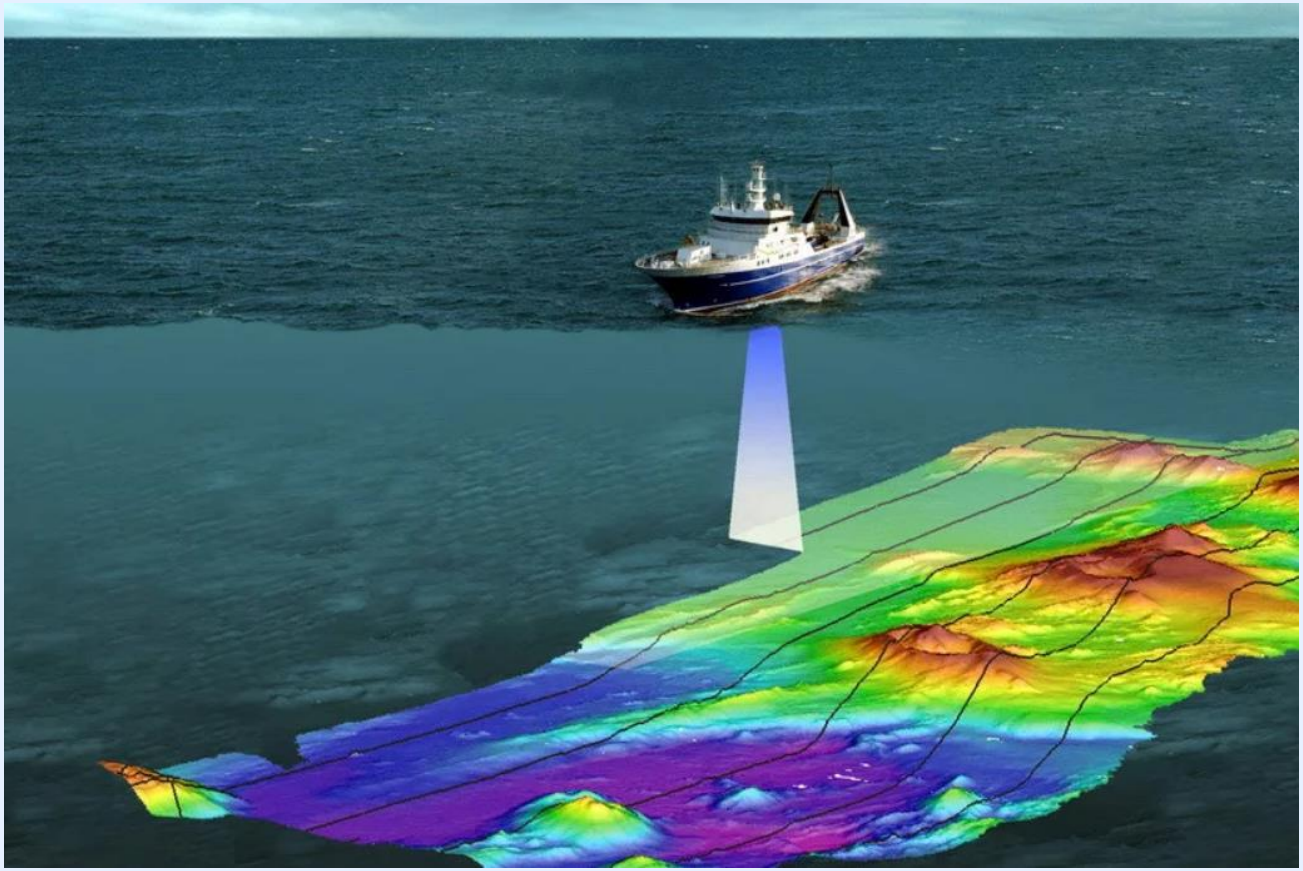
Гравиметрия

- Л11. Измерения со струнным гравиметром
- Морские статические гравиметры
- Крошечный гравиметр университета Глазго



Лектор Кенесбаева А.

Содержание

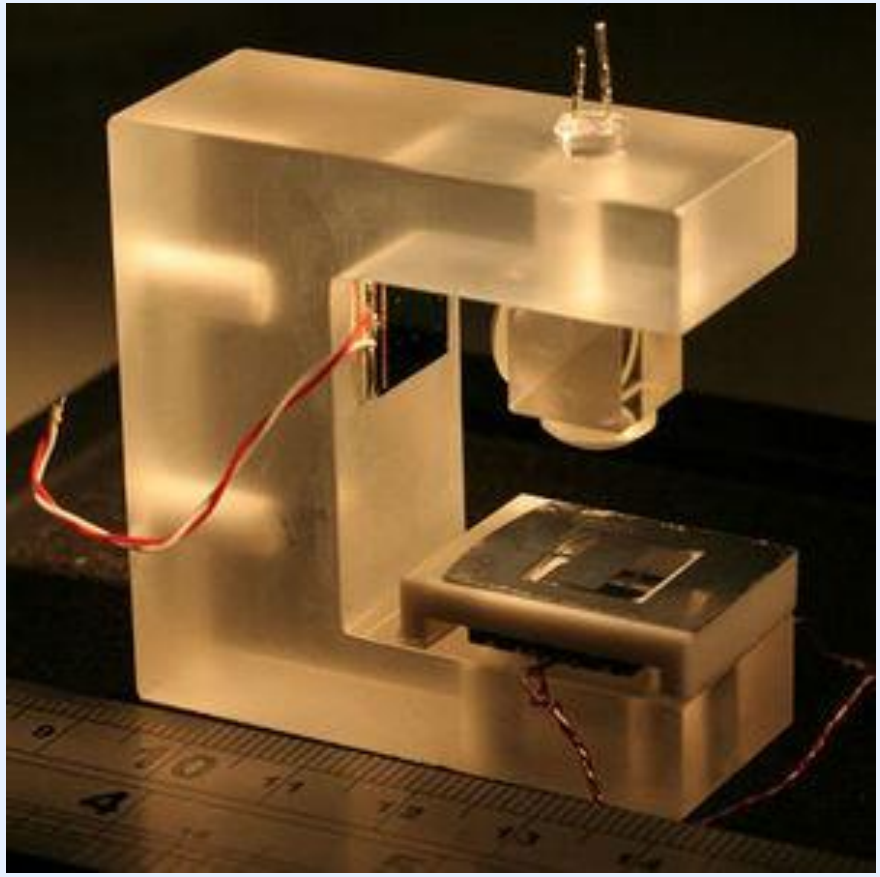
- Крошечный гравиметр университета Глазго
- Измерения со струнным гравиметром
- Морские статические гравиметры
- Чувствительная система гравиметра как фильтр нижних частот
- Поправки за возмущающие ускорений и наклоны при измерениях со статическим гиростабилизированным гравиметром
- Морская гравиметрическая съемка
- Автоматическая обработка измерений с гравиметрами

Крошечный гравиметр университета Глазго

Самое миниатюрное из гравиметров, существующих на сегодняшний день, размером с буханку хлеба и весит несколько килограммов.

Изящное решение проблемы громоздких гравиметров предложили Джайлз Хаммонд (Giles Hammond) и его коллеги из Университета Глазго.
Они разработали простой, компактный и недорогой способ измерения силы земного притяжения.
Ключевым элементом нового датчика также стал подвешенный груз. Но на этот раз вся система была вырезана из единого листа кремния толщиной 0,2 миллиметра.
В качестве массы используется пластинка, которая прикреплена к рамке тонкими кремниевыми полосками, заменяющими пружины.
В устройстве сила притяжения тянет пластинку вниз, а распорки толкают вверх. Получается, что положение равновесия пластинки определяется тремя величинами: собственной массой, коэффициентом жёсткости "пружин" и ускорением свободного падения.
Первые две постоянны, поэтому любое изменение в положении пластинки является результатом изменения локальной силы притяжения Земли.
Чтобы засечь эти слабые изменения, с одной стороны массу освещает светодиод, а с другой стороны в тени установлен очень чувствительный датчик света. В результате даже самые слабые движения пластинки можно регистрировать по количеству фотонов, падающих на детектор.

Крошечный гравиметр университета Глазго



Чувствительность нового устройства примерно в десять раз ниже, чем у лучших гравиметров, доступных на рынке.

Но и её достаточно, чтобы обнаружить туннель с поперечным сечением площадью два квадратных метра, пролегающий на двухметровой глубине, или нефтяное месторождение объёмом 50 кубических метров на глубине 150 метров.

Сейчас команда Хаммонда совместно с геолого-исследовательской компанией работает над созданием портативного гравиметра для работы в полевых условиях.

Кроме того, физики планируют изменить конструкцию, чтобы проводить измерения не в одной плоскости, а во всех направлениях.

https://news.rambler.ru/europe/33211696-mal-da-udal-novyy-kroshechnyy-gravimetr-pomozhet-v-poiske-poleznyh-iskopaemyh/

Измерения со струнным гравиметром

За рубежом для надводных измерений используются гиростабилизированные струнные гравиметры «Токио» (Япония) и BCA (США).

Морской надводный гравиметр Токийского университета «Токио» (TSSG) содержит струнную систему с латунным грузом массой 45 г, частота колебаний струны 1800 Гц.

Гравиметр виброизолирован от палубы сложной системой подвески.

Вычислительное устройство непрерывно фиксирует интервалы времени (≈0,5 с), в течение которых струна совершает 1024 колебания.

Результаты сглаживаются в 4-минутных интервалах фильтром с колоколообразной весовой функцией.

Гравиметр впервые испытан в 1962 г. и с тех пор используется для гравиметрической съемки вблизи берегов Японии и в северо-западной части Тихого океана.

В настоящее время точность измерений составляет 1—3 мГал при ускорениях до 50 Гал.

Гравиметр BCA создан в 1967 г. в Массачусетсом технологическом институте на базе вибрационного струнного акселерометра (BCA), применявшегося в 1960-х годах в системе инерциальной навигации баллистических ракет.

Акселерометр состоит из двух почти идентичных струнных систем и построен по дифференциальной схеме.

Морские статические гравиметры

Если приспособить для измерений на море обычный статический гравиметр, то пришлось бы расширить его, диапазон до +/- 200 Гал и создать для этого диапазона строго линейную отсчетную шкалу, что на практике очень трудно.

Чтобы сузить рабочий диапазон прибора и ограничить его пределами, сопоставимыми с измеряемыми приращениями силы тяжести, чувствительную систему морского статического гравиметра демпфируют с помощью вязкой жидкости, постоянного магнита или воздушного демпфера.

Благодаря сопротивлению, которое преодолевает рычаг, увеличивается его инерционность, и потому на короткопериодические возмущающие ускорения он реагирует достаточно слабо, а медленные изменения силы тяжести по маршруту судна отслеживает с малыми искажениями, которые можно учесть.

В комплект морского статического гравиметра, помимо сильнодемпфированной упругой системы, заключенной в термостат, входят:

- ✓ гиростабилизатор (обычно четырехгироскопный гиромаятниковый стабилизатор (ГМС) или силовая гироплатформа),
- ✓ преобразователь показаний гравиметра в форму, удобную для обработки,
- ✓ фильтр нижних частот (ФНЧ),
- ✓ регистратор,
- ✓ пульт управления,
- ✓ приборы для регистрации ускорений и наклонов гиростабилизатора.

Морские статические гравиметры

Во многих современных гравиметрах приняты меры для автоматизации обработки сигнала чувствительной системы с помощью специализированного вычислительного устройства или имеется автоматическое компенсационное устройство, позволяющее осуществить компенсационный способ отсчета.

Такие гравиметры называют автоматизированными.

Вычислительное устройство выполняет функцию фильтра полезного сигнала, накапливая результаты единичных измерений в течение некоторого промежутка времени и получая сглаженный результат.

Дальнейшие операции, начиная с вычисления поправок и кончая вычислением аномалий силы тяжести выполняет специальная программа в современных компьютерах.

Теоретическое обоснование и конструкция первого морского статического гравиметра с демпфированием разработаны К. Е. Веселовым в 1954 г.

В дальнейшем теория надводных измерений силы тяжести, методика и аппаратура разрабатывались в СССР С. Е. Александровым, В. О. Баграмянцем, В. А. Кузивановым, В. Л. Пантелеевым, Е. И. Поповым, В. А. Романюком, В. А. Тулиным и многими другими;

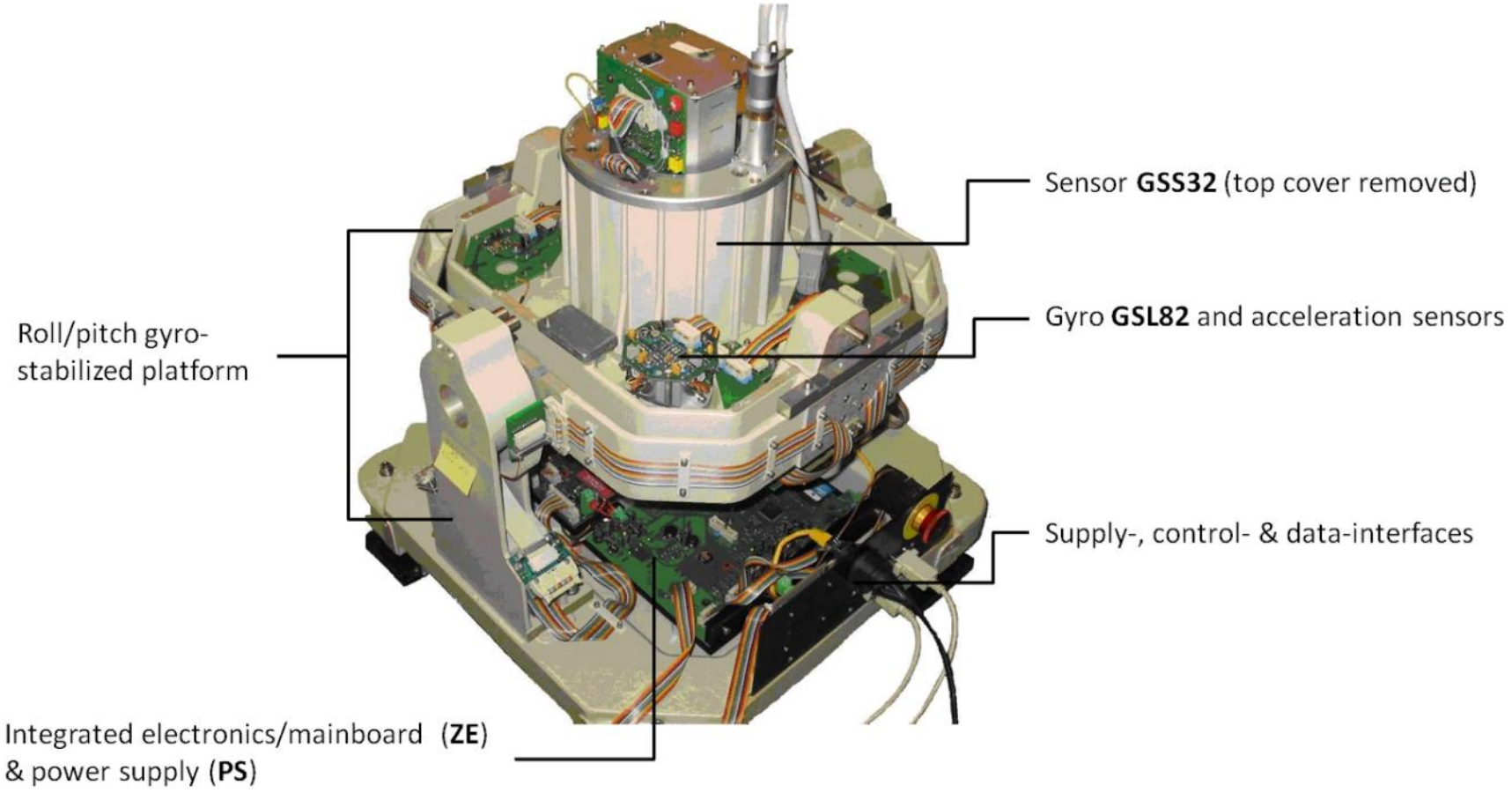
за рубежом — Л. Ла Костом и Дж. Гаррисоном (США), А. Графом (ФРГ).

Морские гравиметры

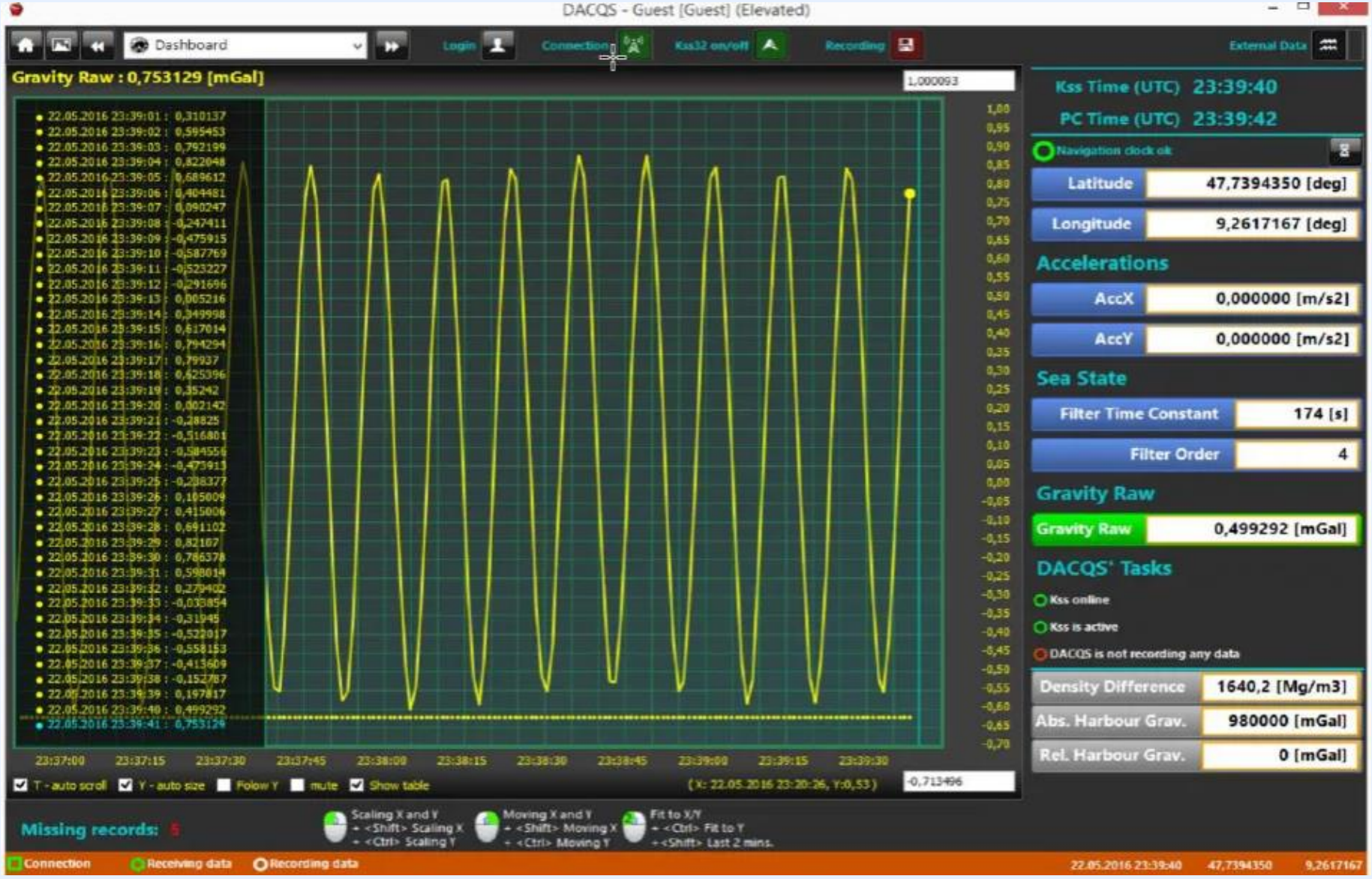
Компания BGGS предлагает систему гравиметра KSS32M - современную гиростабилизированную платформу в сочетании с проверенным обновленным датчиком BGGS GSS32 (система пружин и масс с магнитной компенсацией).

По сравнению с предшественником KSS31M, новая платформа объединяет всю электронику (ZE), источник питания (PS) и интерфейсы, что приводит к очень компактному морскому гравиметру.

Mainboard - материнская плата, Датчики гироскопа и ускорения, Supply interfaces- Интерфейсы питания.

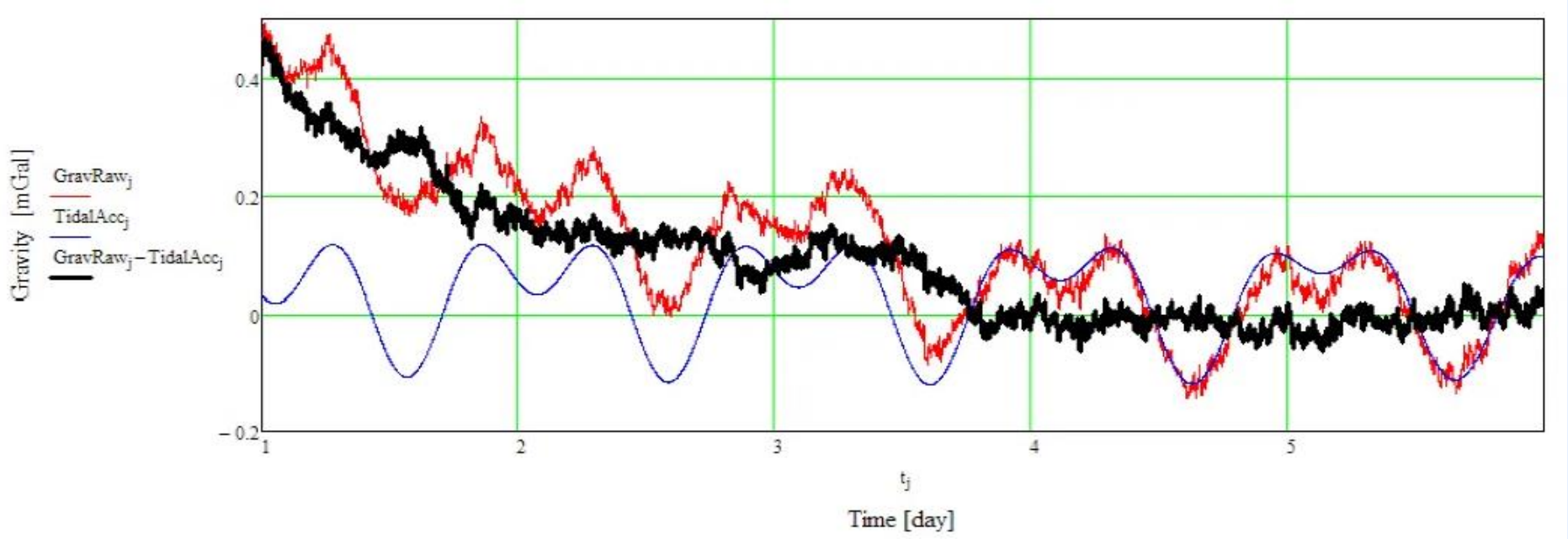


https://i0.wp.com/bodensee-gravitymeter.de/wp-content/uploads/2017/01/DACQSMainGUI.png?ssl=1



harbour gravity – гравитация гавани, относительно которой измеряется ускор.с.т.

Коррекция приливов



Расчет приливной поправки для измерений силы тяжести в качестве примера показан на рисунке выше.

Путем включения географических координат судна и фактической метки времени UTC из входных данных GNSS, приливное ускорение рассчитывается (синяя кривая) с помощью высокоточной модели приливов. Исходные данные гравитации (красная кривая) **исправленная (черная кривая)** на основе этих приливных ускорений.

Расчет на основе модели интегрирован в электронику материнской платы (ZE) KSS32-M, поэтому приливную коррекцию можно использовать без необходимости подключения компьютера / ноутбука.

Гравиметр «ЧЕКАН АМ»



На форуме OMR 2018 в Петербурге продемонстрировали российский гравиметр «Чекан», превосходящий западные аналоги. Универсальный мобильный гравиметр, устанавливается на гиростабилизированной платформе.

https://m.123ru.net/spb/168547629/

Морская гравиметрическая съемка

Детальную гравиметрическую съемку прибрежной полосы обычно выполняют **донными гравиметрами** с судна, оборудованного спуско-подъемным устройством. Съемку начинают с создания опорной сети, пункты которой закрепляют вехами или буями, после чего производят рейсы по пунктам рядовой сети с 2—3 гравиметрами. Взяв серию отсчетов на пункте, прибор приподнимают и снова опускают на дно для контрольных наблюдений.

Структура рейсов с донными гравиметрами и обработка наблюдений такие же, как при измерениях на суше.

Глубину измеряют — глубиномером гравиметра или эхолотом. Во время измерений судно стоит на якоре.

Донная съемка малопроизводительна. Если пункты расположены на расстоянии 1—3 км и глубина не превышает 30 м, то за семичасовую смену удается определить всего 10—15 пунктов.

При глубинах 100—150 м производительность уменьшается на 25% из-за дополнительных затрат времени на спуско-подъемные операции.

При увеличении глубины возрастают погрешность ее измерения и неопределенность планового положения пункта наблюдений относительно судна, обесценивающие измерения силы тяжести. Эти обстоятельства ограничивают применение донной съемки районами, где глубина не превышает 200—300 м.

Донные измерения становятся трудновыполнимыми и на малых глубинах (несколько метров) из-за воздействия волн на гравиметр. Для съемки мелководных участков применяют наземные гравиметры, которые устанавливают на специальных штативах.

Морская гравиметрическая съемка

На открытом море гравиметрическую съемку выполняют преимущественно на научно-исследовательских судах различного водоизмещения (от нескольких сотен тонн до 10 000 т и более), часто в комплексе с другими геофизическими исследованиями.
Обычно применяют не менее трех гравиметров. Их размещают возможно ближе к центру тяжести судна, чтобы уменьшить влияние вращательных движений судна, и устанавливают **на виброизоляционные прокладки.**

Наблюдения в исследуемом районе выполняют на прямолинейных галсах при равномерном движении судна.

Если судно меняет курс, то наблюдения возобновляют лишь после окончания переходных процессов в измерительной аппаратуре, обычно спустя 10—30 мин после начала прямолинейного галса.
В открытом океане возможны непрерывные наблюдения на протяжении нескольких тысяч километров при вертикальных ускорениях с экстремальной амплитудой до 100—150 Гал (т. е. при горизонтальных ускорениях до 50—75 Гал).

Более того, если амплитуда вертикальных ускорений не превышает 50 Гал, то при работе с гравиметрами типа ГГ, АМГ, ГМН не возникает необходимости учитывать поправки за возмущающие ускорения и наклоны гироплатформы.

Морская гравиметрическая съемка

Чтобы при длительном плавании избежать значительных погрешностей из-за неуверенной интерполяции смещения нуль-пункта, для контроля показаний гравиметра используют морской маятниковый прибор.

Маятниковые наблюдения выполняют как в портах захода, так и в открытом море при слабом волнении (на якорных стоянках судна или в дрейфе) и считают эти наблюдения опорными.

Для контроля нуль-пункта применяют маятниковый прибор в поплавковом снаряде с гидродинамическим демпфером, опускаемом с судна в зону застойных вод, на глубину не менее 50 м.

Опорные наблюдения в большом диапазоне изменения сил тяжести используют и для уточнения цен деления гравиметров,

в частности гравиметров ГАЛ-М, ТГГ-1, ГГ, АМГ, у которых упругая система содержит два чувствительных элемента. Эталонирование таких гравиметров методом наклона из-за трудноучитываемой непараллельности крутильных нитей упругой системы не дает уверенности в отсутствии систематической погрешности, хотя по внутренней сходимости характеризуется точностью (0,5-2*10-3).

Пусть опорные наблюдения выполнены в п пунктах, один из которых будем считать исходным. Цену деления К представим линейной функцией

$$K = A + B\,(m - m_0) = A + B\,\Delta m,$$

где С — скорость смещения нуль-пункта, Δt — интервал времени между наблюдениями на указанных пунктах.

Морская гравиметрическая съемка

Тогда приращение силы тяжести между опорным и исходным пунктами будет

$$\Delta g = K\,\Delta m - C\,\Delta t = B\,\Delta m^2 + A\,\Delta m - C\,\Delta t,$$

где С — скорость смещения нуль-пункта, Δt — интервал времени между наблюдениями на указанных пунктах.

Определив приращения силы тяжести на опорных пунктах относительно исходного (по маятниковым наблюдениям или по каталогу опорных пунктов), можно составить систему п — 1 уравнений с тремя неизвестными

$$\begin{aligned}
B\,\Delta m_1^2 + A\,\Delta m_1 - C\,\Delta t_1 - \Delta g_1 &= v_1,\\
B\,\Delta m_2^2 + A\,\Delta m_2 - C\,\Delta t_2 - \Delta g_2 &= v_2,\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\\
B\Delta\, m_{n-1}^2 + A\,\Delta m_{n-1} - C\,\Delta t_{n-1} - \Delta g_{n-1} &= v_{n-1}.
\end{aligned}$$

Чтобы найти неизвестные Л, В, С, число опорных пунктов, не считая исходного, должно быть не менее трех. Описанный способ определения цены деления позволяет достичь точности (0,5—1) $\times\ 10^{-3}$.

Площадную съемку на море выполняют на параллельных галсах (профилях), расстояние между которыми зависит от масштаба создаваемой гравиметрической карты и от сложности гравитационного поля в исследуемом районе. Для контроля съемки прокладывают секущие галсы (рис. 5, а), перпендикулярные галсы (рис. 5, б), либо выполняют повторные наблюдения на галсах.

Морская гравиметрическая съемка

..

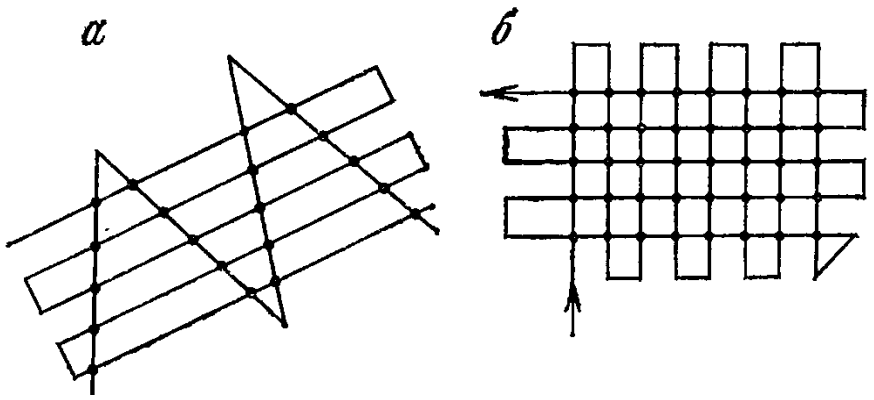


Рис. 5. секущие галсы (а) и перпендикулярные галсы (б) для контроля съемки

На рис. 6 приводится схема съемочных профилей близ берегов Японии, проложенных японскими экспедициями, а также участки советских площадных съемок.

По результатам этих работ была построена гравиметрическая карта, представленная на рис. 7.

Для вычисления поправки Этвеша определяют координаты, курс и скорость судна, а для вычисления аномалий — дополнительно глубину под килем.

Глубину измеряют эхолотом с погрешностью 0,5—2%.

Задача определения координат решается разнообразными средствами, обеспечивающими различную точность, в зависимости от района плавания. Точность определения координат в различных условиях иллюстрируется табл. 1.

Гравиметрическая съемка близ берегов Японии

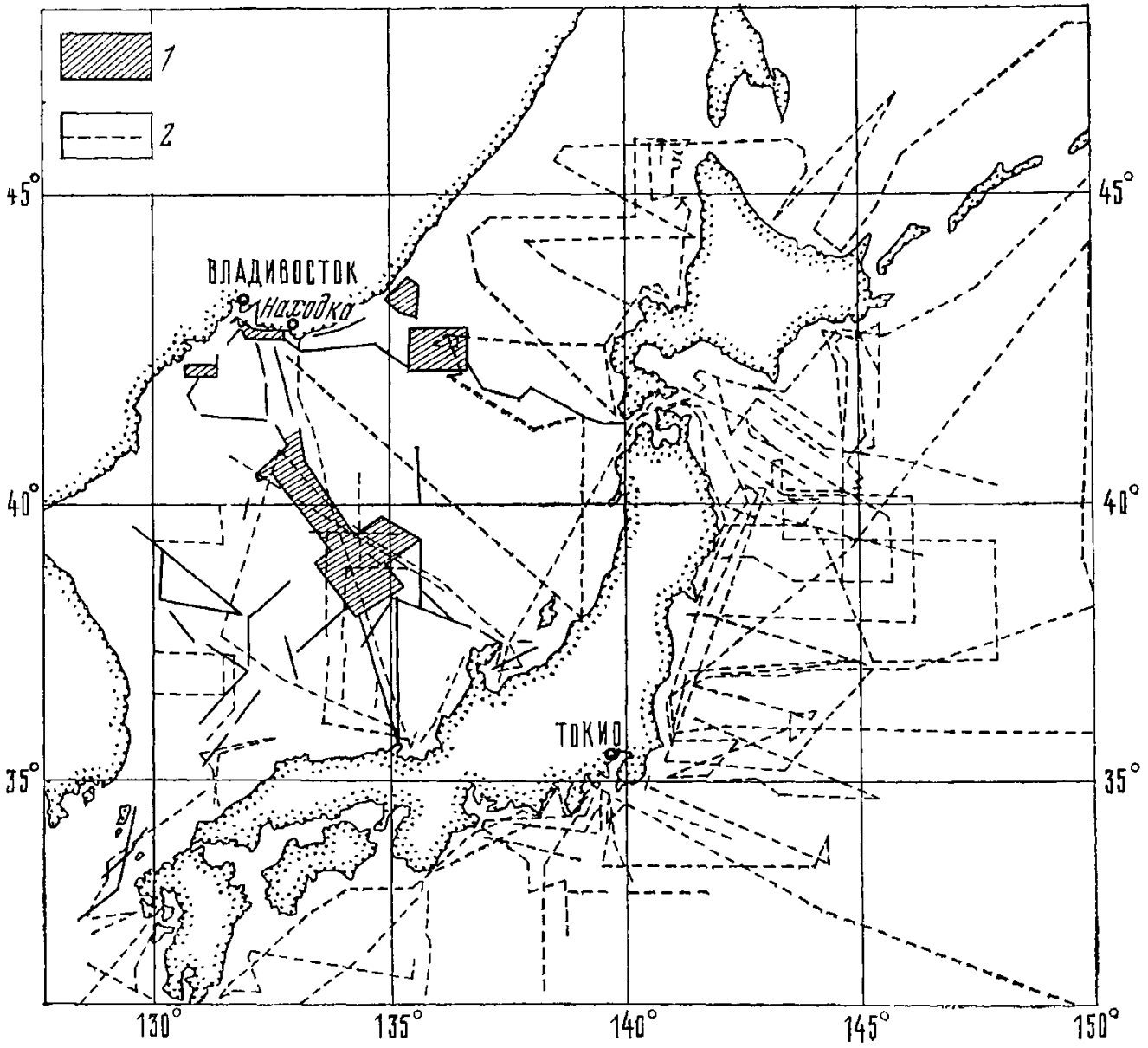


Рис. 6.
1 — советские исследования,
2 — японские исследования

Гравиметрическая съемка близ берегов Японии

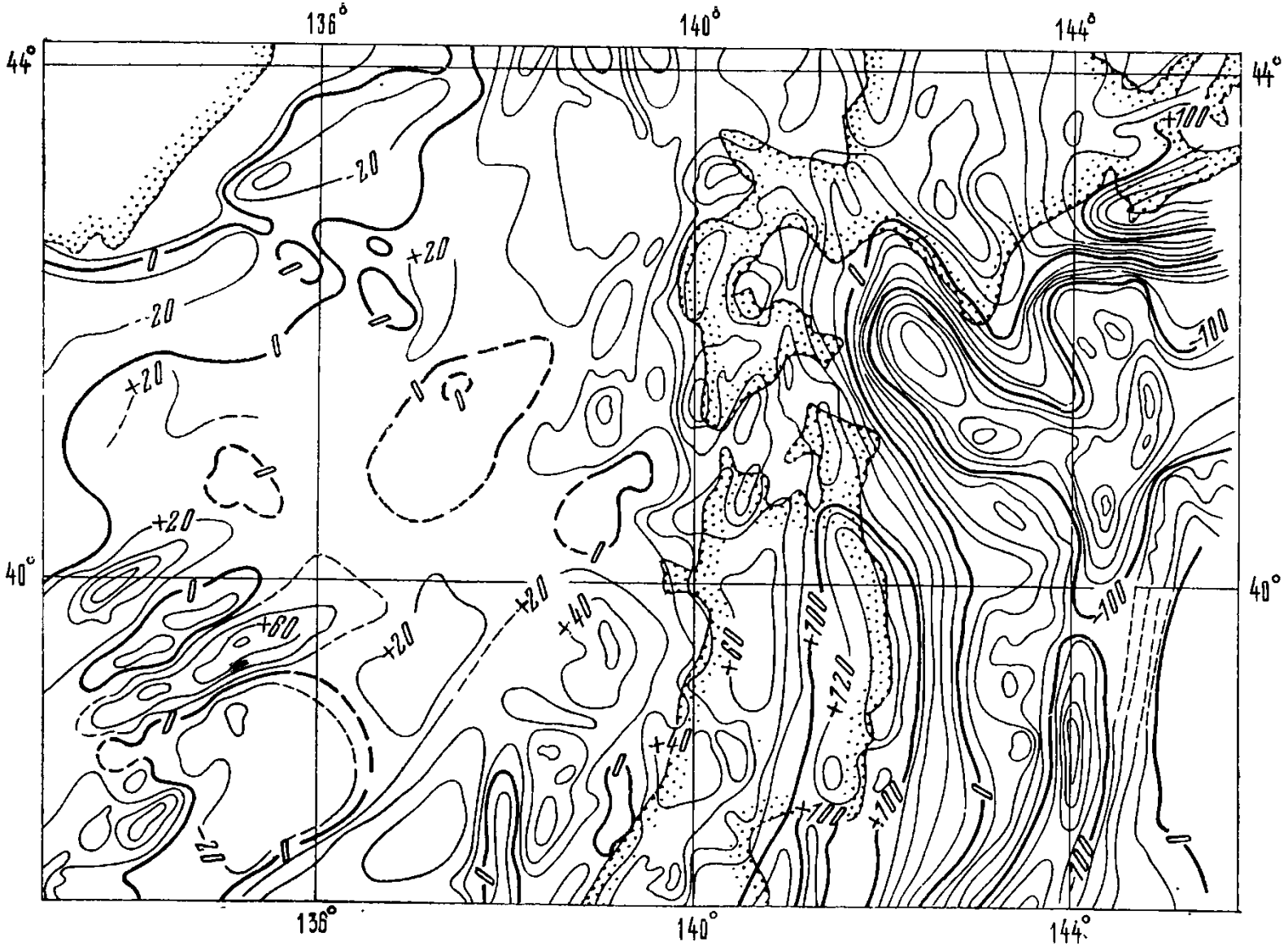


Рис. 7

Гравиметрическая съемка близ берегов Японии

Расстояние от берега	Метод определения координат	Точность
До 10 км	Визуальные наблюдения, радиогеодезические методы	2—50 м
До 100—150 км	Радиогеодезические системы	20—100 м
~1000 км	Радионавигационные системы	Несколько десятков—несколько сотен метров
Открытый океан	Астроопределения (в исключительных случаях)	2—4 км
	Радионавигационная система «Омега»	2 км
	Спутниковые навигационные системы	50—100 м
	Счисление координат между спутниковыми наблюдениями	Несколько сотен метров

Автоматическая обработка измерений с гравиметрами

Обработка морских гравиметрических наблюдений трудоемка из-за необходимости сглаживать показания гравиметра и вводить поправки. Но, она упрощается благодаря автоматизации процесса, то есть, применению компьютерных программ.

Обработку выгодно выполнять непосредственно в плавании, что осуществимо на судне. При этом показания всех приборов заносятся в базу данных и обработку выполняют спустя некоторое время, после наблюдений на галсе, уточнив координаты и смещение нуль-пункта.

Рассмотрим этапы обработки.

Значение силы тяжести на морском пункте вычисляется отдельно по каждому гравиметру по формуле

$$g = g_0 + \Delta g,$$

где g0 — сила тяжести на опорном пункте, Δg — приращение силы тяжести

$$\Delta g = K\,(m - m_0) + \Delta g_r.$$

Здесь K — цена деления гравиметра, m0 — отсчет на опорном пункте, m — текущий отсчет, сглаженный фильтром нижних частот гравиметра или вручную по аналоговой записи, Δgr — сумма поправок за влияние ускорений и наклонов, за эффект Этвеша, за инерционность и за смещение нуль-пункта.

Автоматическая обработка измерений с гравиметрами

Поправка за инерционность (запаздывание), устраняющая искажение результата, вносимое демпфированием упругой системы и дополнительными сглаживающими фильтрами гравиметра, вычисляется по формуле:

$$\Delta g_{и}(t) = \frac{Km(t+\Delta t) - Km(t-\Delta t)}{2\Delta t}(\tau_{в})_{эф},$$

где $(\tau_{в})_{эф}$ — эффективная постоянная времени гравиметра. Эта формула предполагает, что сила тяжести изменяется линейно на интервале $2\Delta t$.

Точность вычисления поправки зависит от удачного выбора величины Δt.

Если Δt велико, то нарушается принятое предположение. Если же Δt взять небольшим, то на величину поправки могут сильно влиять колебания отсчета Km (t) из-за возмущений. Часто запаздывание учитывают смещением показаний гравиметра во времени на величину $(\tau_{в})_{эф}$.

Поправки за влияние горизонтальных ускорений и наклонов вычисляются по формуле

$$-\overline{\ddot{X}\varphi} + g\overline{\alpha\varphi} + \frac{1}{2}\overline{g\varphi^2}.$$

При этом часто используются запись горизонтальных ускорений и эмпирическая зависимость наклонов гиростабилизатора и горизонтальных ускорений, полученная по стендовым испытаниям. При площадной съемке эти поправки считают постоянными на всем галсе.

Автоматическая обработка измерений с гравиметрами

Поправку Этвеша считают постоянной между моментами определения координат, если нет аналогового вычислителя текущей величины поправки. При получении переменной составляющей поправки Этвеша учитывают показания судового лага и гирокомпаса или координаты, полученные с помощью РГС.

Поправка за смещение нуль-пункта обычно вычисляется по линейному закону

$$\Delta g_{см} = a + c\,(t - t_0),$$

где t0 — момент опорных наблюдений. Постоянные a и c находят предварительно по опорным наблюдениям.

Координаты пункта и глубину находят линейным интерполированием на момент выдачи показаний гравиметра между моментами определения координат и глубин.

Для определения глубин исходной информацией служит эхолотный промер.

Каталог гравиметрических пунктов хранится на электронном и бумажном носителях.

В каталоге даются сведения о галсе и все данные для каждого пункта.

На практике морских гравиметрических работ применяются различные программы обработки, в их числе «Комплексная обработка морских профильных определений силы тяжести» («Неокомпост»), составленная в ИФЗ АН СССР.

Стадии обработки по этой программе отражены на рис. 126.

Автоматическая обработка измерений с гравиметрами

Для обработки по программе «Неокомпост» наблюдений с двумя гравиметрами АМГ, предварительно сглаженных вычислительным устройством гравиметра в 100-секундных интервалах, с интервалом сглаживания 7-600с, необходимо 63 часа машинного времени и 590 человеко-часов (3,3 человеко-месяцев) для контрольных считок и вспомогательных работ, не требующих высокой квалификации исполнителя. Между тем, такой же объем вычислений при ручной обработке потребовал бы труда 4—6 квалифицированных, опытных вычислителей в течение нескольких лет.

На рис. 127 показан результат вычислений-по программе «Неокомпост» — каталог пунктов (в условной системе) для одного галса в 5-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев».