



Супутникова лазерна локація

Напряв «Геодезія, картографія,
землеустрій»

Лекція з супутникової геодезії

Лектор: А. О. Ляшченко



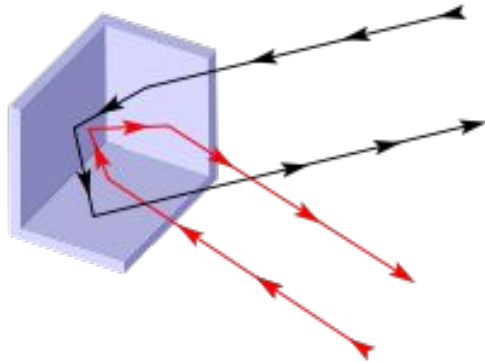
Завдання космічної геодезії

- Створення на основі космічних методів глобальної системи відліку , заснованої на положенні позагалактичних джерел.
- Створення загальземного системи відліку.
- Оперативне координатно- часове забезпечення земних об'єктів за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем .
- Координатно- часове забезпечення космічних польотів.
- Вивчення гравітаційного поля Землі , Місяця і планет з використанням супутникових вимірювань.
- Вивчення фігури Землі , Місяця і планет з використанням супутникових вимірювань.

Методи космічної геодезії

- Візуальні спостереження ШСЗ
- Оптико -механічні спостереження ШСЗ
- Фотографічні спостереження ШСЗ
- Лазерні спостереження ШСЗ**
- Радіотехнічні спостереження ШСЗ
- Системи супутник- супутник**
- супутникова градієнтометр
- інтерферометричні спостереження

- **Супутникова лазерна локація (SLR)**
глобальна мережа станцій спостереження, яка вимірює час проходження ультракоротких імпульсів світла до супутників , оснащених **ретрорефлектор** . Це забезпечує вимірювання миттєвих діапазонів точності рівня міліметра , які можуть бути забезпечити точне вимірювання орбіт супутників.
- Супутникова лазерна локація є перевіреним геодезичним методом зі значним потенціалом для важливий внесок у наукові дослідження системи Земля / Атмосфера / океан . Це найбільш точний метод в даний час доступна для визначення геоцентричної положення супутника Землі , що дозволяє для точного калібрування радіолокаційних висотомірів і поділу довгострокового приладів дрейфу від світських змін до топографії океану.



Ретрорефлектор (іноді званий retroreflector або cataphote)

Катафот ([др.-грец.](#) ката- — приставка із значенням підсиення+ φῶς «свет»), **кутовий відбивач**, **флікер** являє собою пристрій, або поверхню, яка відбиває світло назад до його джерела з мінімумом розсіювання.

Фронті електромагнітної хвилі відбивається назад уздовж вектора, паралельного, але протилежного за напрямком від джерела хвилі. Кут падіння, при якому пристрій або поверхня відбиває світло таким чином більше нуля, на відміну від плоского дзеркала, який робить це, тільки якщо дзеркало точно перпендикулярно до фронту хвилі, що мають нульовий кут падіння.



Приймаюча станція геодезичної обсерваторії Wettzell, Баварія.

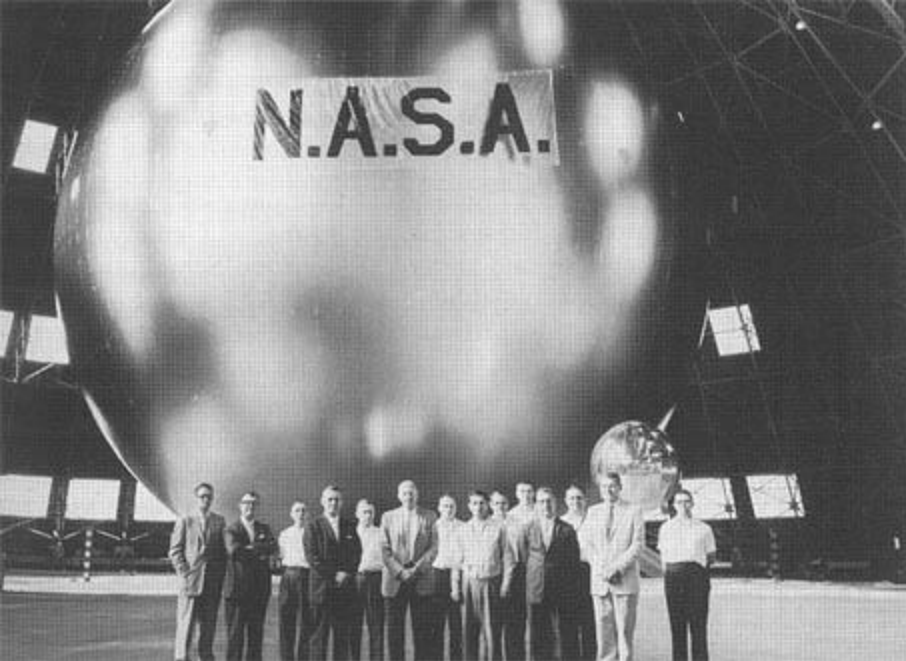


Можливість виміряти варіації з часом в гравітаційному полі Землі і контролювати рух мережі станцій по відношенню до центру мас Землі разом з можливістю контролювати вертикальний рух в абсолютному вимірі , робить його унікальним для моделювання та оцінки довгострокових змін клімату шляхом :

- Забезпечуючи систему відліку для післяльодовикового танення , рівня моря і зміна обсягу льоду
- Визначення масовий перерозподіл мас твердої Землі , океану , й атмосфери
- моніторинг реакції атмосфери на сезонні коливання сонячного випромінення .
SLR надає унікальну можливість для перевірки передбачень загальної теорії відносності.

SLR станції складають важливу частину міжнародної мережі космічних геодезичних обсерваторій , у тому числі РСДБ , GPS , Доріс і PRARE

Ця мережа є відмовостійкою, коли інші радіометричні системи стеження не увінчалися успіхом.

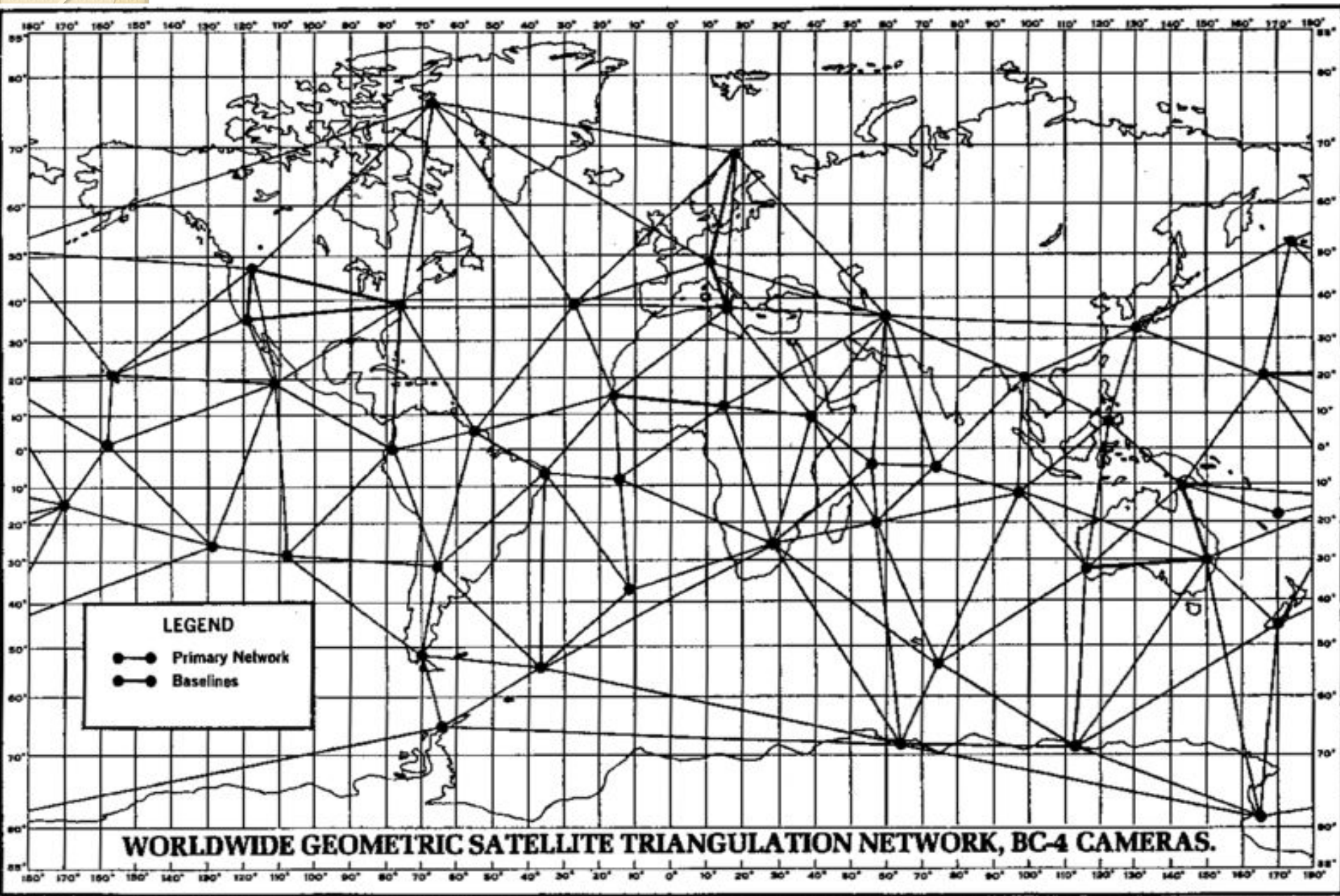


ШСЗ серії Ехо були розроблені для досліджень в галузі використання супутникових космічних ретрансляторів.

Радіо обладнання (крім простого радіомаяка) на супутнику було відсутнє, він являв собою супутник-балон: сферу з тонкої поліефірної плівки (товщина 0,127 мм) з алюмінієвим напиленням для відображення радіосигналу. У ході запуску супутник в складеному стані розміщувався під обтічником ракети-носія: всередину полімерної сфери було поміщено деяку кількість порошкоподібного хімічного реагенту, який, газифікуємо у вакуумі, надував супутник-балон після виведення на орбіту.

Важливим завданням програми стали дослідження щільності екзосфери Землі: через свого значного розміру і велику парусність (при малій масі) Ехо-1 швидко гальмувався у верхній атмосфері Землі. Деградація орбіти супутника дозволила визначити багато параметрів середовища на його висоті, включаючи періодичні зміни в щільності верхньої атмосфери Землі через вплив сонячного вітру (сонячної активності). Тиск сонячного світла (ефект «сонячного вітрила») на супутник також виявилось досить помітним.

Чимале значення мали й оптичні спостереження супутника. Завдяки дзеркальному покриттю і великому розміру Ехо-1 був найяскравішим штучним супутником на нічному небі: його зоряна величина досягала – 1m. За візуальними і фотографічними спостереженнями Ехо-1 були отримані результати в галузі супутникової геодезії.



LEGEND

- Primary Network
- Baselines

WORLDWIDE GEOMETRIC SATELLITE TRIANGULATION NETWORK, BC-4 CAMERAS.



- **PAGEOS** (англ. PAssive Geodetic Earth Orbiting Satellite - пасивний геодезичний супутник Землі) - штучний супутник-балон, виведений на орбіту NASA в червні 1966 року. Pageos представляв собою сферу з тонкої (0,0127 мм) алюмінійовані полімерної плівки діаметром 31 метр. Маса - 56 кг. Супутник використовувався для спостережень за програмою світової мережі супутникового триангуляції (Worldwide Satellite Triangulation Network) - спільній програмі США та Швейцарії, яка працювала в 1969-1973 .

Дана мережа складалася з 46 станцій (відстань між станціями 3000-5000 км) .Станції розташовувалися на всіх континентах. Вимірювання, проведені за результатами спостережень супутника, дали точність визначення координат на поверхні Землі близько 3-5 метрів (у 20 разів точніше результатів наземної триангуляції) .

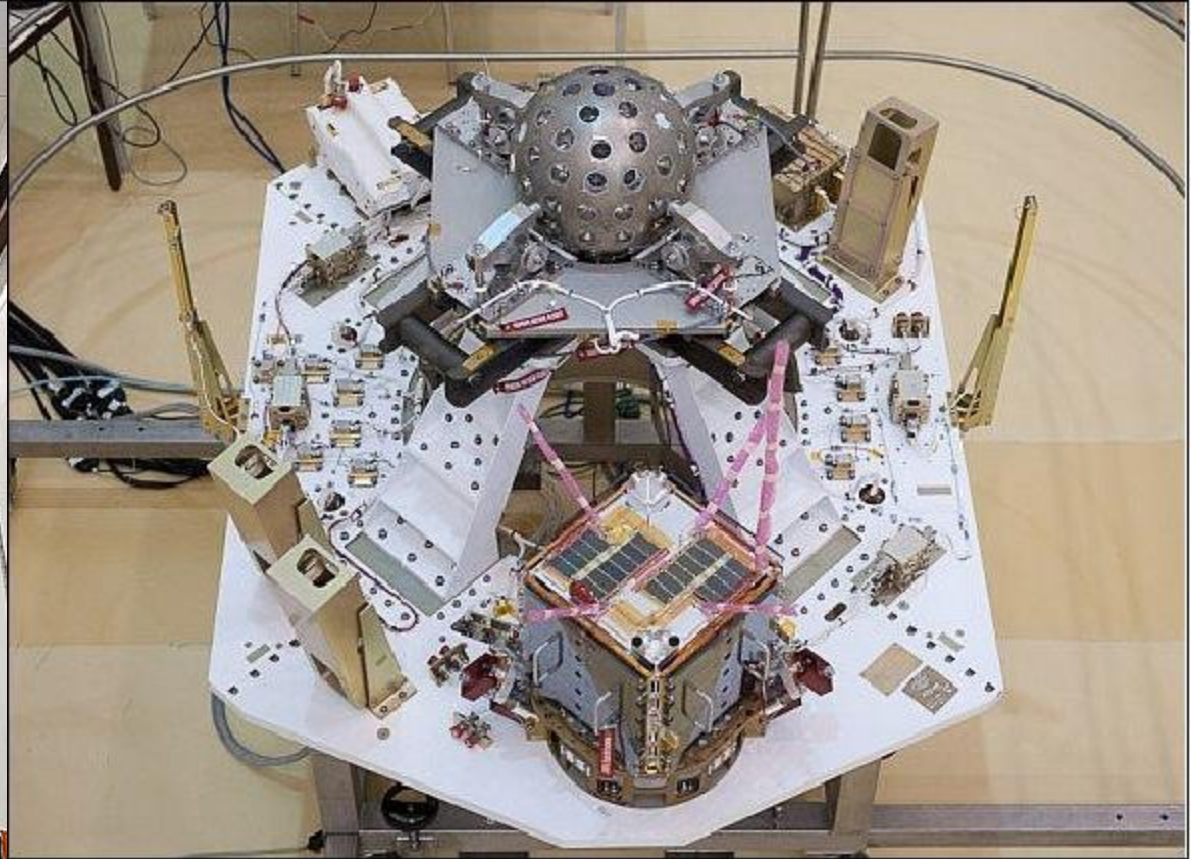
PAGEOS був виведений на полярну орбіту з високим нахилом (85-86 °) висотою близько 4000 км . Супутник проіснував до липня 1975 року.

- LAGEOS і LAGEOS II (LAsEr GEODynamics Satellite) - супутники , розроблені і запуснені міжнародною групою дослідників (NASA та ін) для вивчення геодинаміки та уточнення параметрів гравітаційного поля Землі. LAGEOS - I запуснений в 1976 році [1] , LAGEOS - 2 запуснений в 1992 році. Це пасивні супутники , які відображають лазерний промінь , що посилається з Землі .Завдяки цьому положення супутників обчислюється з високою точністю. Кожен супутник являє собою мідний куля діаметром ~ 60 см і масою 410 кг. У його тонкої алюмінієвої оболонці рівномірно розташовані 426 уголкових відбивача . У результаті аналізу даних за 11 років було обчислено , що орбіта супутників зміщувалася на 2 метри на рік у напрямі обертання Землі. Це значення на 99 % співпадає з передбаченим загальною теорією відносності ефектом захоплення інерційних систем відліку обертовим тілом (див. також Gravity Probe B) . Розраховано , що на обраній орбіті заввишки 5880 км супутник може проіснувати близько 8 мільйонів років.

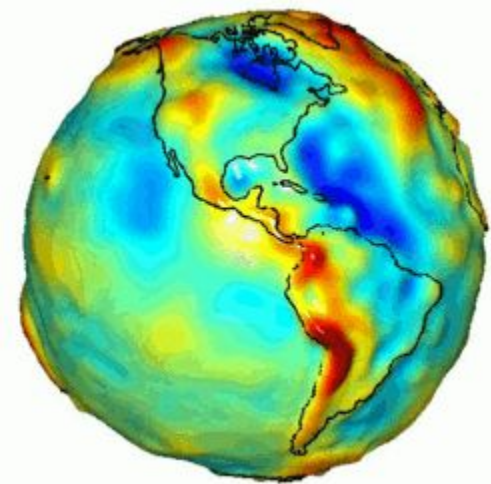


- **LARES** (англ. Laser Relativity Satellite) - італійський геодезичний супутник , який був виведений на орбіту новим європейським ракетою-носієм **Вега 13 лютого 2012** . Супутник виготовлений з вольфрамових сплавів і несе 92 кутових відбивача (кубічних ретрорефлектори) , за допомогою яких можна з високою точністю (одиниці сантиметрів) відстежувати траєкторію польоту апарату за допомогою лазерних локаційних станцій на поверхні Землі. LARES має 36,4 см в діаметрі і масу близько 400 кг. Виведений на практично кругову орбіту з перицентр 1450 км і нахилом 69,5 градуса . Стеження за орбітою супутника здійснюється за допомогою станцій Міжнародної Лазерної локаційних Служби (International Laser Ranging Service) та інших міжнародних і національних агентств і лабораторій .
- Основною науковою місією є вимірювання прецесії Ленз - Тіррінга (Захоплення інерційних систем відліку) , з точністю близько 1 % . [3]
Супутник також буде використаний для деяких досліджень в області геодинаміки та супутникового геодезії .





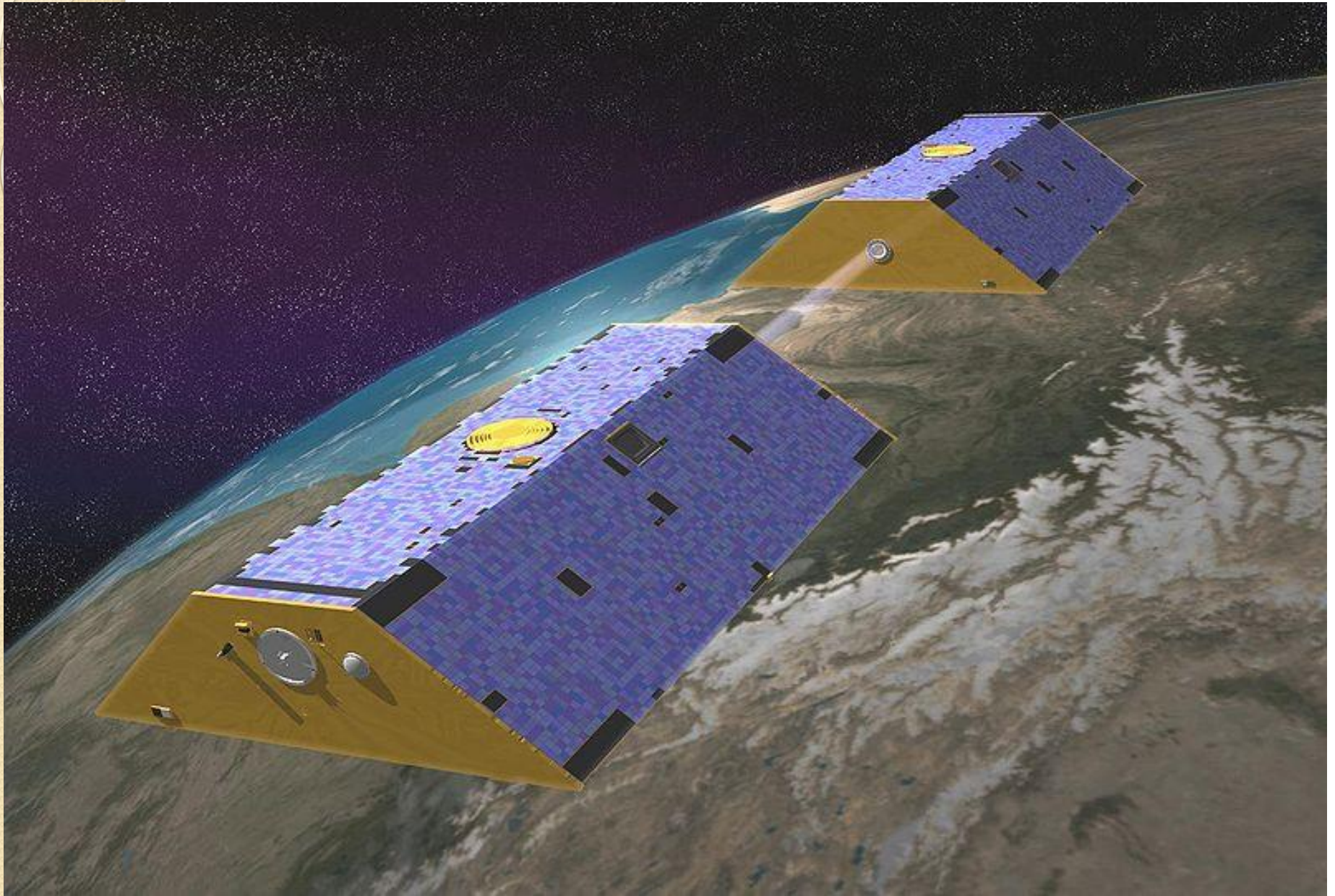
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/lares>



- GRACE (англ. Gravity Recovery And Climate Experiment) [1] - супутникова місія , спрямована на вивчення гравітаційного поля Землі і його тимчасових варіацій , пов'язаних, зокрема , з процесами зміни клімату.

GRACE картографує гравітаційне поле , вимірюючи положення двох ідентичних супутників, що знаходяться на полярній орбіті на висоті 500 км . Супутники були запуснені з космодрому Плесецьк 17 березня 2002 .

Супутники безперервно обмінюються радіосигналами в мікрохвильовому діапазоні , що дозволяє з мікронною точністю відслідковувати зміни відстані між ними. Власний рух і орієнтація супутників реєструються за допомогою приймачів GPS , акселерометрів і зоряних датчиків. Крім того , супутники оснащені кутиковими відбивачами для використання в супутникової лазерної дальнометрії .



GRACE Mission

Science Goals

High resolution, mean & time variable gravity field mapping for Earth System Science applications.

Mission Systems

Instruments

- KBR (JPL/SSL)
- ACC (ONERA)
- SCA (DTU)
- GPS (JPL)

Satellite (JPL/DSS)

Launcher (DLR/Eurockot)

Operations (DLR/GSOC)

Science (CSR/JPL/GFZ)

Orbit

Launch: March 2002

Altitude: 485 km

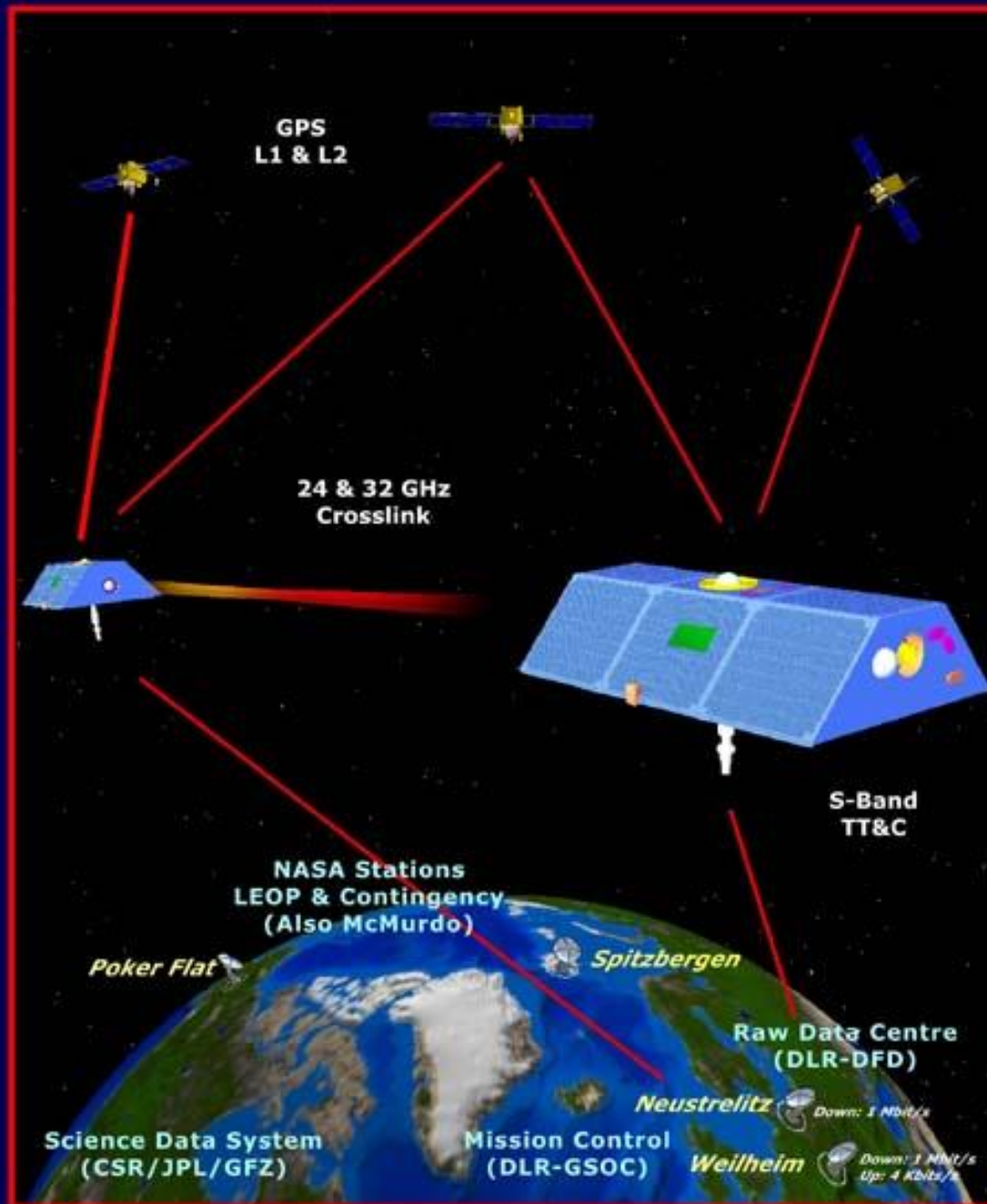
Inclination : 89 deg

Eccentricity: ~0.001

Lifetime: 5 years

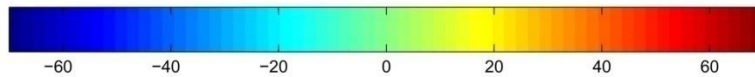
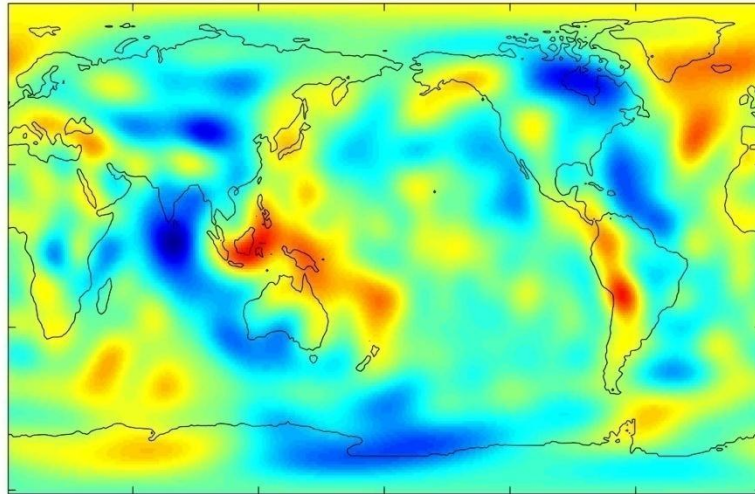
Non-Repeat Ground Track

Earth Pointed, 3-Axis Stable

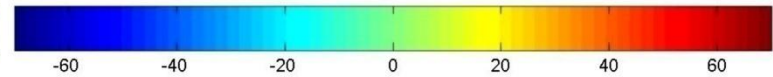
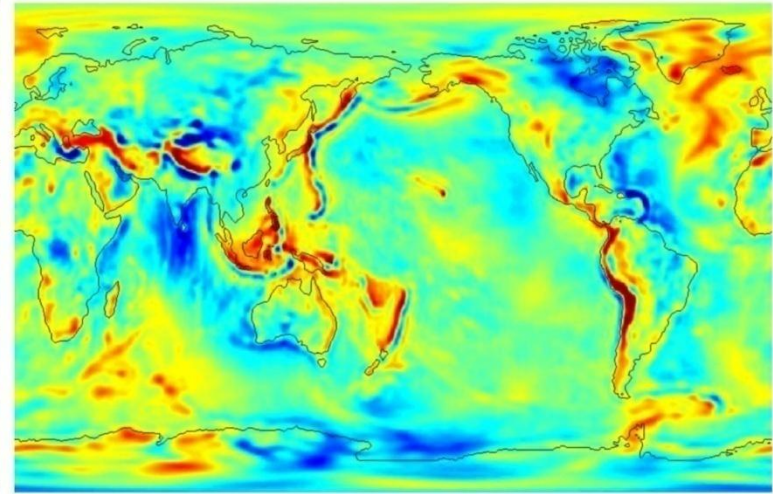


Before GRACE

With GRACE (13 months of data)



Gravity Anomaly (mGal)



Gravity Anomaly (mGal)

Супутники пролітають над кожною ділянкою Землі приблизно раз на місяць, що дозволяє простежувати природні переміщення мас (переважно пов'язані з кругообігом води в природі) .

За даними GRACE була побудована найбільш точна на даний момент карта глобального гравітаційного поля Землі.

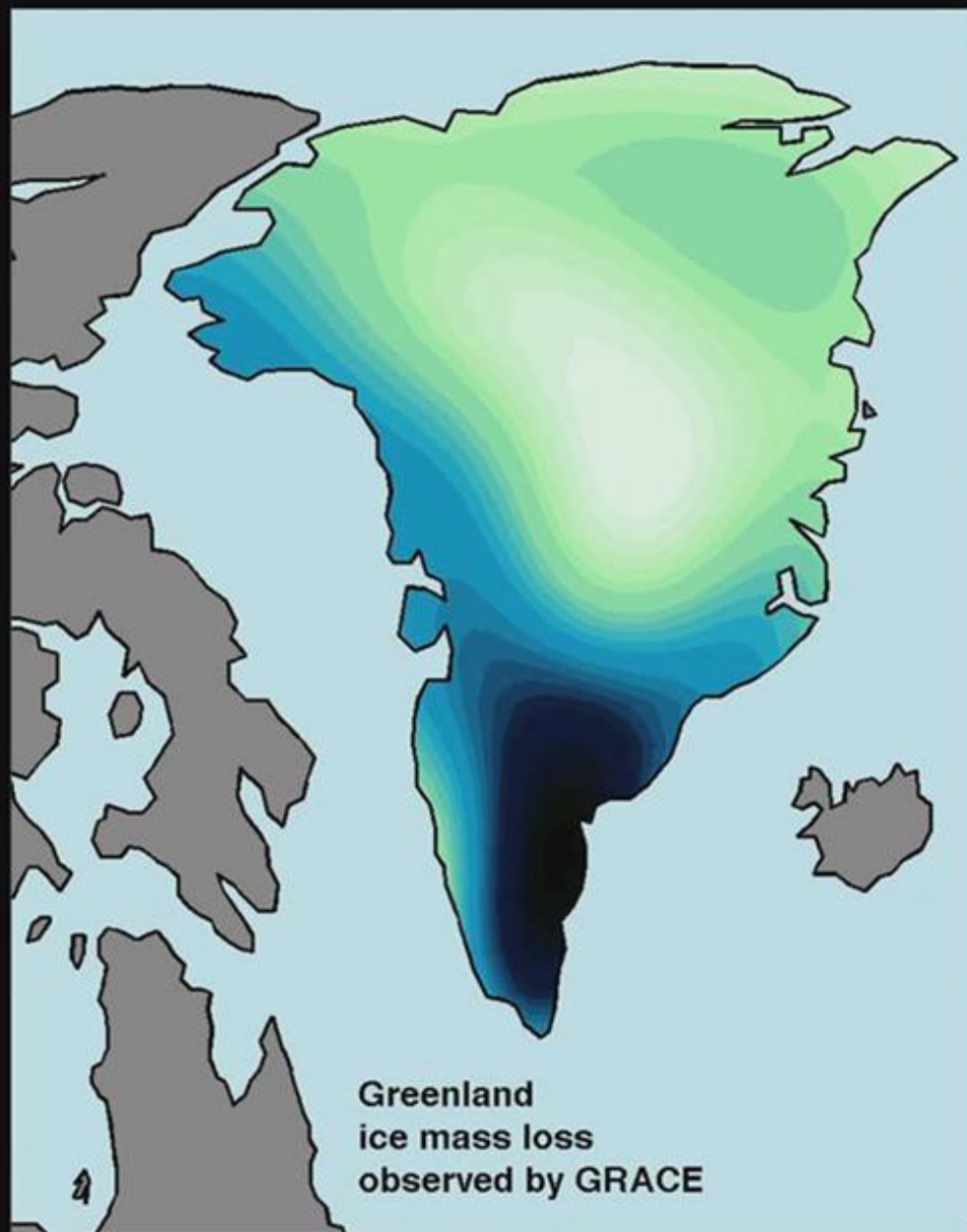
За спостереженнями з 2002 по 2005 роки було доведено швидке танення льоду Гренландії .

У 2006 група дослідників на чолі з Ralph von Frese і Laramie Potts за даними GRACE виявила в Антарктиді геологічне утворення діаметром близько 480 км [3] (див. Кратер Землі Уїлкса)



F. Landerer (JPL)
J. Wahr (U. Colorado)

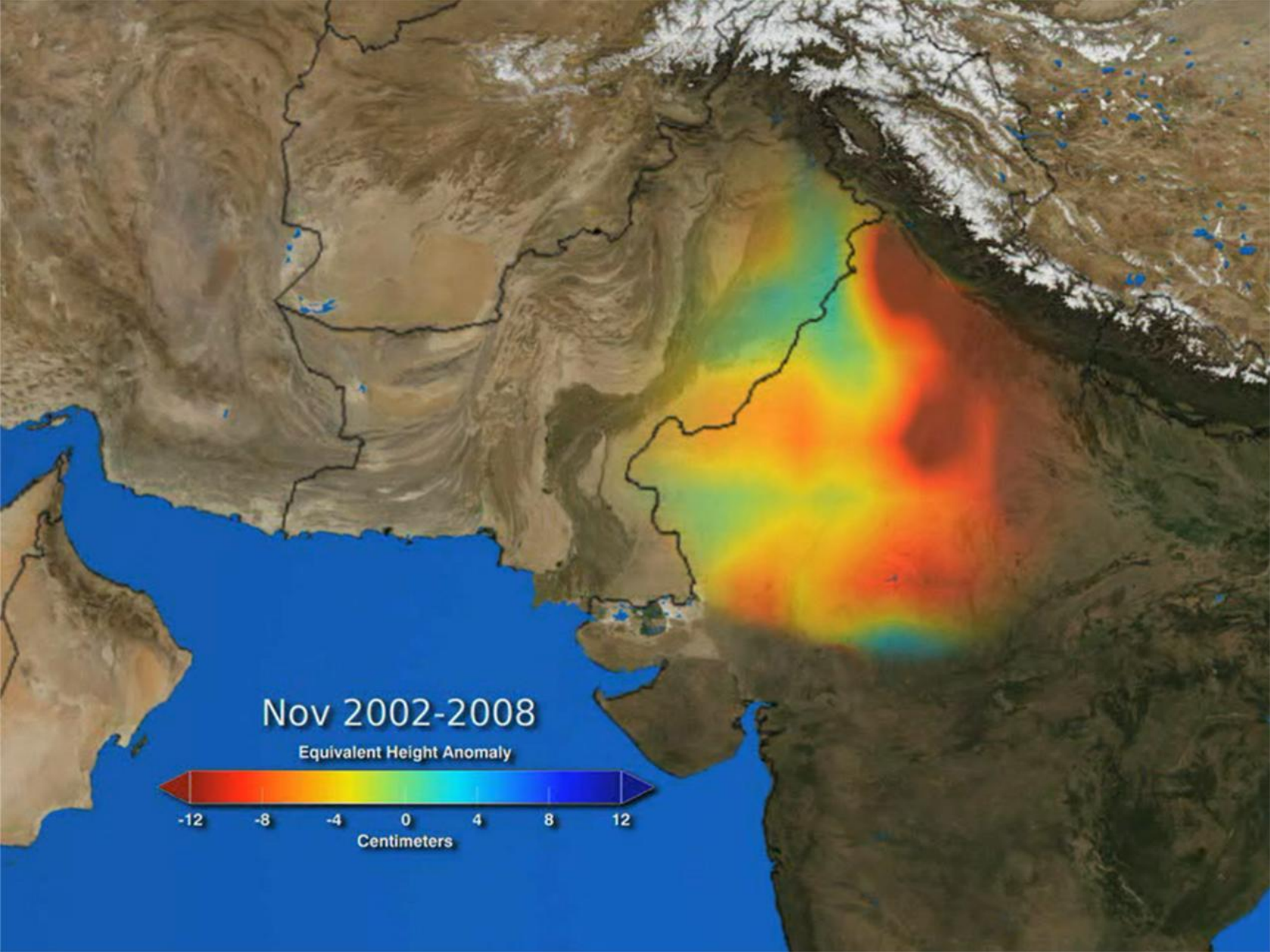
18-Nov-2011



Change of
Ice Thickness
since 2003



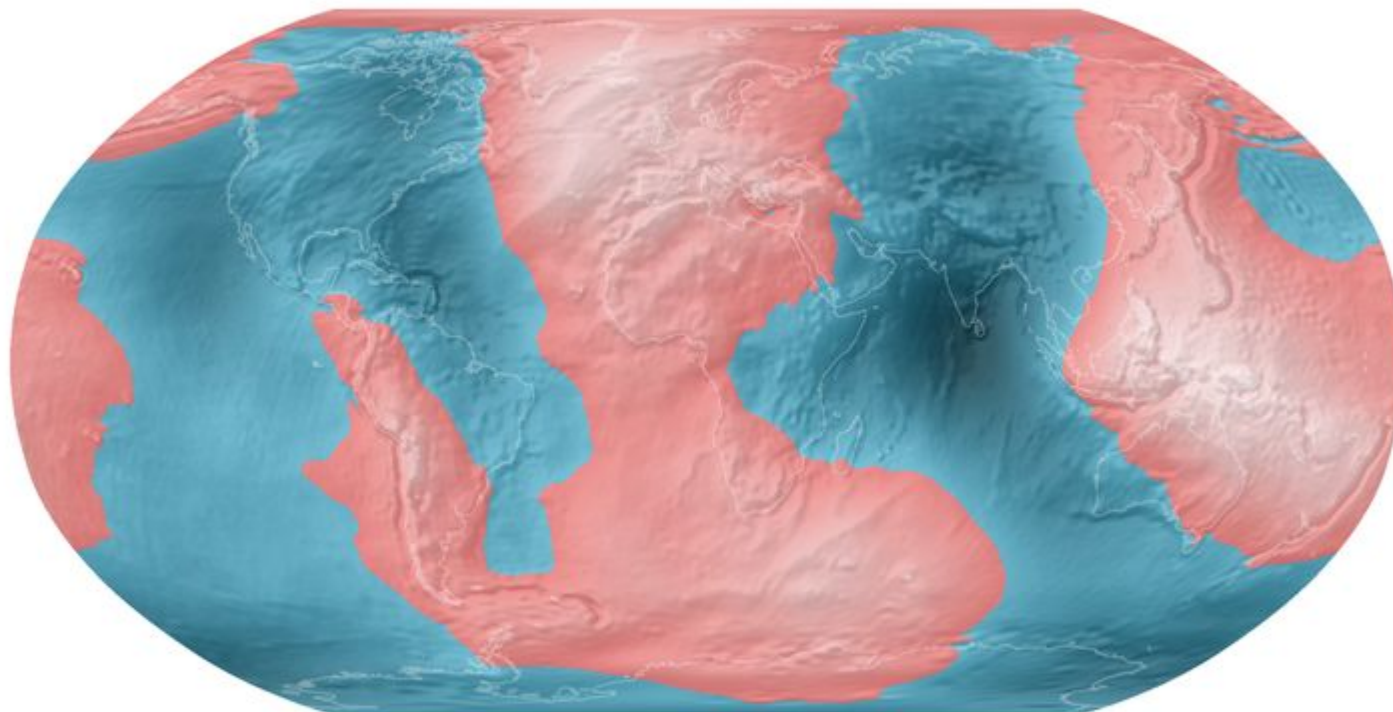
centimeters water
equivalent height



- GRACE показує виснаження підземних вод від великих водойм у зв'язку з посухою і діяльністю людини
- <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2012-077#11>

Deviation of the Geoid from the idealized figure of the Earth

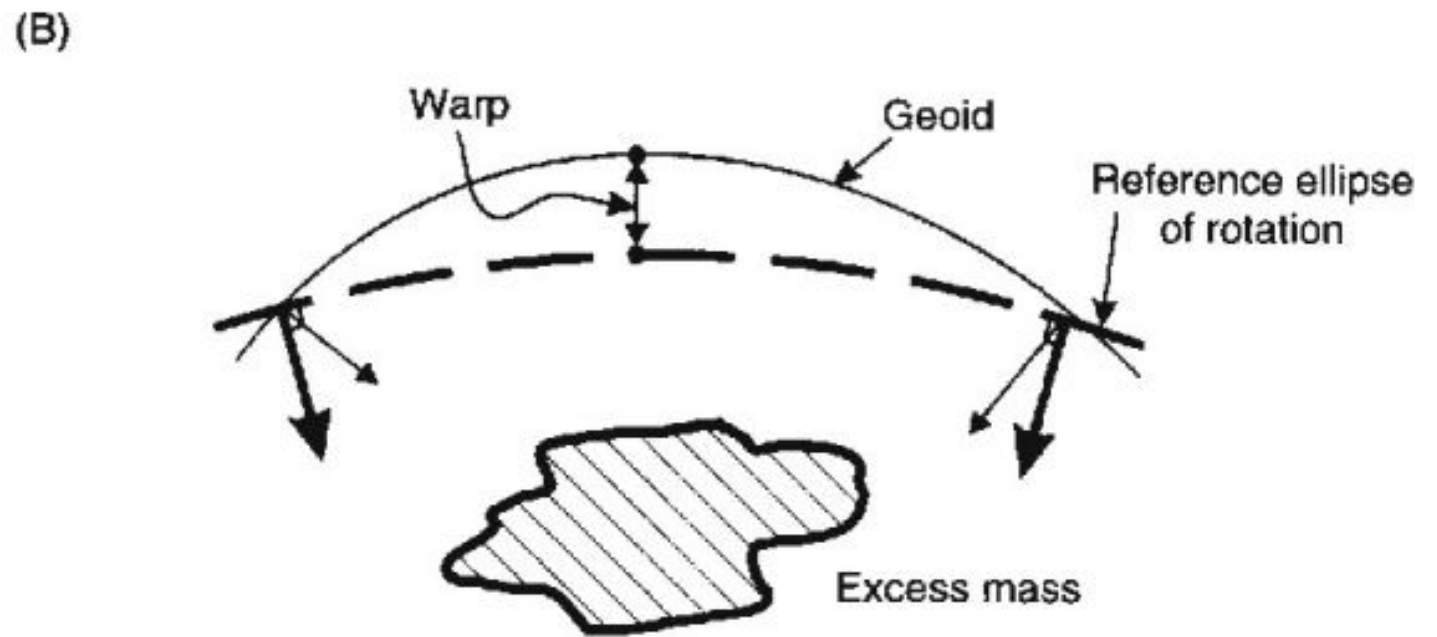
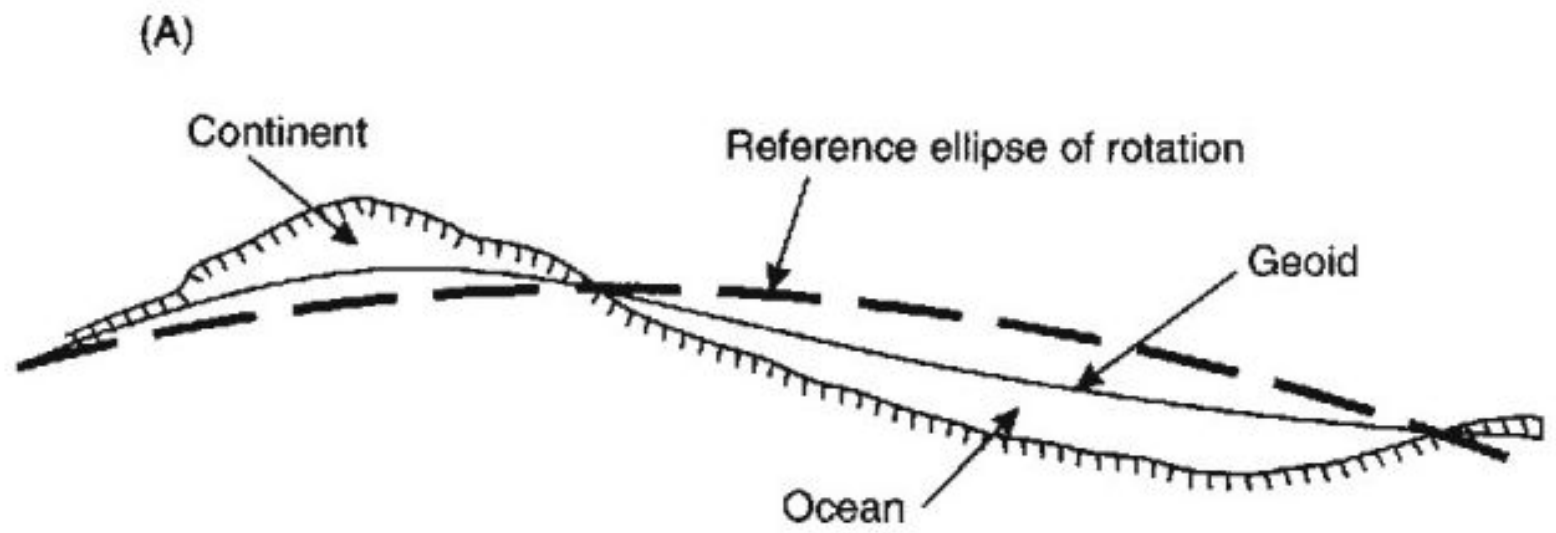
(difference between the EGM96 geoid and the WGS84 reference ellipsoid)



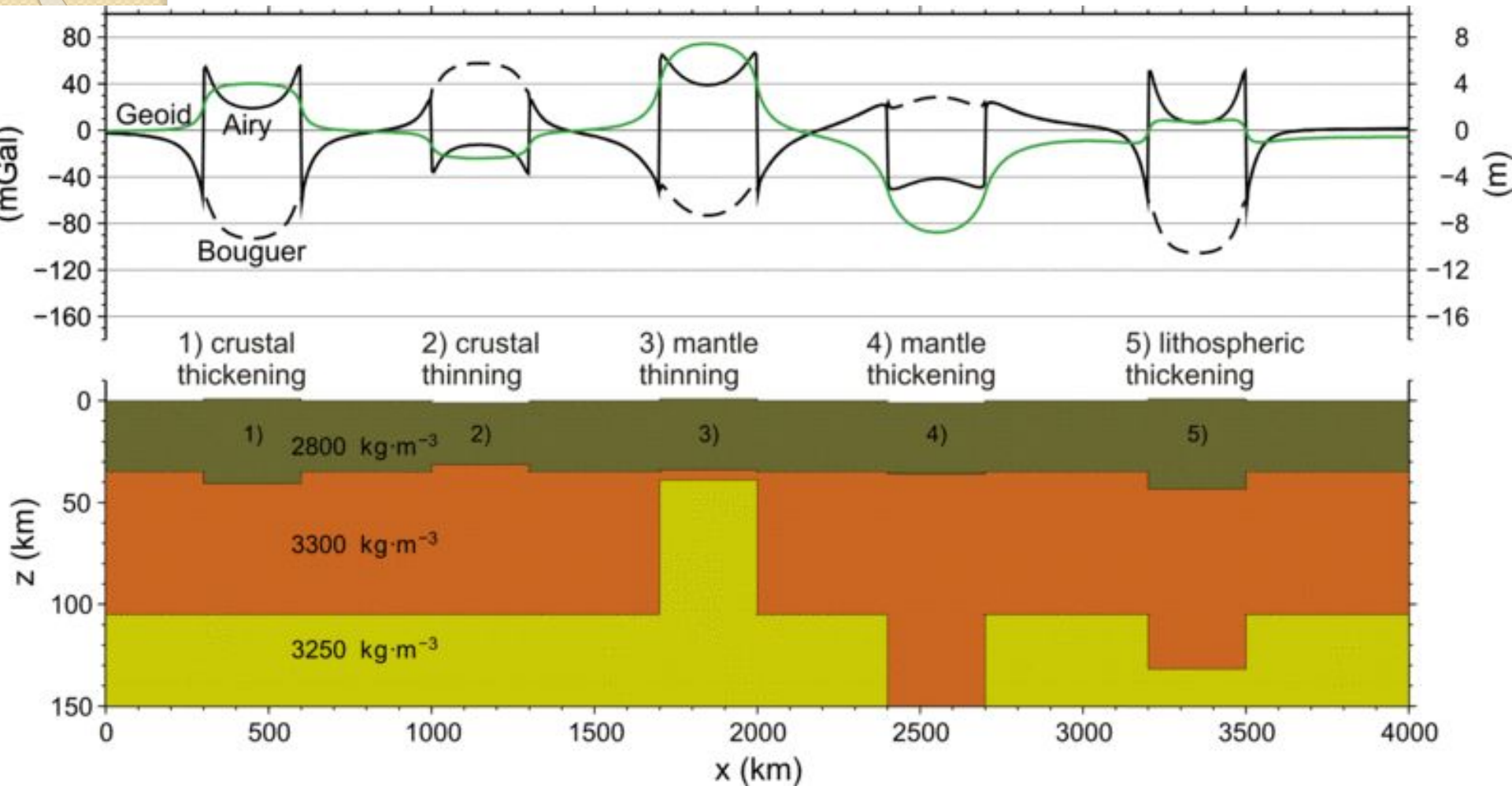
Red areas are above the idealized ellipsoid; blue areas are below.



- Відхилення геоїда від еліпсоїда



Аномалії геоїда пов'язані з місцевою ізостазією

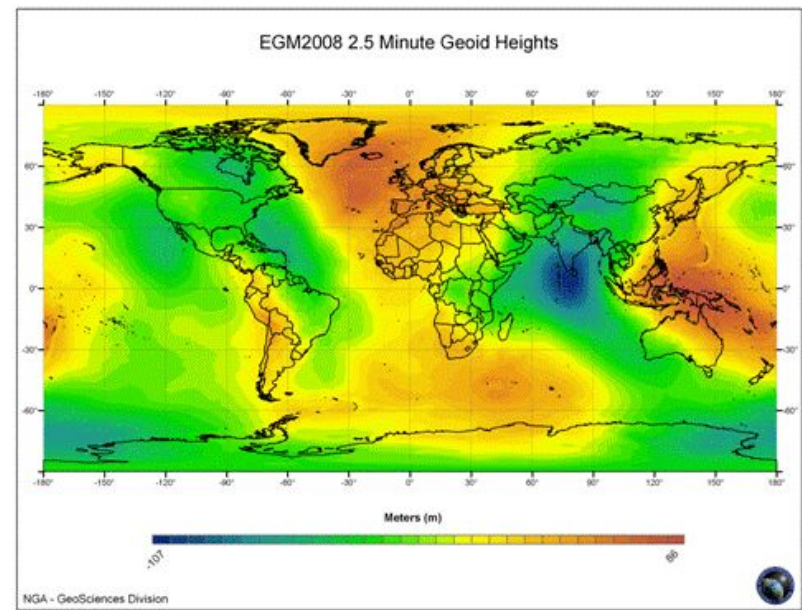


Сферичні гармоніки часто використовуються, щоб апроксимувати форму геоїда.

Нинішній набір сферичних коефіцієнтів EGM96 (Модель гравітації Землі 1996), визначається в міжнародному спільному проекті під керівництвом NIMA.

Математичний опис НЕ-обертової частини потенційної функції в цій моделі

$$V = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=2}^{n_{\max}} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin \phi) [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda] \right),$$



- Нові моделі навіть більш високої точності в даний час знаходяться у стадії розробки. Наприклад, багато хто з авторів EGM96 працюють над оновленою моделі, що повинна вміщувати багато нових даних супутникових гравітаційних вимірювань (GRACE). Програмне забезпечення та дані Земної гравітаційної моделі 2008 року (EGM2008) доступні на <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>

- **International Terrestrial Reference System** (ITRS, Міжнародна земна система координат) - стандартна земна система координат , прийнята МАС в 1991 році. Початком відліку є центр мас Землі (включаючи океан і атмосферу) . Система обертається разом із Землею і не є інерціальною . Орієнтація осей визначається зі спостережень МСВЗ . Вісь z є середньою віссю обертання Землі і направлена в опорний полюс (IRP - IERS Reference Pole) . Вісь x лежить в площині опорного меридіана (IRM - IERS Reference Meridian) . Одиницею довжини є метр , шкалою часу - шкала TCG (Geocentric Coordinate Time - геоцентричний координаційне час) . ITRS - набір домовленостей і основоположних принципів побудови земної системи координат.

● **International Terrestrial Reference Frame** (ITRF , Міжнародна земна система відліку) - реалізація земної системи координат ITRS за допомогою декартових координат ряду опорних пунктів на Землі. У ITRF для опорних пунктів наводяться їх прямокутні координати (X, Y, Z) і швидкості за відповідними координатним осях V_x, V_y, V_z , які обумовлені тектонічним рухом плит земної кори. Перелік пунктів затверджується кожні кілька років. Точність сучасних вимірювань настільки висока , що дозволяє вимірювати швидкість переміщення пунктів до 0,5 мм / рік , і дає можливість визначати швидкості руху літосферних плит. ITRF2000 реалізується координатами і швидкостями більш ніж 800 опорних точок , жорстко пов'язаних з корою Землі. До кожної опорної точці пред'являються такі вимоги: 1) точка повинна розташовуватися на значній відстані від кордонів тектонічних плит і від кордонів розломів плит; 2) спостереження в точці повинні проводитися безперервно протягом трьох років; 3) помилка обчислення швидкості точки повинна бути менше 3 мм / рік