;
2. изменения поля силы тяжести на масштабе 100—200 км наблюдаются в данных GRACE-FO², обозначено переменной $g_{\text{спут}}$;
3. изменения массы выражается как изменение прямого гравитационного влияния, $g_{\text{прям}}$;
4. перемена состояния атмосферы и океана описывается в Системе Земля, её учёт основан на вычислении нагрузочных эффектов, $g_{\text{нагр}}$;

²Gravity Recovery And Climate Experiment Follow-On

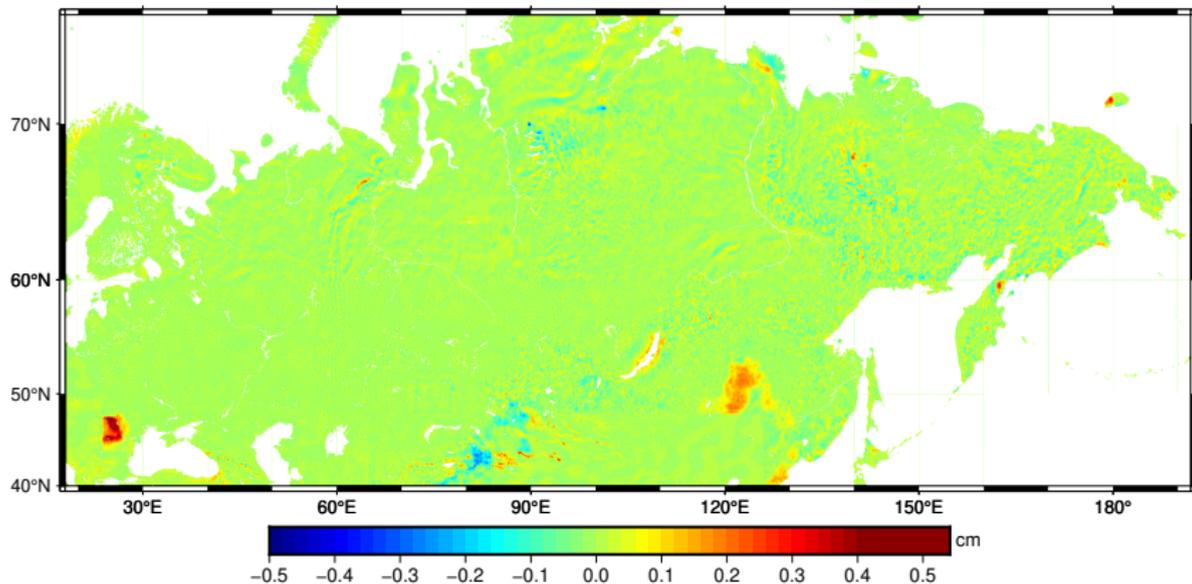
Основные этапы

1. определяем временной масштаб прогноза;
2. изменения поля силы тяжести на масштабе 100—200 км наблюдаются в данных GRACE-FO², обозначено переменной $g_{\text{спут}}$;
3. изменения массы выражается как изменение прямого гравитационного влияния, $g_{\text{прям}}$;
4. перемена состояния атмосферы и океана описывается в Системе Земля, её учёт основан на вычислении нагрузочных эффектов, $g_{\text{нагр}}$;
5. суммарное влияние оценивается как:

$$g_{\text{сум}} = g_{\text{спут}} + g_{\text{прям}} + g_{\text{нагр}}.$$

²Gravity Recovery And Climate Experiment Follow-On

Прогноз изменений физических высот на территории России и приграничных государств на конец 2023 г.



Сложности при создании геодезического цифрового двойника

- большая вычислительная нагрузка на всех уровнях создания цифрового двойника;

Сложности при создании геодезического цифрового двойника

- большая вычислительная нагрузка на всех уровнях создания цифрового двойника;
- связь между наборами геодезических параметров неизвестна;

Сложности при создании геодезического цифрового двойника

- большая вычислительная нагрузка на всех уровнях создания цифрового двойника;
- связь между наборами геодезических параметров неизвестна;
- нужны специалисты широкого профиля;

Сложности при создании геодезического цифрового двойника

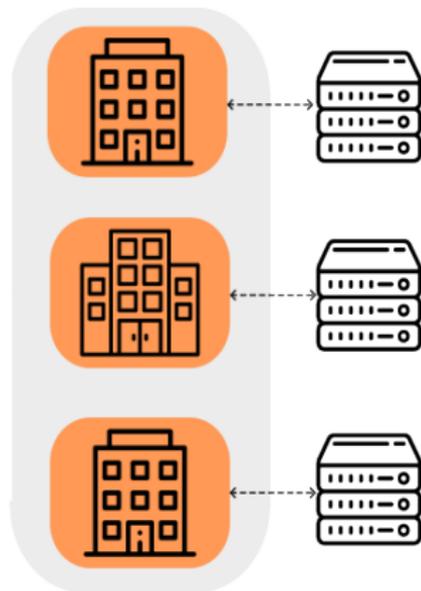
- большая вычислительная нагрузка на всех уровнях создания цифрового двойника;
- связь между наборами геодезических параметров неизвестна;
- нужны специалисты широкого профиля;
- необходимость сбора разнородной информации, предоставляемой множеством институтов и организаций;

Сложности при создании геодезического цифрового двойника

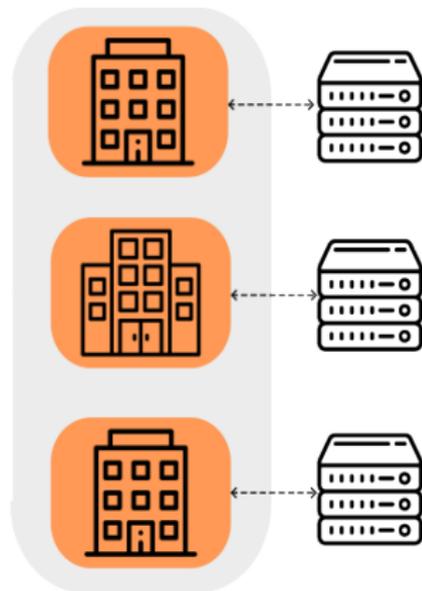
- большая вычислительная нагрузка на всех уровнях создания цифрового двойника;
- связь между наборами геодезических параметров неизвестна;
- нужны специалисты широкого профиля;
- необходимость сбора разнородной информации, предоставляемой множеством институтов и организаций;

Текущий уровень межведомственного взаимодействия не позволяет достичь режима реального времени

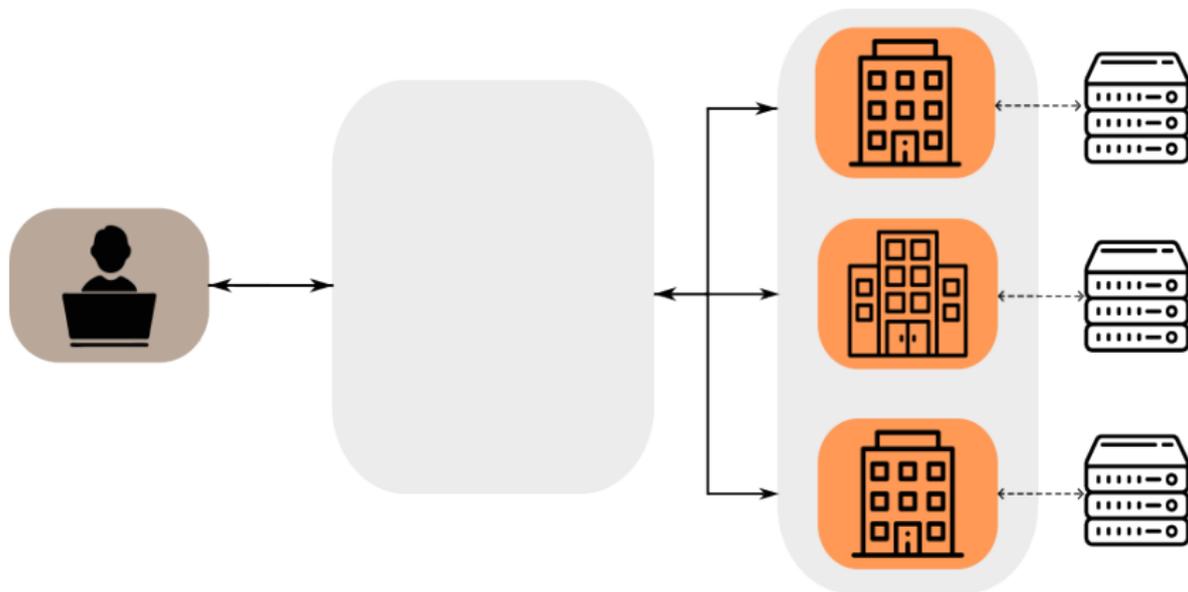
Текущее межведомственное взаимодействие



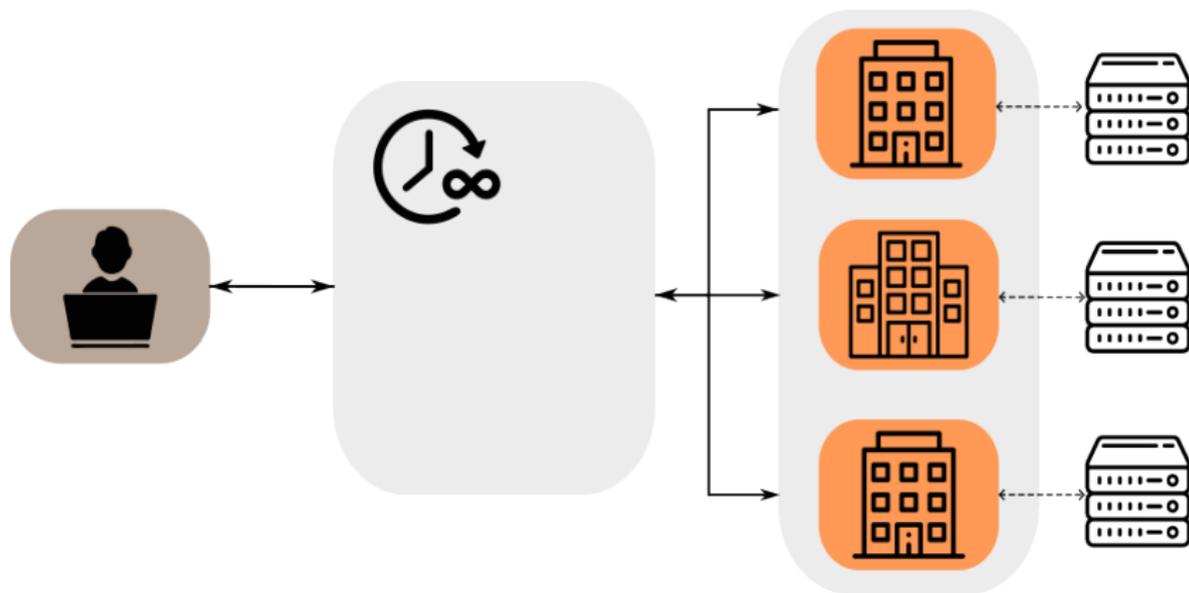
Текущее межведомственное взаимодействие



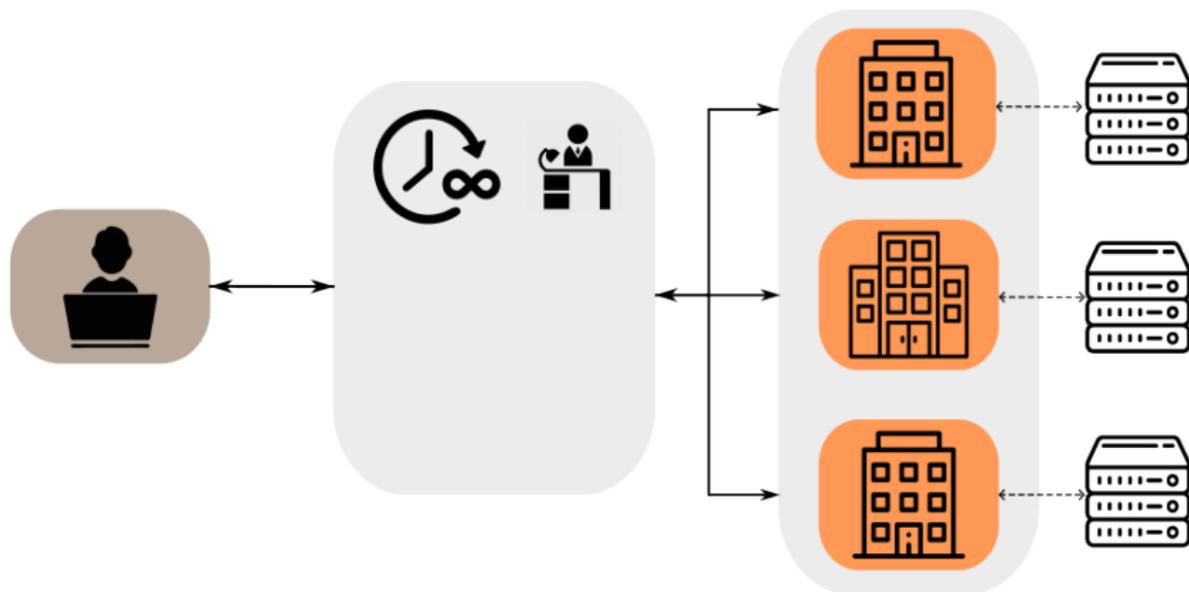
Текущее межведомственное взаимодействие



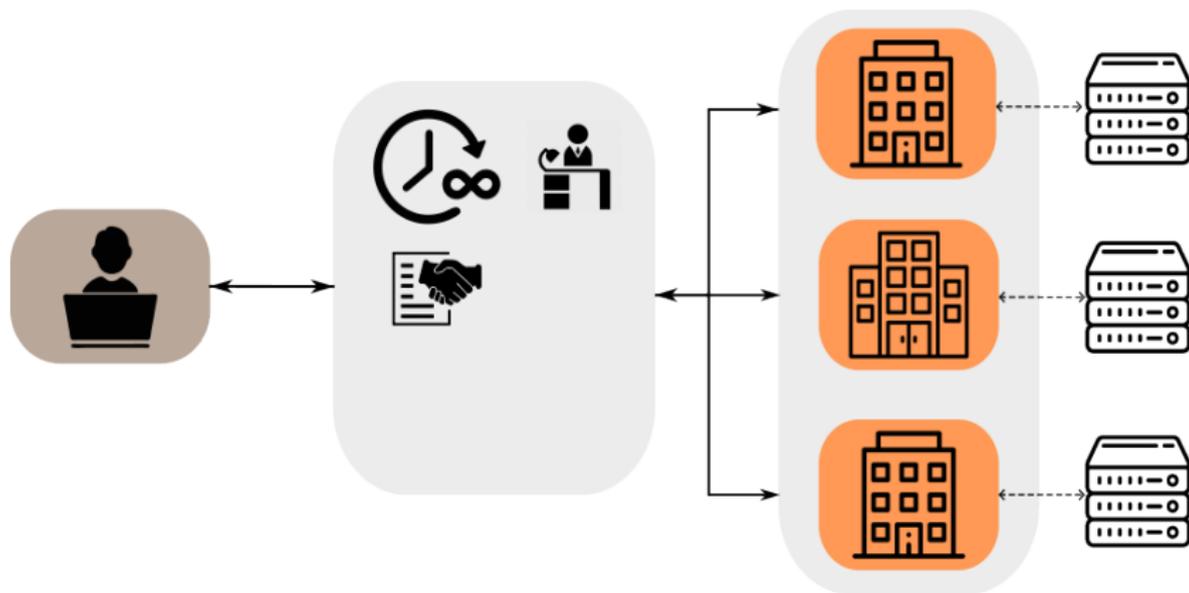
Текущее межведомственное взаимодействие



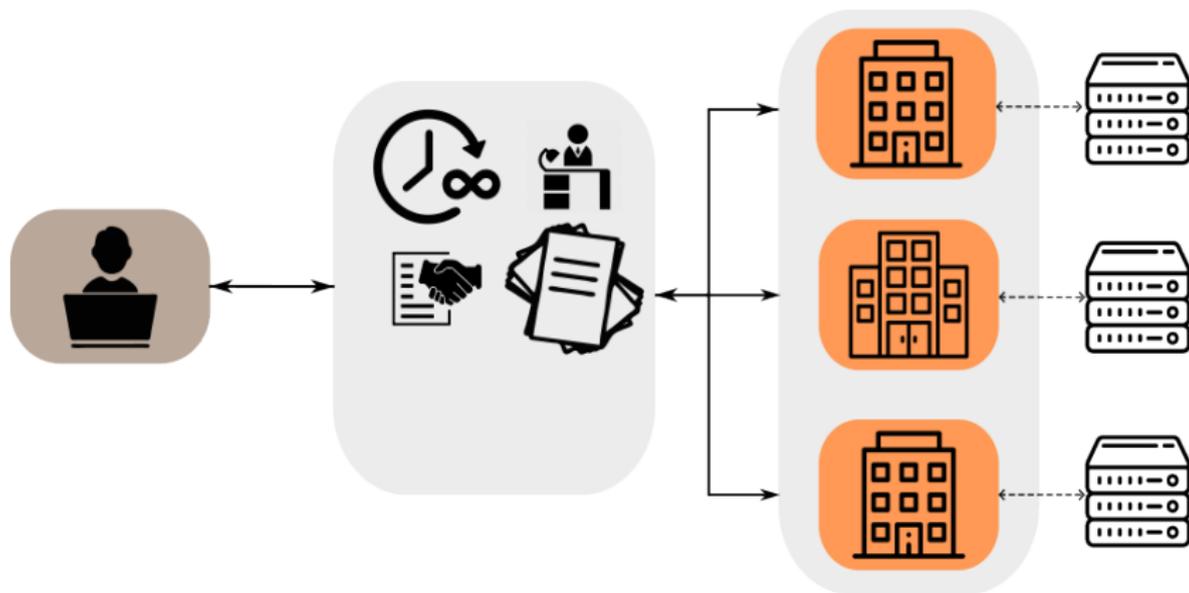
Текущее межведомственное взаимодействие



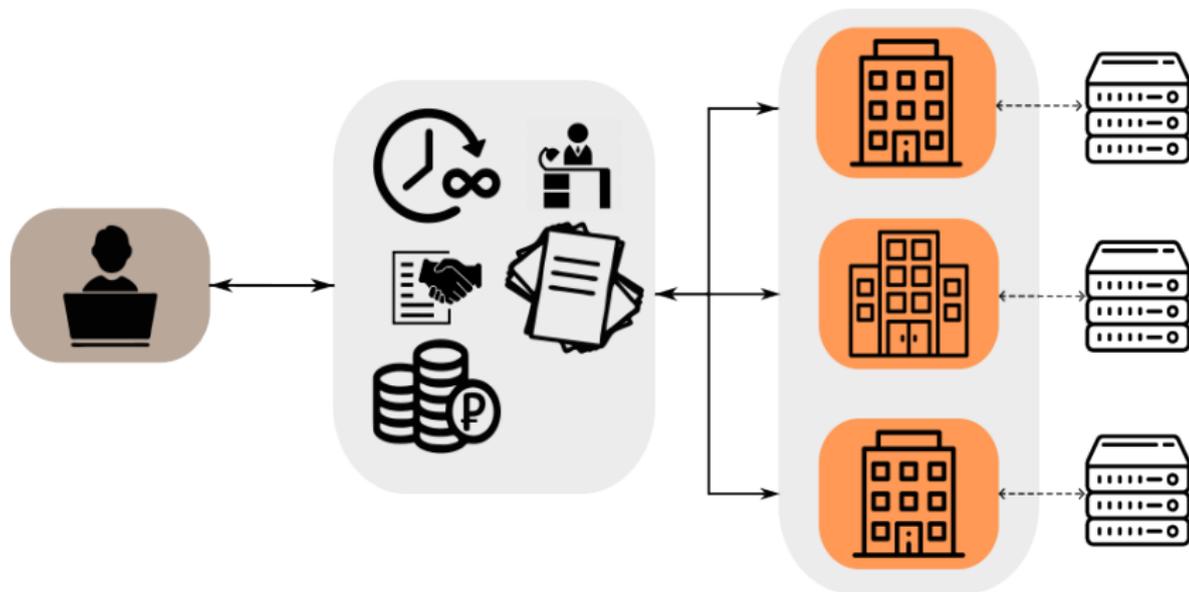
Текущее межведомственное взаимодействие



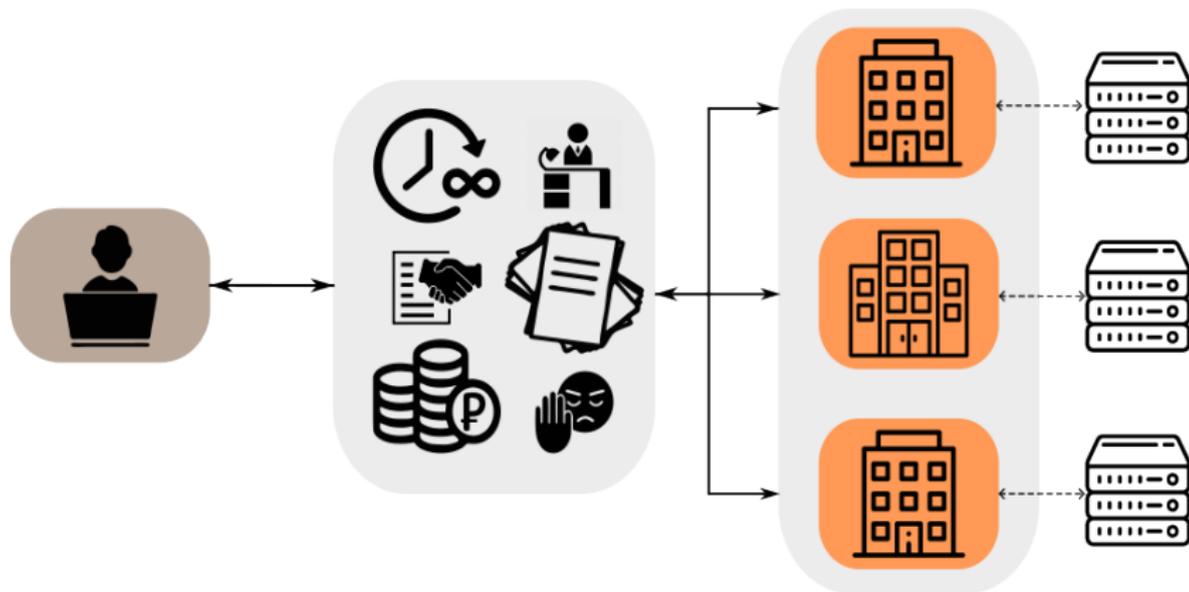
Текущее межведомственное взаимодействие



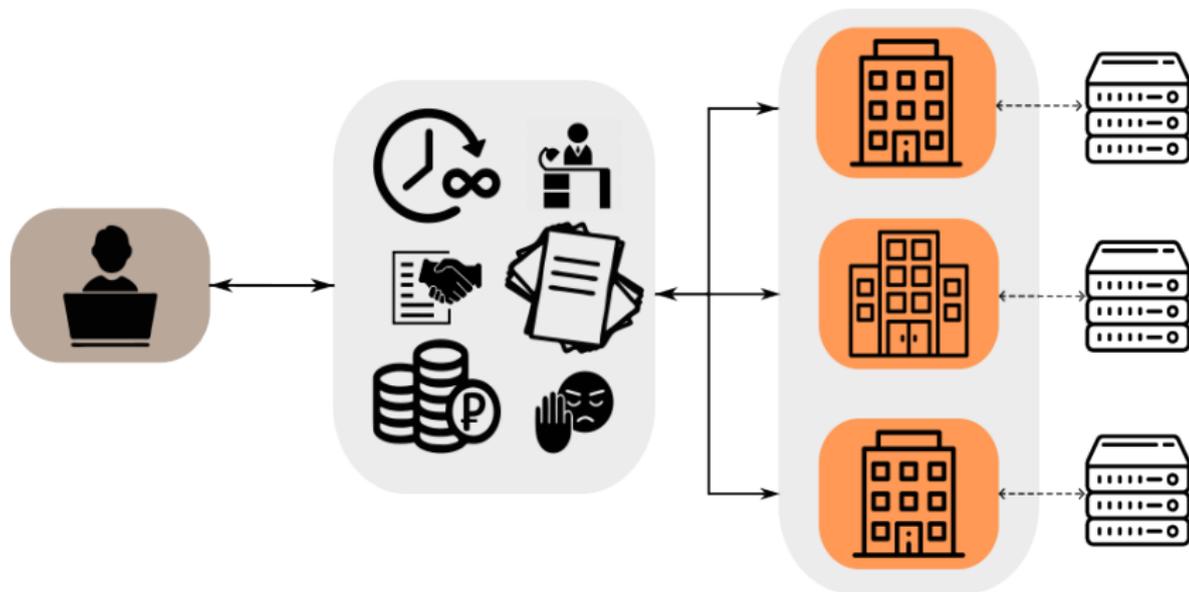
Текущее межведомственное взаимодействие



Текущее межведомственное взаимодействие

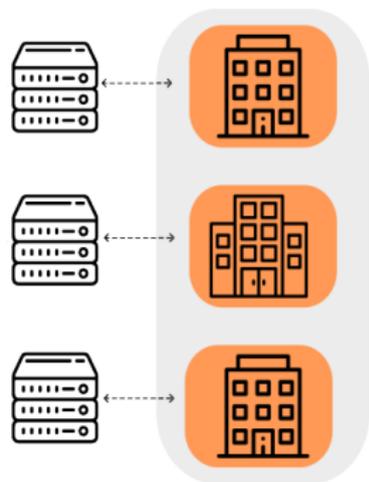


Текущее межведомственное взаимодействие

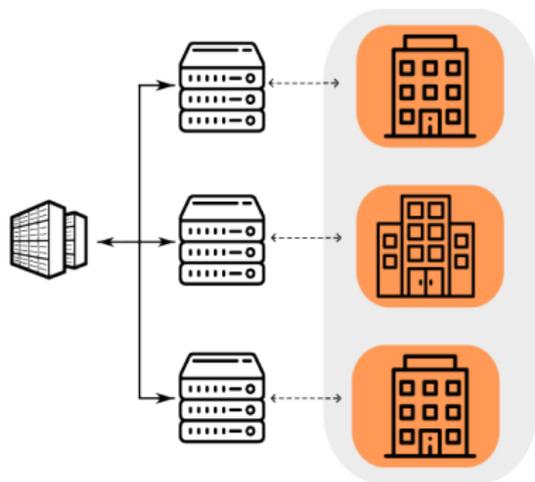


Примеры данных: спутниковая альтиметрия, показания с
уровнемерных постов, координаты полюса.

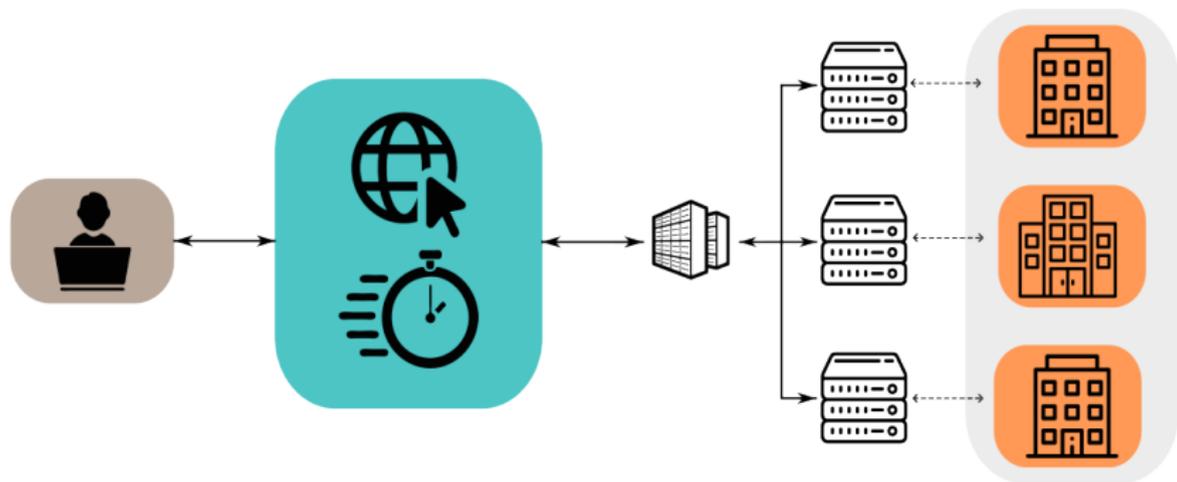
Предлагаемая модель единого дата-центра



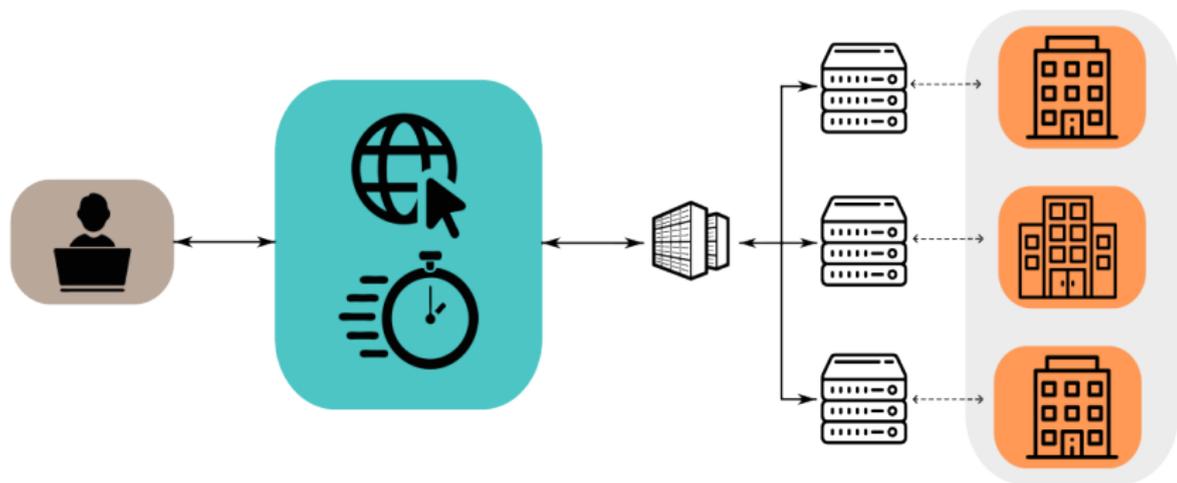
Предлагаемая модель единого дата-центра



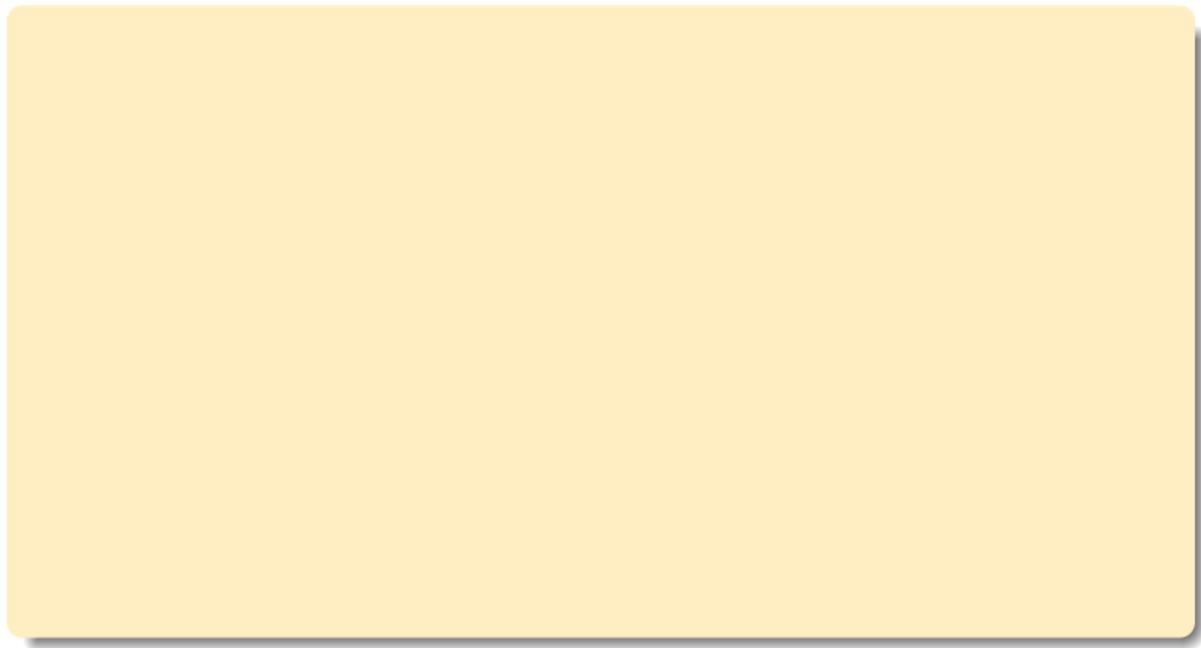
Предлагаемая модель единого дата-центра



Предлагаемая модель единого дата-центра



На базе подобного дата-центра становится возможным создавать гео-сервисы, покрывающие различные потребности современной геодезии



- Цифровые двойники позволяют принимать решения в условиях постоянной неопределённости и находят широкое применение в науках о Земле;

- Цифровые двойники позволяют принимать решения в условиях постоянной неопределённости и находят широкое применение в науках о Земле;
- объединение ансамблей моделей в единую динамическую и обучающую систему необходимо для прогноза изменений координат и высот пунктов;

- Цифровые двойники позволяют принимать решения в условиях постоянной неопределённости и находят широкое применение в науках о Земле;
- объединение ансамблей моделей в единую динамическую и обучающую систему необходимо для прогноза изменений координат и высот пунктов;
- разумно интегрировать геодезические цифровые двойники с моделями климата для взаимного уточнения;

- Цифровые двойники позволяют принимать решения в условиях постоянной неопределённости и находят широкое применение в науках о Земле;
- объединение ансамблей моделей в единую динамическую и обучающую систему необходимо для прогноза изменений координат и высот пунктов;
- разумно интегрировать геодезические цифровые двойники с моделями климата для взаимного уточнения;
- при этом нужно усовершенствование теории для связи между **всеми** геодезическими параметрами;

Заключение и работа на будущее

- Цифровые двойники позволяют принимать решения в условиях постоянной неопределённости и находят широкое применение в науках о Земле;
- объединение ансамблей моделей в единую динамическую и обучающую систему необходимо для прогноза изменений координат и высот пунктов;
- разумно интегрировать геодезические цифровые двойники с моделями климата для взаимного уточнения;
- при этом нужно усовершенствование теории для связи между **всеми** геодезическими параметрами;
- быстрый и безболезненный обмен данными — это важно!

- Цифровые двойники позволяют принимать решения в условиях постоянной неопределённости и находят широкое применение в науках о Земле;
- объединение ансамблей моделей в единую динамическую и обучающую систему необходимо для прогноза изменений координат и высот пунктов;
- разумно интегрировать геодезические цифровые двойники с моделями климата для взаимного уточнения;
- при этом нужно усовершенствование теории для связи между **всеми** геодезическими параметрами;
- быстрый и безболезненный обмен данными — это важно!

Спасибо за внимание!