Л15. Спутниковая гравиметрия



Лектор Кенесбаева А.

Содержание

- Спутниковая гравиметрия
- Спутниковый проект GRACE-FO
- Спутниковая миссия CHAMP

Спутниковая гравиметрия

Спутниковая гравиметрия – это метод измерения параметров гравитационного поля Земли с помощью определения траекторных орбитальных движений искусственных спутников Земли, а также комплекса дополнительных измерений выполняемых непосредственно на спутнике и по каналам «спутник-спутник» и «спутник-Земля».

Развитие метода слежения за орбитальным движением спутников начиналось со способа визуальных наблюдений и радиолокации с использованием сети наземных станций, впоследствии основным способом стало слежение «спутник – спутник» в различных вариациях: «верхний – нижний», «нижний – нижний» и т.д. Новые геофизические спутниковые миссии CHAMP, GRACE, GOCE и GRACE-FO позволили увеличить разрешение полученных по их данным спутниковых моделей гравитационного поля до 330 гармоник, что соответствует пространственному разрешению полуволн аномалий до 60 км.

Гравиметрич. ИСЗ первого поколения (60–90 гг. XX в.) представляли собой массивный объект, снабженный отражателями лазерного луча.

Они позволили определить главные особенности формы *геоида* путем наблюдения за орбитами спутников с наземных станций слежения.

Позднее на орбиты были выведены низколетящие КА (сред. высота орбит около 500 км) нового поколения, наблюдения за которыми ведутся также при помощи высоколетящих спутников систем глобального позиционирования (GPS).

Спутниковая гравиметрия

Особый раздел спутниковой гравиметрии составляет *альтиметрическая съемка*. Данные С.Г. используются в геодезии, а также при изучении глубинного строения и динамики Земли, динамики атмосферы и гидросферы.

В последние годы были запущены три очень значимых для геодезии спутниковых проекта — CHAMP, GRACE и GOCE, которые позволили достичь небывалой точности в глобальном определении гравитационного поля Земли (ГПЗ).

В каждом из этих проектов использовался свой принцип проведения измерений:

- ✓ CHAMP, GRACE — межспутниковое слежение (измерение дальности и скорости изменения дальности между двумя спутниками);
- ✓ GOCE — спутниковая градиентометрия (измерение разностей силы тяжести в пределах одного спутника).

Отличия также состояли в пространственном и временно́м разрешении полученных результатов.

Основная задача GOCE состояла в уточнении статического ГПЗ.

Целью же следующего проекта должно стать измерение вариаций ГПЗ в течение длительного временно́го промежутка на таком уровне пространственного и временно́го разрешений, которые позволят изучать и наблюдать распределение и перемещение масс в атмосфере, континентальной гидросфере, океанах, криосфере и литосфере.

Система спутник–спутник в режиме низкий–низкий, используемая в проекте GRACE, является наиболее эффективным инструментом для решения поставленных задач. Поэтому в будущее за конфигурациями, основанными на измерении расстояния между спутниками (двумя и более), летающими на низких орбитах (не более 500 км).

Спутниковый проект GRACE-FO

Миссия Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO) является партнерством между НАСА и Немецким исследовательским центром геонаук (GFZ).

GRACE-FO является преемником первоначальной миссии GRACE, которая вращалась вокруг Земли с 2002 по 2017 год.

GRACE-FO продолжит чрезвычайно успешную работу своего предшественника, испытывая новую технологию, призванную значительно улучшить точность своей измерительной системы.

GRACE-FO, который стартовал 22 мая 2018 года, продолжит работу по отслеживанию движения воды Земли для мониторинга изменений в подземном хранении воды, количества воды в крупных озерах и реках, влажности почвы, ледовых щитах и ледниках, а также уровня моря, вызванного добавлением воды в океан.

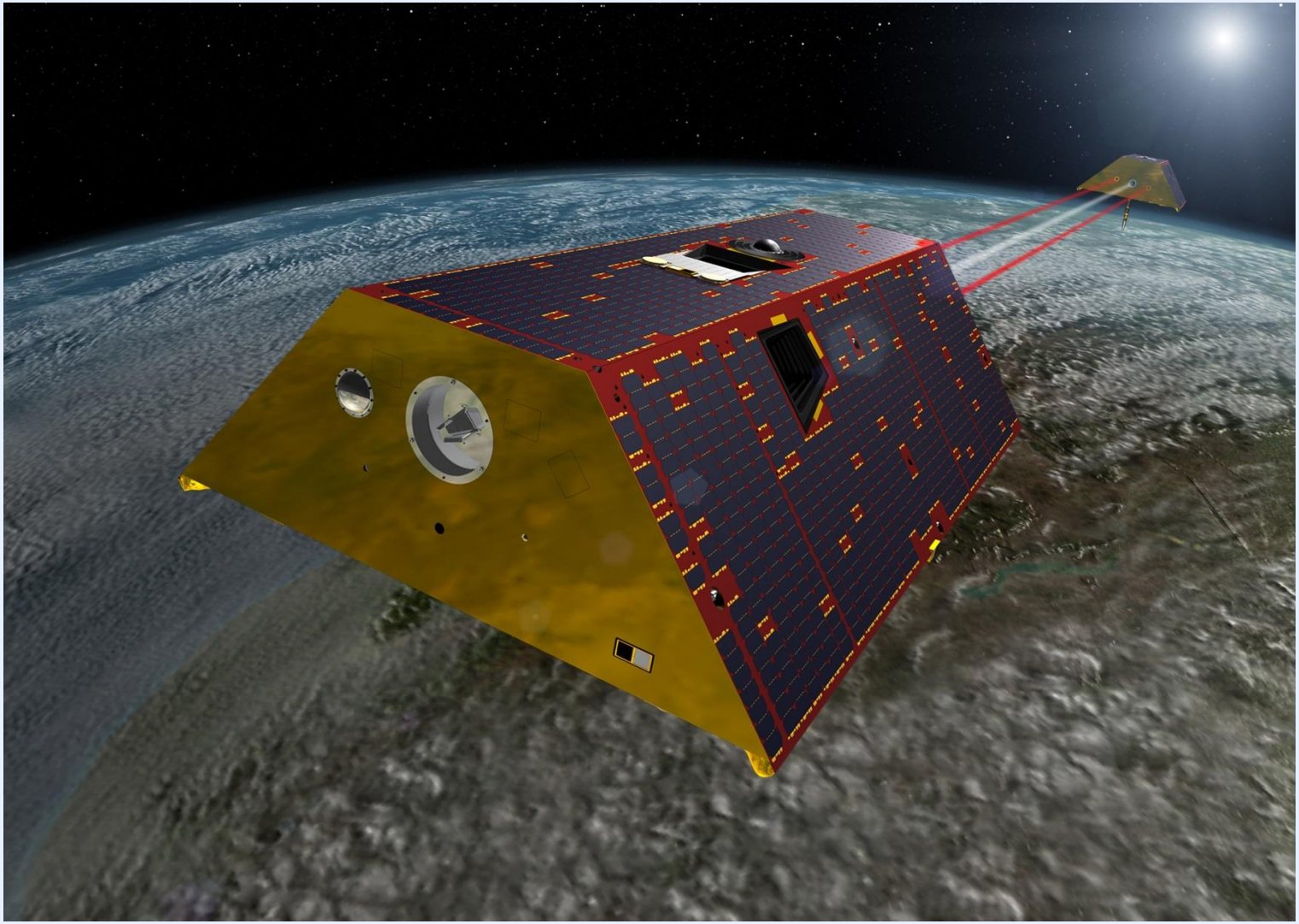
Эти открытия дают уникальное представление о климате Земли и имеют далеко идущие преимущества для общества и населения мира.

Исходные данные GRACE-FO будут представлять собой серию измерений, показывающих, дальность между двумя спутниками. Спутники-близнецы следуют друг за другом по орбите вокруг Земли, на расстоянии примерно 137 милями (220 км).

Они будут постоянно посылать друг другу микроволновые сигналы, чтобы измерить расстояние между ними.

Когда пара вращается вокруг Земли, области чуть более сильной гравитации (большая концентрация массы) сначала воздействуют на ведущий спутник, оттягивая его от следящего спутника.

Спутниковый проект GRACE-FO



Спутники-близнецы GRACE-FO будут следовать друг за другом по орбите вокруг Земли, разделенной примерно 137 милями (220 км).

Спутниковый проект GRACE-FO

По мере того как спутники продолжают движение, хвостовой спутник притягивается к ведущему спутнику, проходящему над гравитационной аномалией.

Изменение расстояния, незаметное для наших глаз, улавливается чрезвычайно точной микроволновой дальномерной системой на GRACE-FO предназначенной для обнаружения незначительных изменений расстояния между спутниками.

Высокоточный акселерометр, расположенный в центре масс каждого спутника, измеряет негравитационные ускорения (например, из-за атмосферного сопротивления), так что учитываются только ускорения, вызванные гравитацией.

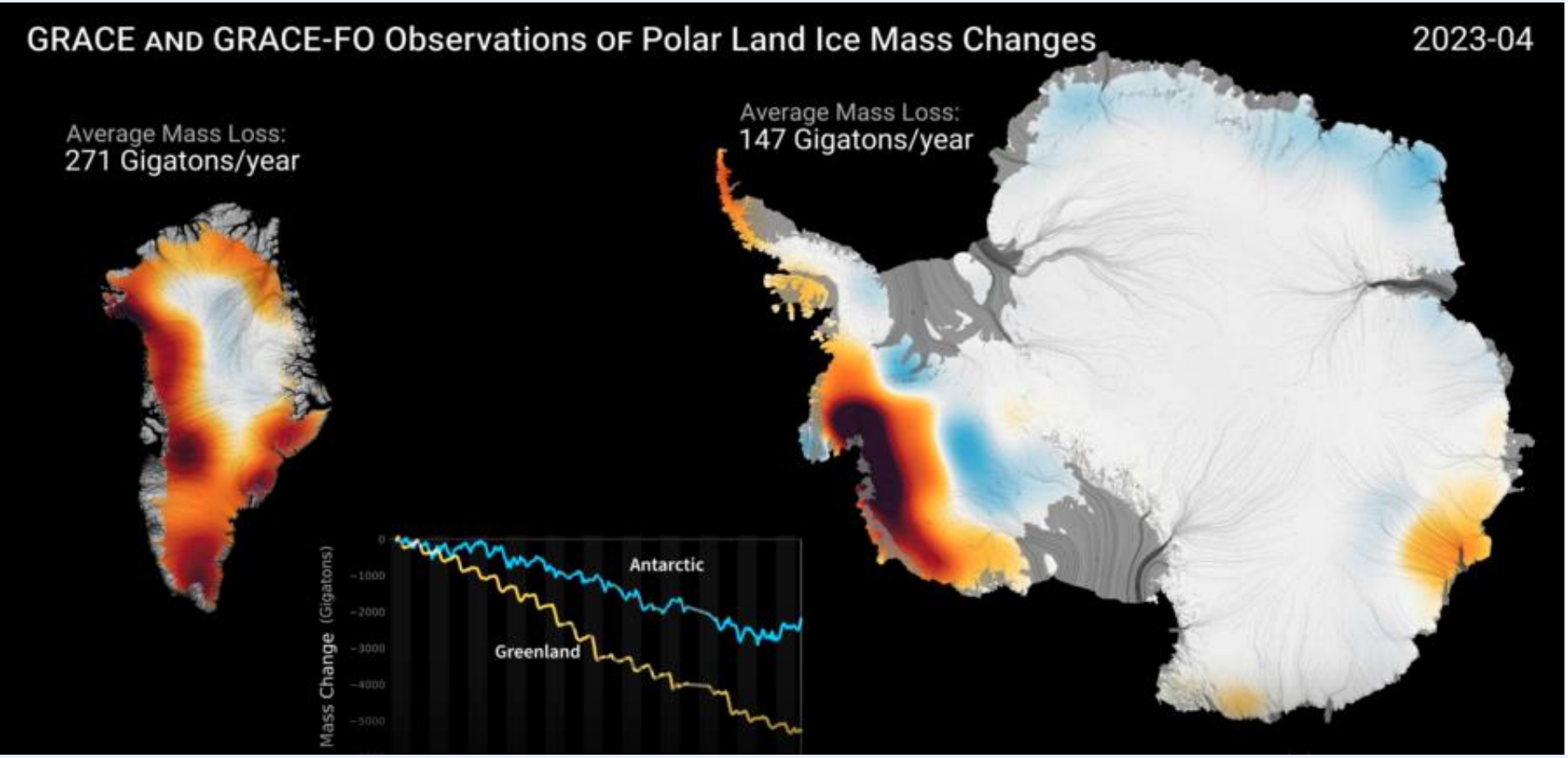
Приемники спутниковой глобальной системы позиционирования (GPS) определяют точное положение спутника над Землей с точностью до сантиметра или менее.

Вся эта информация со спутников будет использована для построения ежемесячных карт среднего гравитационного поля Земли, дающих подробную информацию о том, как масса, в большинстве случаев вода, движется вокруг планеты.

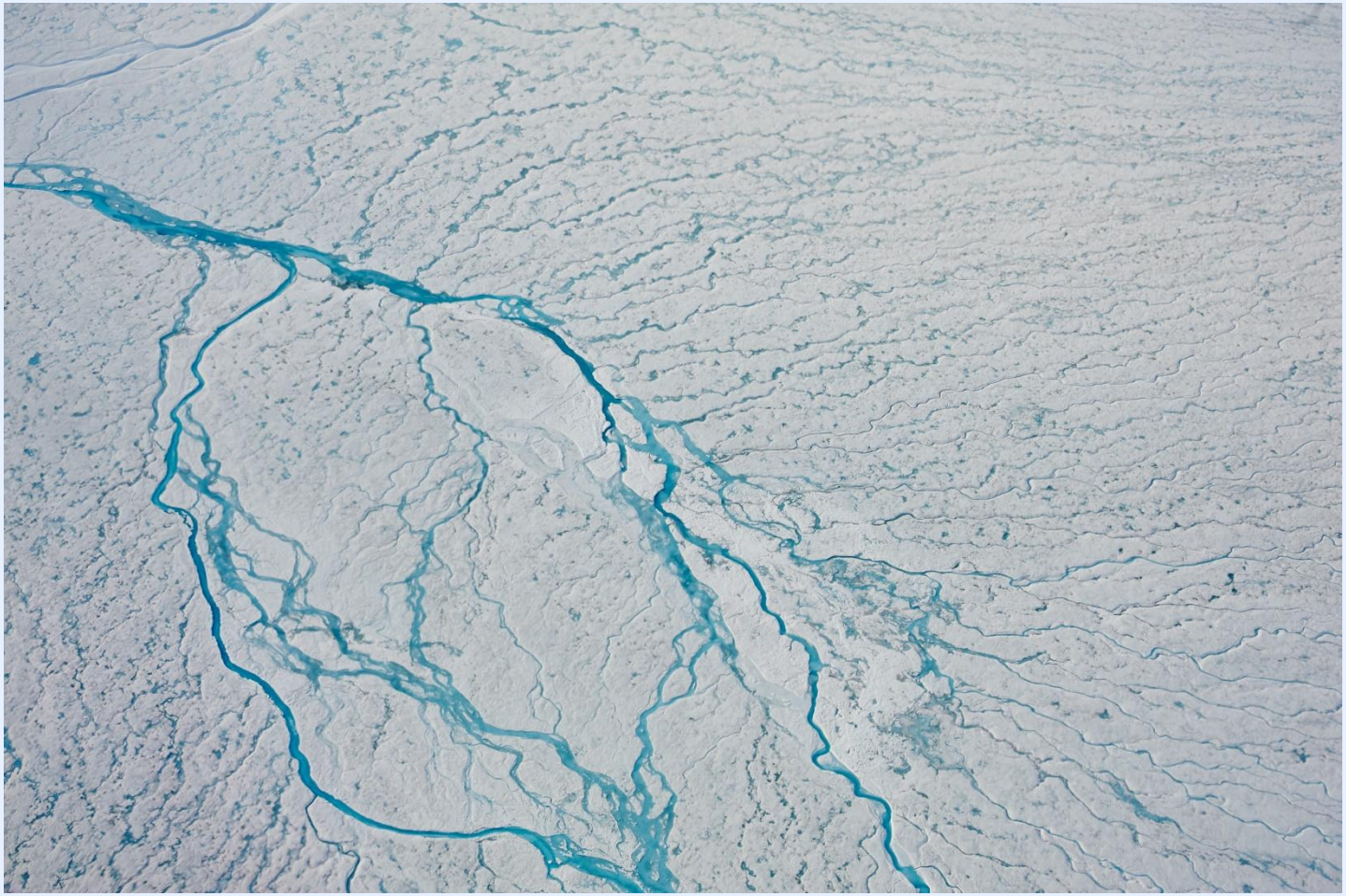
Данные GRACE-FO. Глобальные аномалии массы поверхности, наблюдаемые спутниками GRACE-FO (за месяц, указанный на карте).

Над сушей красные цвета указывают на количество воды ниже среднего уровня, в то время как синие цвета показывают количество воды выше среднего (включая лед, снег, влажность почвы и грунтовые воды.

Спутниковый проект GRACE-FO



Спутниковый проект GRACE-FO



Потоки талой воды в зоне абляции ледяного щита Гренландии, полет из Кангерлуссуака в Дай 3, июль 2012 г. (Фото: Институт Альфреда Вегенера / Зепп Кипфштуль)

https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/globale-erwaermung-erreicht-die-mitte-groenlands.html

Спутниковый проект GRACE-FO



Талые воды, стекающие по краю ледника в районе точки 660 (рядом с ледником Рассела), Кангерлуссуак, Гренландия, лето 2022 года (Фото: Институт Альфреда Вегенера / Зепп Кипфштуль).

Спутниковый проект GRACE-FO



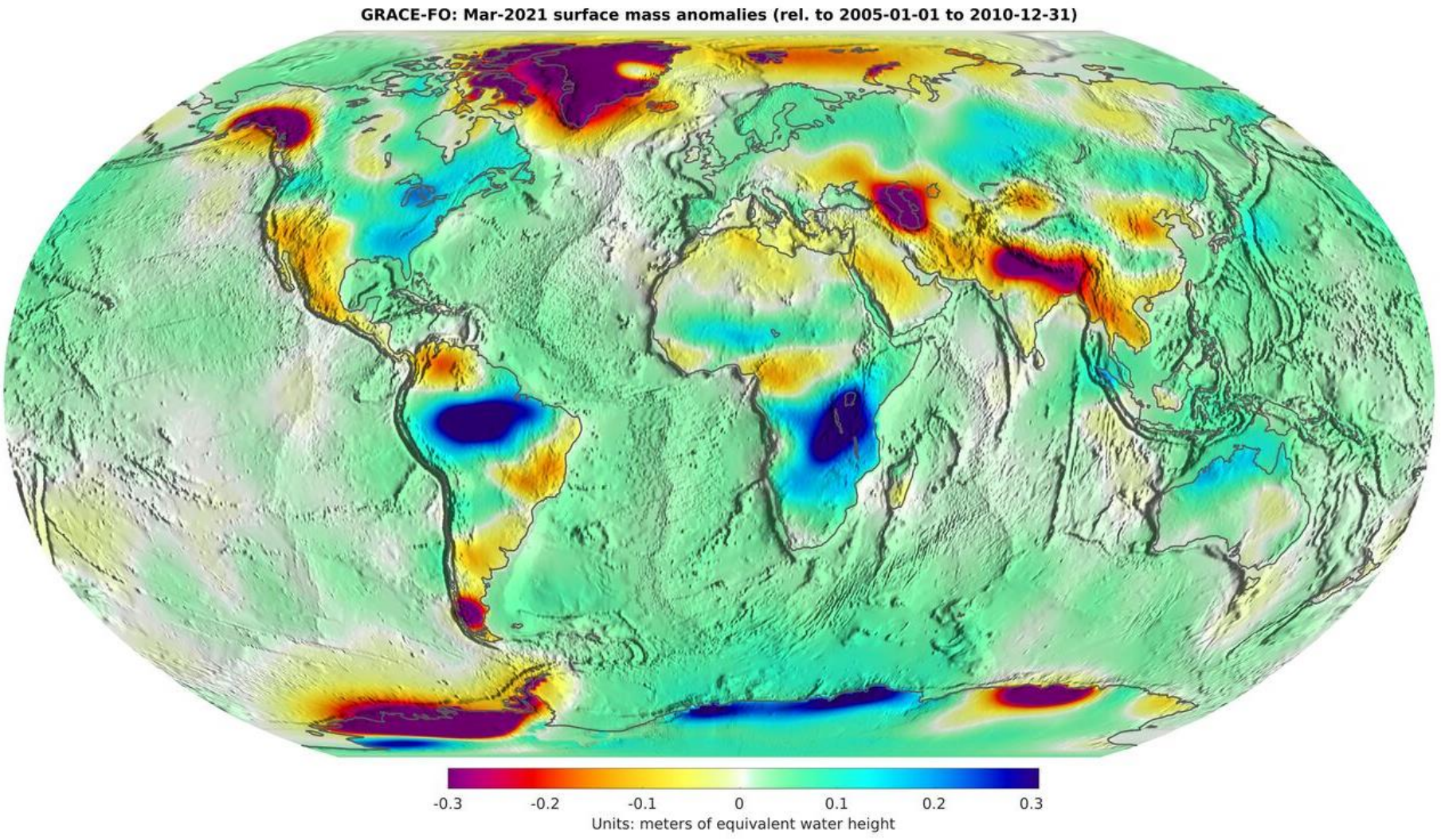
Фронт откола айсбергов ледника Рассел, Кангерлуссуак, Гренландия, конец июля 2022 года (Фото: Институт Альфреда Вегенера / Зепп Кипфштуль)

Спутниковый проект GRACE-FO



Талые воды, стекающие по краю ледника в районе точки 660 (неподалеку находится ледник Рассел), Кангерлуссуак, Гренландия, конец августа 2022 года (Фото: Институт Альфреда Вегенера / Зепп Кипфштуль).

Спутниковый проект GRACE-FO



Спутниковый проект GRACE-FO

Над океанами красные цвета указывают на давление дна океана ниже среднего, в то время как синие цвета показывают давление дна выше среднего.

Изменения давления на дне океана связаны с крупномасштабными колебаниями океанских течений, а также с общими изменениями уровня моря в результате изменения массы океана.

Изменения в распределении массы внутри и между атмосферой Земли, океанами, грунтовыми водами и ледяными щитами являются фундаментальными индикаторами крупномасштабной динамики планеты.

В течение более чем 15 лет миссия NASA Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) ежемесячно отслеживала массовые изменения, оказывая далеко идущее влияние на наше понимание земной системы и того, как она развивается.

GRACE Follow-On (GRACE-FO) продолжает наследие GRACE, отслеживая движение земной воды и изменения поверхностной массы по всей планете.

Мониторинг изменений в ледяных покровах и ледниках, приповерхностных и подземных хранилищах воды, количества воды в крупных озерах и реках, а также изменений уровня моря и океанских течений обеспечивает комплексное глобальное представление о том, как развивается водный цикл Земли и энергетический баланс.

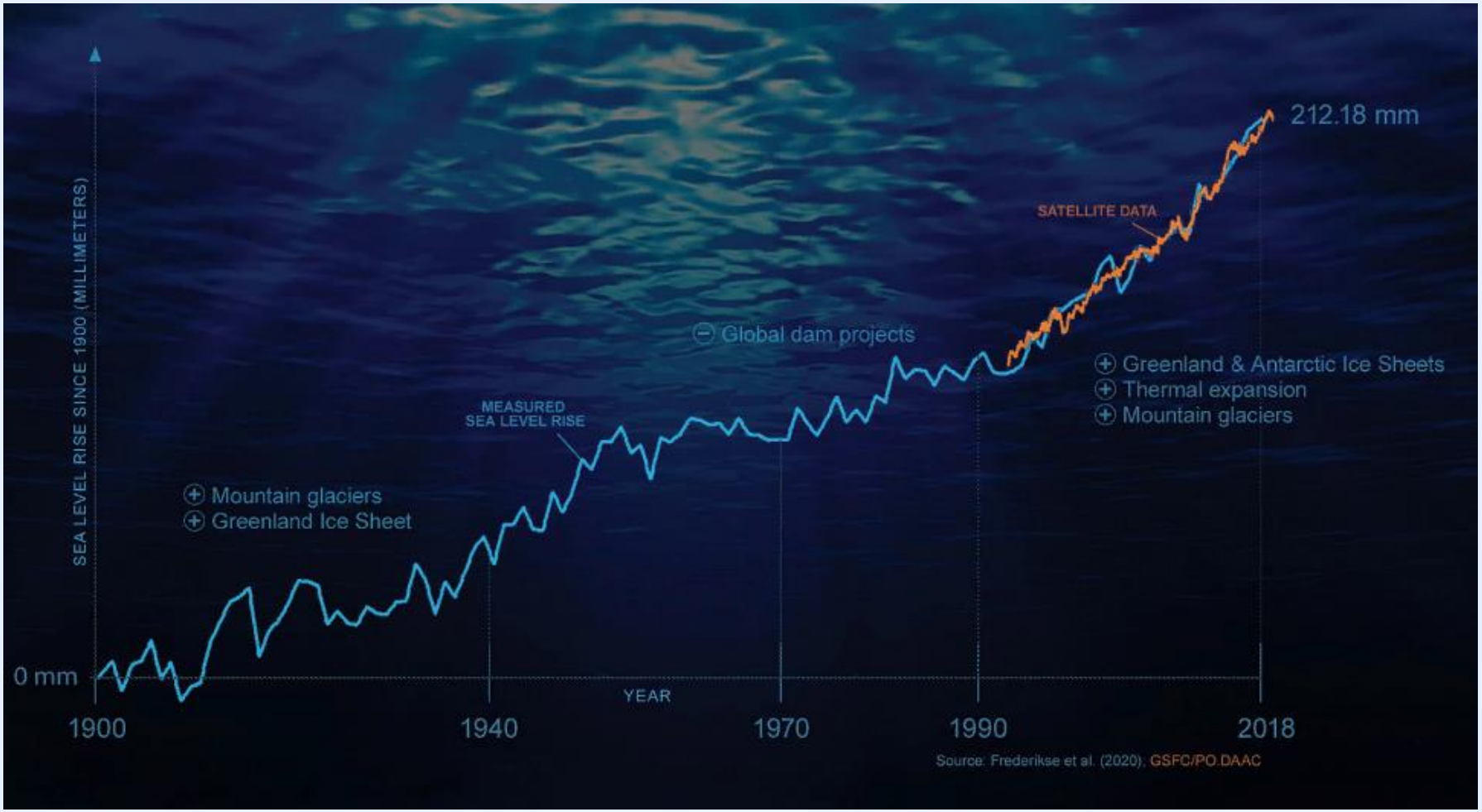
Это измерения, которые имеют важное применение в повседневной жизни.

Спутниковый проект GRACE-FO



Эта аэрофотосъемка показывает быстро движущиеся реки талой воды, протекающие по Гренландскому ледовому щиту, региону, на который в сочетании с антарктической талой водой и тепловым расширением приходится две трети наблюдаемого глобального среднего подъема уровня моря.

Спутниковый проект GRACE-FO



Эта инфографика показывает подъем уровня моря с 1900 года. До 1940 года ледники и талые воды Гренландии доминировали на подъеме; проекты плотин замедлили подъем в 1970-х годах. Теперь ледяной покров и ледник тают, плюс тепловое расширение, доминируют над подъемом. Данные о приливах показаны синим цветом, а спутниковые-оранжевым

Спутниковая миссия CHAMP

CHAMP-это финансируемая немецким BMBF геофизическая миниспутниковая миссия GFZ (GeoForschungsZentrum) в Потсдаме, Германия, в сотрудничестве с DLR (Немецким аэрокосмическим центром).

Спутник был построен немецкой космической промышленностью с целью развития высокотехнологичных возможностей, особенно в восточногерманской космической промышленности.

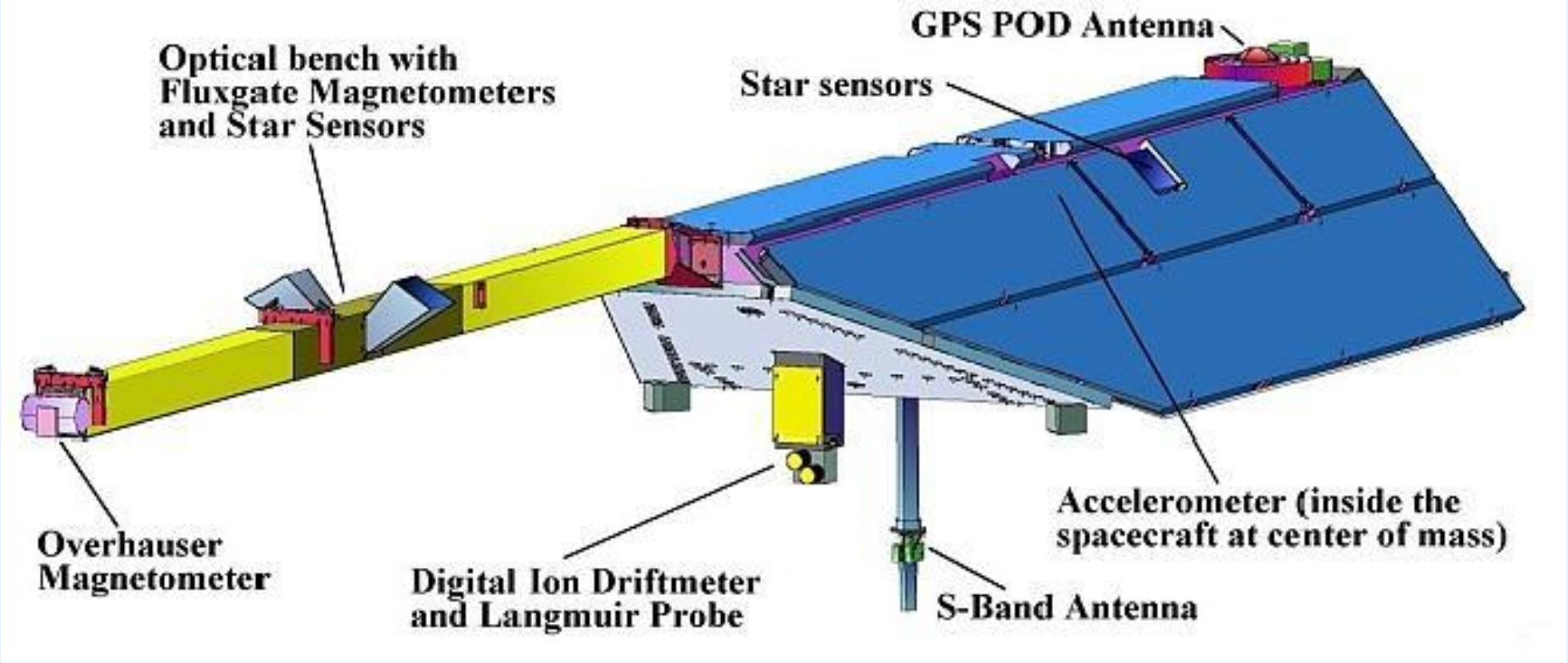
Генеральным подрядчиком космического корабля является компания DJO (Jena Optronic GmbH) в Йене, дочерняя компании DASA (ныне EADS Astrium GmbH).

Общие научные цели заключаются в следующих областях исследований:

- ✓ Глобальное длинноволновое и средневолновое восстановление статического и временного переменного гравитационного поля Земли с помощью анализа возмущений орбиты для использования в геофизике (твердая Земля), геодезии (опорная поверхность) и океанографии (океанские течения и климат), подкрепленное технико-экономическим обоснованием GPS-альтиметрии для мониторинга поверхности океана и льда.
- ✓ Глобальное восстановление магнитного поля Земли (твердая Земля и солнечно-земная физика)
- ✓ Зондирование атмосферы/ионосферы с помощью радиозакрытия GPS с применением в прогнозировании погоды, навигации, космической погоде и глобальном изменении климата.

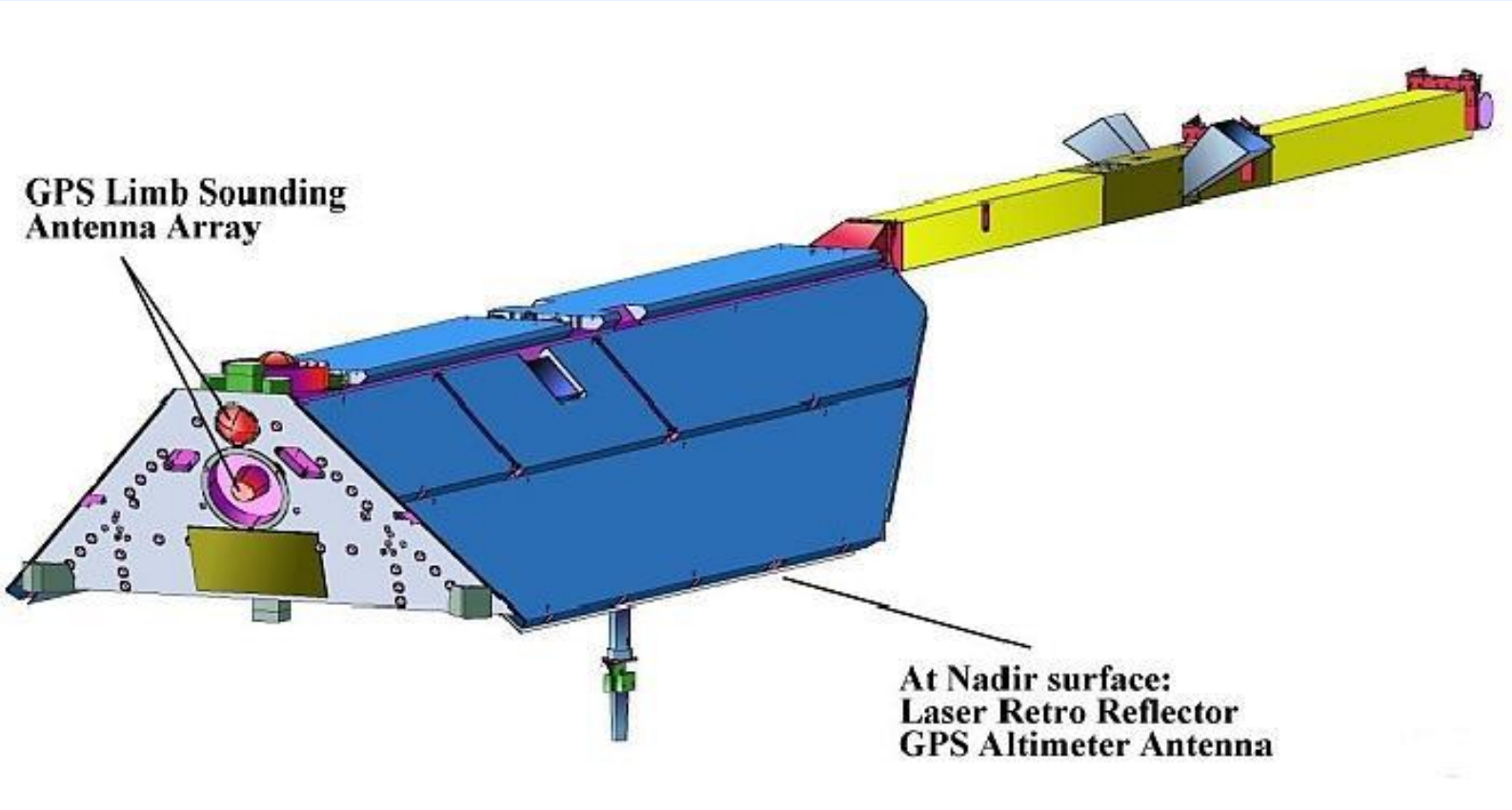
https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/champ

Спутниковая миссия CHAMP



Конструкция спутника (FLEXBUS фирмы EADS Astrium GmbH) представляет собой трапециевидный корпус с габаритными размерами 4,3 м в длину x 0,75 м в высоту x 1,6 м/0,4 м в ширину в основании/верхней части.
Стрела длиной 4 м вмещает магнитометрический узел (стрела номинально направлена в направлении полета).

Вид сзади ИСЗ "ЧЕМПИОН"



Запуск: Запуск космического аппарата состоялся 15 июля 2000 года с Плесецка на российской ракете-носителе "Космос - 3М" - вместе с двумя вторичными полезными грузами: спутником MITA ASI(Италия) и наноспутником Rubin OHB (Бремен).
Начальная орбита: перигей = 418 км, апогей = 474 км (орбита распадается примерно до 300 км в конце расчетного срока службы в пять лет), наклонение = 87,275°. Период около 94 минут. Орбита близка к полярной, но не синхронна с солнцем.

Спутниковая миссия CHAMP

CESS (Грубый Датчик Земля-Солнце). Разработанный Astrium запатентованный пакет ориентации, состоящий из шести одиночных сенсорных головок, расположенных на S/C таким образом, что обеспечивается всенаправленный и беспрепятственный обзор пространства.

Каждая головка имеет две оптические поверхности одинакового размера с различными свойствами в спектральных диапазонах (ИК-поглощение одно и то же, но визуальное поглощение разное).

Термисторы служат детекторами. Аппаратная конфигурация позволяет проводить измерения температуры, обусловленные освещением Земли и Солнца.

Измерения взвешиваются, усредняются и экстраполируются на установившиеся равновесные температуры. Алгоритм выводит общий тепловой поток на основе входных температур и корректирует альбедо.

На выходе получается вычисленный вектор Земли и вычисленный вектор Солнца в системе координат S/C.

На CHAMP CESS служит недорогим и маломассовым демонстрационным пакетом. Цель конструкции CESS состоит в том, чтобы позволить будущим S/C вернуться к безопасному управлению ориентацией в случае отказа или ухудшения обслуживания компонентов обычной системы управления ориентацией. CESS предлагает также свои услуги по первоначальному приобретению и грубому указанию в целом.

Спутниковая миссия CHAMP

Статус миссии:

После более чем 10 лет пребывания на орбите и 3718 дней предоставления информации исследователям на земле спутник сгорел 19 сентября 2010 года над Охотским морем, где-то между Восточной Сибирью, российским полуостровом Камчатка и Японией. [8)]

Комплект датчиков (TRSR-2, STAR, LRR, MIAS, ASC, DIDM).

BlackJack-это прибор нового поколения TRSR (TurboRogue Space Receiver) и GPS/MET heritage, впервые запущенный на SRTM. Блэкджек предоставляется и строится NASA/JPL. Прибор также называют **TPCP-2**. Задачи заключаются в выполнении следующих функций: [12)] [13)]

- BlackJack -это двухчастотная система GPS-приемника для точного определения орбиты (диапазон точности см) и непрерывного покрытия
- Прибор наблюдает параллельно ионосферное содержание электронов и обеспечивает атмосферное зондирование, позволяющее выводить атмосферные вертикальные профили плотности, давления, температуры (водяного пара) и ионосферные профили электронной плотности (контроль рефракционной оккультации)
- Экспериментальное использование сигналов GPS, отраженных от поверхности океана, для альтиметрических измерений.

LEO CHAMP S/C и спутниковая группировка MEO GPS устанавливают так называемую связь high-low satellite-to-satellite (SST) для прибора BlackJack.

Спутниковая миссия CHAMP

BlackJack оснащен новым DSP (Data Signal Processor) ASIC, 16-канальным GPS-прибором, способным отслеживать до 12 сигналов GPS одновременно для POD (Точное определение орбиты); в каждом приемнике есть четыре ASIC, поэтому прибор может отслеживать до 48 сигналов параллельно, в любом режиме (C/A, P или без кода). Две новые возможности ASIC (среди нескольких) :

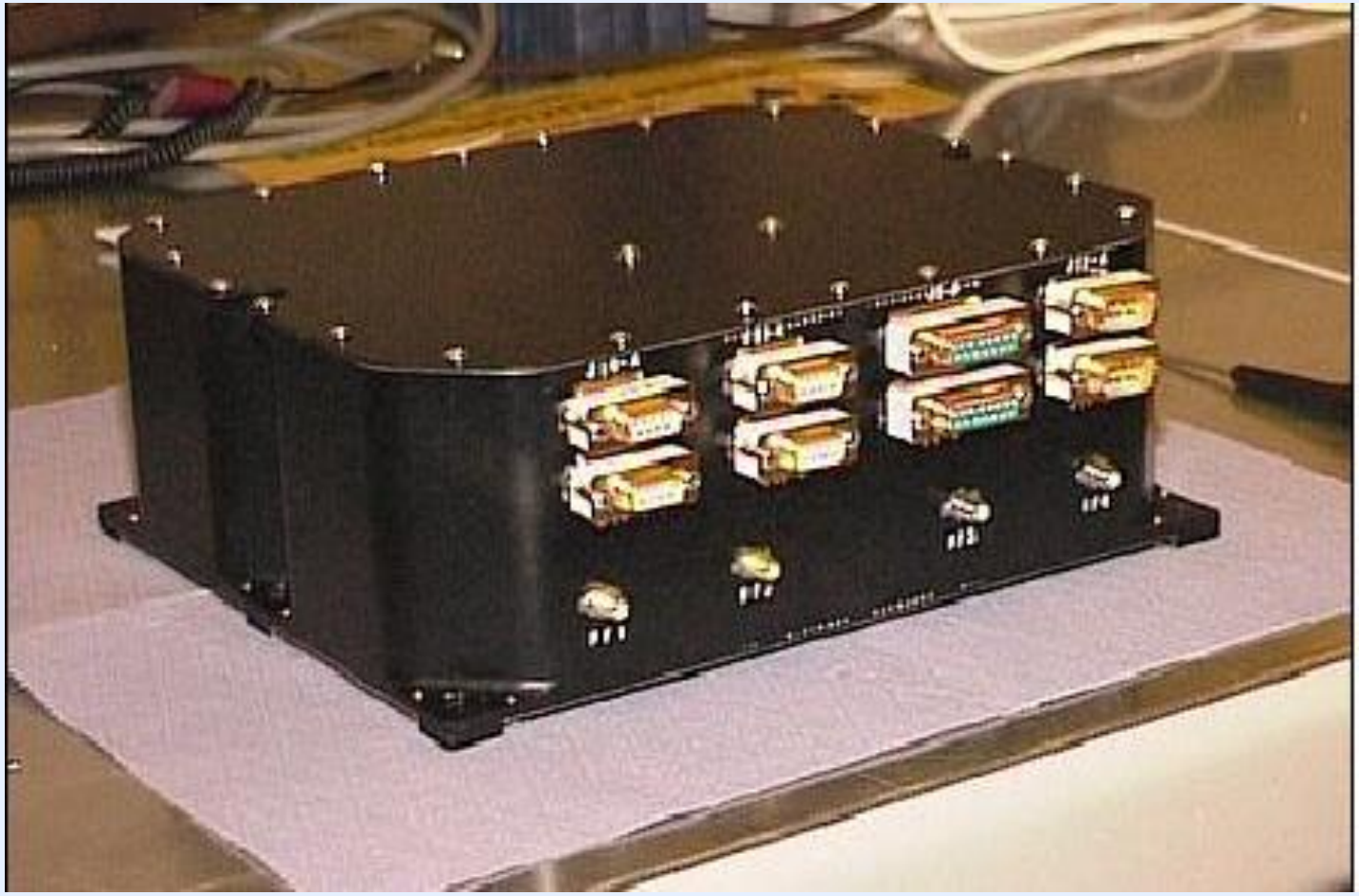
• Запатентованный новый усовершенствованный “квазикодовый” трекинг L2, обеспечивающий погрешность измерения, сравнимую с той, которая достигается прибором TRSR с P-кодовым трекингом.

• Специальное программное обеспечение для атмосферной оккультации и отражения океана. Приемная система БлэкДжека состоит из RPA (Receiver/Processor Assembly), содержащего секции радиочастотного понижающего преобразователя, внутреннюю шину и карты процессоров с холодным резервированием базовой полосы, радиочастотные коаксиальные кабели к 4 антеннам и сами антенны.

Антенны РПА направлены: в зенитном направлении, две в кормовом направлении и в надирном направлении. Антенна, направленная в зенит, используется для одновременного отслеживания до двенадцати спутников GPS для определения траектории движения корабля.

Приемник выполняет фазовые измерения как GPS-частот L1 и L2, так и кодовых псевдодальностей. Обеспечивает полное навигационное решение, то есть положение, скорость и время для использования в бортовом прогнозировании орбиты и управлении ориентацией, в дополнение к прямым измерениям фазы и псевдодиапазона от спутника GPS-LEO к спутнику слежения, которые используются для точного восстановления автономной орбиты.

Спутниковая миссия CHAMP



Вид полетного GPS-приемника TPCP-2

Спутниковая миссия CHAMP

Вид полетного GPS-приемника TPCP-2.

STAR-это акселерометрическая система, предоставленная CNES и разработанная ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatials), Франция.

Цель - измерить все негравитационные ускорения спутника (сопротивление, солнечное и земное радиационное давление), чтобы определить гравитационное поле Земли по чисто гравитационным возмущениям орбиты (орбита из БлэкДжека).

Принцип измерения акселерометра основан на электростатическом подвешивании пробной массы в клетке.

Мгновенное положение пробной массы измеряется тремя емкостными датчиками, которые позволяют определить вектор ускорения.

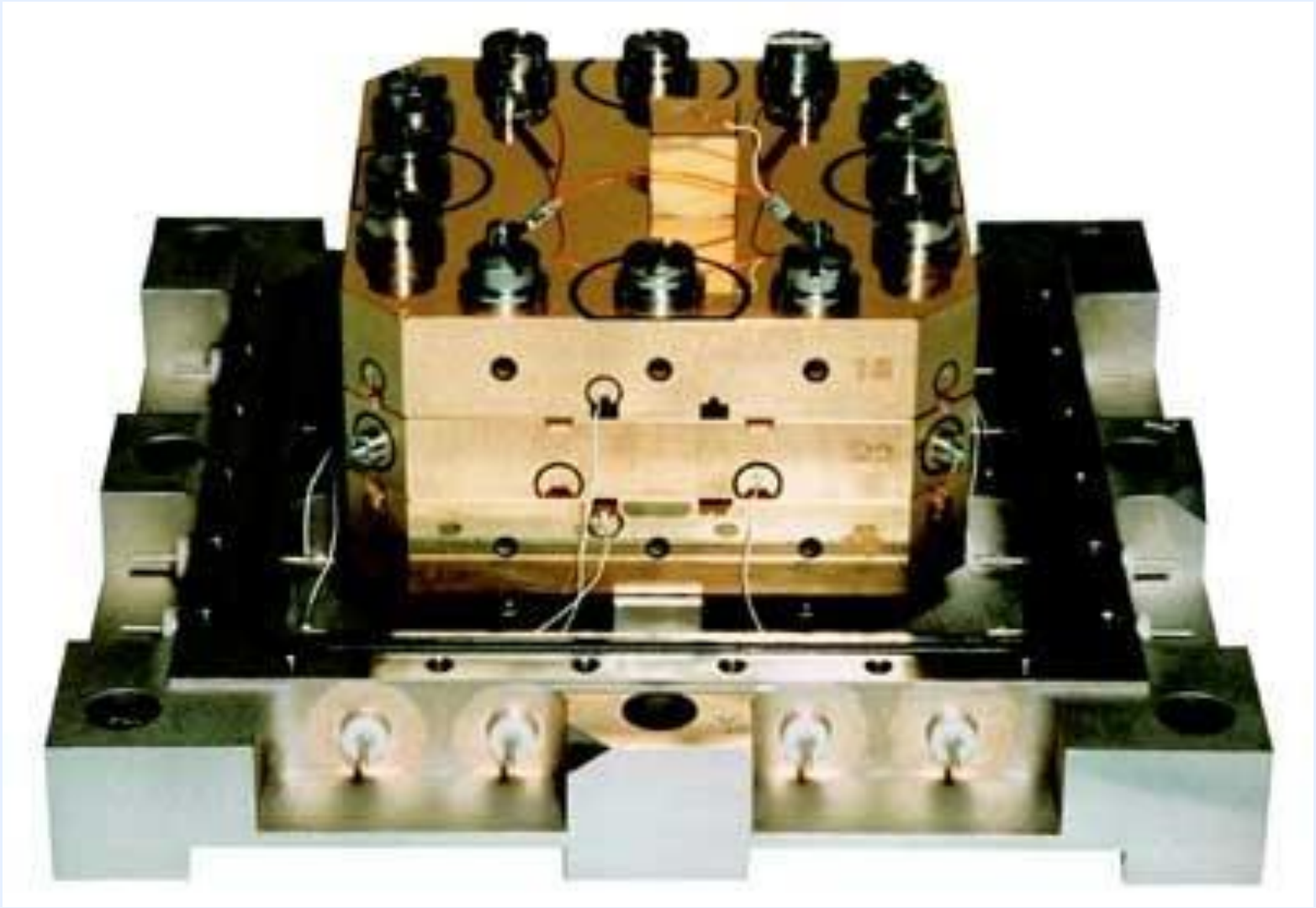
Прибор имеет динамический диапазон ±10-4 мс$^{-2}$, разрешение лучше ±3 х$^{10-9}$ мс$^{-2}$и частотный диапазон от 10^{-1} до 10 -4 Хз.

Звездный прибор расположен в центре тяжести ЧЕМПИОНА, чтобы минимизировать влияние измерительных помех, вызванных ускорениями вращения и градиентами силы тяжести.

STAR также соединена со звездным датчиком (ASC фирмы DTU, Дания) с двумя головками для обеспечения ориентации осей акселерометра.

Пробная масса акселерометра расположена в центре тяжести чемпиона.

ЗВЕЗДНЫЙ акселерометр для миссии CHAMP



ЗВЕЗДНЫЙ акселерометр для миссии CHAMP

ЗВЕЗДНЫЙ акселерометр для миссии CHAMP

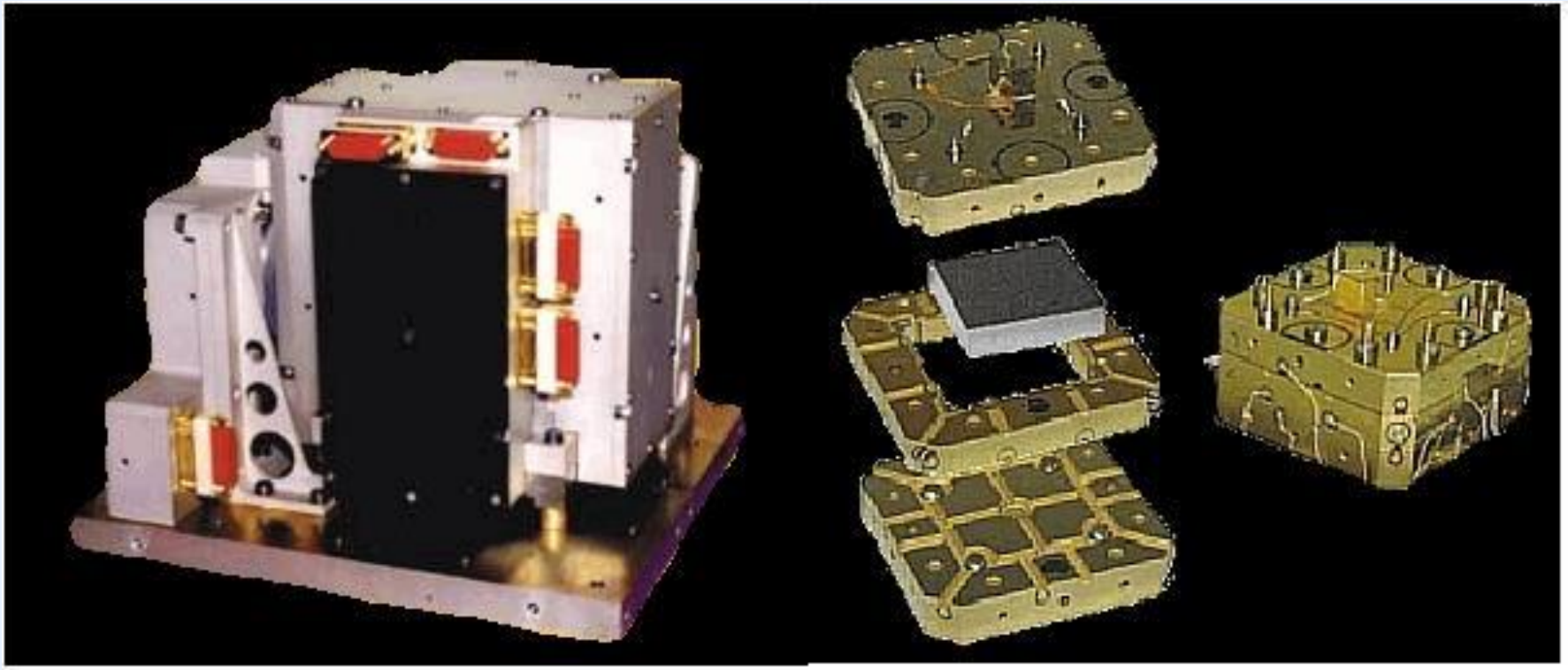
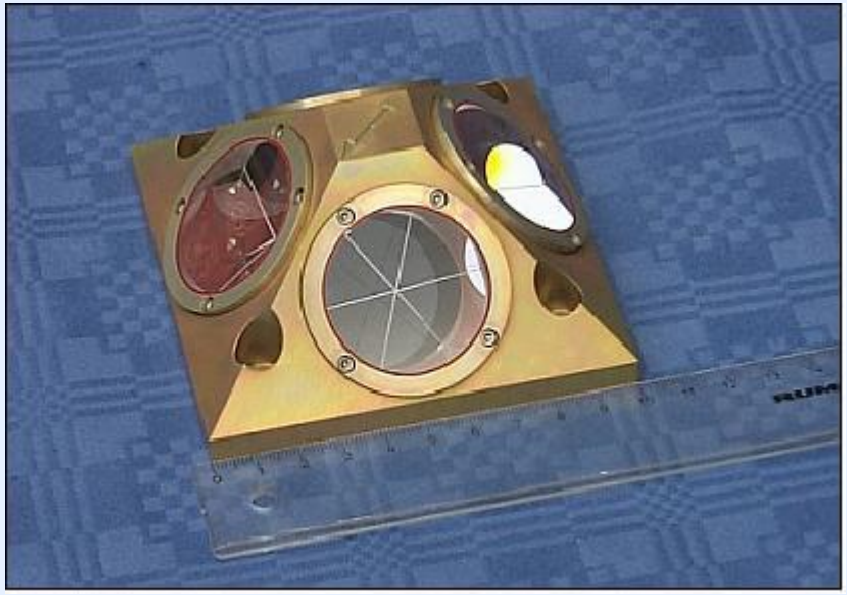


Иллюстрация ЗВЕЗДНОГО акселерометра (слева) и разнесенный вид прототипа акселерометра (справа)

LRR (Лазерный Светоотражатель) для миссии CHAMP

LRR разрабатывается в GFZ. Пассивное оптическое устройство для точного спутникового слежения с наземных лазерных дальнобойных станций зеркальной сети. LRR состоит из четырех кубических угловых призм для отражения коротких лазерных импульсов обратно на передающую SLR наземную станцию.
Лазерные импульсы с земли, как правило, имеют длительность 35-100 пикосекунд, обеспечивая точность одиночного выстрела от 1 до 2 см без каких - либо неясностей. Данные LRR используются для а) точного определения орбиты в связи с Блэкджеком для восстановления гравитационного поля, б) калибровки бортовой системы БлэкдЖека и в) технологических экспериментов, таких как двухцветное ранжирование для достижения точности миллиметрового диапазона.



Полезные ссылки

- Кузьмин, В.И. Гравиметрия [Текст]: учеб. пособие / В.И. Кузьмин. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 193 с.
- Гравиметрия : учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-56 01 02 «Геодезия»/сост. и общ. ред. Г. А. Шароглазовой. – Новополоцк : ПГУ, 2006 – 196 с.
- https://gracefo.jpl.nasa.gov/data/grace-fo-data/ Спутниковый проект GRACE-FO
- Извести вузов. Журнал «Геодезия и аэрофотсьемка». О планируемых проектах спутниковой гравиметрии. №6, 2015. http://www.miigaik.ru/journal/archive/2015/6.pdf
- https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/champ Спутниковая миссия CHAMP