

Современные методы морской и аэрогравиметрии, созданные с участием ИФЗ РАН

В.Н. КОНЕШОВ,
доктор технических наук
заместитель директора Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН

Гравиметрия (от латинского *gravis* – “тяжелый” и греческого *μετρέω* – “измеряю”, гравитационное зондирование) – отдельная наука, изучаемая на геофизических специальностях в университетах. Она включает набор геофизических методов, заключающихся в измерении ускорений силы тяжести



на Земле и вычислении аномалий гравитационного поля планеты. Знание гравитационного поля Земли позволяет решать ряд задач фундаментальной науки и практической геолого-геофизической разведки, задачи обороны государства и освоения космоса.

Главная задача гравиметрии (например в геодезии) состоит в использовании теории и методов определения внешнего поля потенциала и силы тяжести Земли (g) по измерениям, которые проводятся на по-

верхности планеты или на небольших расстояниях от этой поверхности. Гравиметрия в геодезическом контексте включает в себя теорию нивелирных высот и обработку астрономо-геодезических сетей. Одно из

основных геодезических приложений гравиметрии – построение моделей геоида. Реальная фигура Земли не является шаром или эллипсоидом вращения. Под действием гравитационного поля Земли и сил инерции,

обусловленных ее вращением, планета имеет форму, названную геоидом. Точное знание геоида необходимо, в частности, в навигации.

Единицей измерения в гравиметрии является гал (международное обозначение: Gal), равный 1 см/с^2 ; названа в честь итальянского ученого Галилео Галилея. При создании единой мировой опорной гравиметрической сети (International Gravity Standardization Net, IGSN) в 1971 г. (стандарт IGSN 71) было принято абсолютное значение ускорения силы тяжести Земли, не “привязанное” к координате. Оно составляет $978\,031,8$ миллигала (мГал).

С помощью гравиметрических методов (используя геодезические спутники) определяют высоту геоида, а также аномалии силы тяжести с последующим построением карты (в масштабе 1:1 000 000) сечения изоаномал (линий на карте, соединяющих равные значения аномалий силы тяжести) 5–10 мГал. Применяя этот метод, геофизики изучают соответствующие параметры Земли как планеты. Для решения конкретных задач по необходимости выполняются наземные, высокоточные морские и аэрогравиметрические измерения.

МОРСКАЯ ГРАВИМЕТРИЯ

Современные морские гравиметрические измерения выполняются с погреш-

ностью менее 0,1 мГал. Точность измерений ограничивается, прежде всего, наличием различных по частоте и диапазону инерционных помех, обусловленных движением и наклонами объекта (автомобиля, корабля или самолета), с которого проводятся измерения. Для повышения точности морских гравиметрических измерений с помощью прибора гравиметра (кроме совершенствования аппаратных средств, то есть самого гравиметра) необходимо учитывать целый ряд факторов.

В соответствии с принципом эквивалентности гравитационной и инертной масс морской гравиметр “реагирует” на сумму силы тяжести и инерциальных ускорений (шумов) в направлении измерительной оси (центр Земли). Входящая в состав морского гравиметра гиросtabilизированная платформа “удерживает” его измерительную ось в направлении по вертикали при наклонах судна. Гравитационный сигнал Δg , обусловленный притяжением Земли, находится на нижней полосе частот. Инерционные ускорения качки (шумы), которые могут превышать полезный сигнал на семь порядков, находятся в верхнем частотном диапазоне и “отделяются” частотным фильтром. Шумы также “отсекаются” при камеральной обработке (в частности, по выходным сигналам акселерометров).

Помимо инерционных помех в сигнале гравиметра на выходе содержатся ускорения, обусловленные силой Кориолиса, и аппаратные шумы. Они возникают вследствие конструктивных особенностей прибора и несовершенства изготовления его составных частей. Аппаратные шумы присутствуют также в широком частотном диапазоне; некоторые из них “перекрывают” частоты полезного сигнала. От них также приходится избавляться (“очищать” их) с помощью частотных фильтров в процессе камеральной обработки полученных “в полевых условиях” измерений.

Сотрудники ИФЗ РАН внесли значимый вклад в теорию построения и в практику разработки отечественной морской гравиметрической аппаратуры и методики ее использования. Много времени и сил было затрачено при создании ее чувствительного элемента гравиметра – двойной упругой системы крутильного типа, ее автор – доктор технических наук Л.К. Железняк. В настоящее время в морском гравиметрическом комплексе “Шельф”, выпускаемом серийно акционерным обществом «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”», используются указанные упругие системы. Они содержат оригинальный чувствительный элемент в виде двойной кварцевой упругой системы



Общий вид современного морского гравиметра “Шельф” (справа), установленного на борту научно-исследовательского судна “Согар”.

(первоначально предложенной Институтом физики Земли РАН) и высокоточную оптоэлектронную систему списывания выходного сигнала кварцевой упругой системы. Обеспечена полная автоматизация работы комплекса. Обработка полученной информации производится на борту судна.

Гравиметрический комплекс успешно конкурирует на международном рынке с гравиметром серии S фирмы “La Coste”, выпускаемым в США. “Шельф” позволяет выполнять гравиметрические измерения во всех широтах планеты, без ограничений по диапазону, времени и погодным условиям.

Специалисты ИФЗ РАН на протяжении пятидесяти лет постоянно совершенствовали конструкцию упругой кварцевой системы гра-

виметра и технологию ее изготовления с целью повышения надежности, технических и эксплуатационных характеристик; а специалисты АО «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”» усовершенствовали преобразователи сигнала упругой кварцевой системы, термо- и гиростабилизацию гравиметра, использование вычислительных устройств, улучшали программное обеспечение.

В реальном времени отсчеты упругой системы гравиметра в пикселях пересчитываются в показания гравиметра (мГал). После цифровой “фильтрации” в приборном компьютере показания записываются в файл и воспроизводятся на экране для визуального контроля; в то же время регистрируются отсчеты (в пикселях) по каждой из

кварцевых систем; время, горизонтальные ускорения по осям стабилизации и иная дополнительная информация. Двойная упругая кварцевая система гравиметра содержит рычаг с грузом, являющимся пробной массой. Он удерживается в горизонтальном положении с помощью предварительно закрепленных нитей, задающих ось его вращения и одну степень свободы, и зеркалом для оптического считывания сигнала. При изменении силы тяжести горизонтально расположенный в исходном положении рычаг поворачивается на угол $\Delta\varphi$, что является мерой изменения суммы силы тяжести и инерционных ускорений. Использование двух идентичных встречно расположенных крутильных систем исключает



“Сердце” морского гравиметра создано в виде упругой системы из кварцевого стекла. Показано пять поколений упругой системы, разработанной с 1975 по 2018 гг. в ИФЗ РАН. Внизу рисунка представлена кварцевая система, вынутая из корпуса.

возникновение орбитального эффекта, обусловленного килевой качкой судна. Двойная упругая кварцевая система гравиметра помещена в специальную жидкость; такая конструкция позволяет “фильтровать” вертикальные инерционные ускорения и необходима для температурной компенсации и изоляции внешнего давления. Помещенная в термостат упругая система вместе с оптико-электронным преобразователем оптического сигнала в цифровой (то есть в пиксельный) образуют отдельный прибор – чувствительный элемент гравиметра (гравиметрический датчик). Синхронно с работой гравиметра, по мере поступления, регистрируются координаты геофизического судна с частотой 1 Гц и глубины моря.

Одновременно с разработкой аппаратуры гравиметрического комплекса совершенствовались технологии выполнения с его помощью морских работ,

методики обработки полученных при измерениях данных и метрологическое обеспечение.

Для камеральной обработки (преобразования массива полученных цифровых данных в графики и карты) разработан пакет программ, имеющий государственную регистрацию. В него входят программы оценки точности измерений аномалий гравитационного поля на пересечениях съемочных профилей (длина прохода судна в одном направлении), формирования отчетных файлов по результатам измерений в рейсе и другие. Используя полученные первичные данные, вычисляют показания гравиметра, получают и вводят поправки, вызванные действием горизонтальных ускорений, а также иные поправки, способные (если их не учитывать) существенно исказить “полезный” сигнал. Возникающие от качки ускорения эффективно устраняются с помощью

многозвенного фильтра с одновременным восстановлением полезного выходного сигнала гравиметра. При площадных съемках аномалий гравитационного поля оценивают погрешность измерений по невязкам (несовпадениям с имеющимися результатами ранее выполненных опорных измерений) в пунктах пересечений съемочных профилей.

Для испытаний аппаратуры и совершенствования методики и технологии выполненных съемок выполнялись экспедиционные работы на всех акваториях Мирового океана более чем на 20-ти исследовательских судах Министерства геологии СССР, Военно-морского флота, Академии наук СССР (ныне – РАН), Главного управления геодезии и картографии. Выполнены измерения на профилях длиной от 2,5 тыс. км в Атлантическом, Индийском, Тихом и Северном Ледовитом океанах. Самый длинный профиль осуществлен в Тихом океане (7 тыс. км), самый большой использованный полигон (площадью до 200–300 км²) находится

над разломом Кейн, который расположен на Срединно-Атлантическом хребте. Самая длительная экспедиция (продолжительностью 270 суток) выполнена на научно-исследовательском судне “17-й съезд профсоюзов”.

К числу последних экспедиций следует отнести морские гравиметрические измерения, проводившиеся на борту научно-исследовательского судна “Согар”. В период с 2014 по 2018 гг. проводились непрерывно гравиметрические съемки разной детальности в отдельных районах Индийского океана.

Специфика морских работ, выполняемых в условиях длительной “оторванности от дома”, накладывает отпечаток на сотрудников экспедиций; частично разлуку с домом компенсируют виды в океанах, которые не увидишь на материке.

В ИФЗ РАН разработаны и предложены методичес-



Научно-исследовательское судно “Согар”, выполнявшее комплексные гравиметрические измерения с 2014 по 2018 гг. На борту были установлены гравиметры “Шельф”.

кие приемы применения соответствующей коррекции результатов морских гравиметрических измерений с учетом современных моделей аномалий гравитационного поля Земли. Этот методический прием успешно использовался при выполнении морских съемок в 2014–2018 гг. в Индийском океане с помощью гравиметра “Чекан АМ”.

Главным результатом разработанных в ИФЗ РАН методических приемов является величина полученной оценки невязок значений аномалий, вычисленных в точках пересечений съемочных галсов площадной гравиметрической съемки: в предельном значении она составляет 0,06 мГал, что значительно лучше, чем при выполнении гравиметрических измерений на суше.

МЕТОД АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Аэрогравиметрия – наиболее молодой метод получения гравиметрической информации. Его основная отличительная особенность – выполнение съемки на высоте от земной поверхности, что требует внесения существенных изменений в состав аппаратуры, методику выполнения непосредственных измерений и в обработку материалов по сравнению с традиционными морскими и наземными съемками. Названные задачи были успешно решены в ИФЗ РАН. Созданный в институте аэрогравиметрический комплекс, размещенный на самолете лаборатории АН-26БРЛ, позволил на протяжении двенадцати лет (с 2006 по 2017 гг.)



Морской гравиметр “Чекан АМ”.



Самолет лаборатории AN-26БРЛ. На нем находились гравиметры типа “Силомер” российского производства; остальная аппаратура изготовлена в ИФЗ РАН.

выполнять аэрогравиметрические съемки в высоких широтах северного полушария, в обширных районах Тихого океана и Охотского моря и решать различные прикладные (в том числе навигационные) задачи.

Потребность создания специализированных самолетов лабораторий (цель которых – проведение аэрогравиметрических съемок) обусловлена необходимостью учета влияния следующих факторов:

- большие перепады внешних температур;

- изменение режимов работы двигателей и уровней возникающих вибраций;
- частые обледенения самолета, изменяющие электромагнитную совместимость приемников GPS со штат-

ными самолетными радиосистемами;

- непредсказуемые погодные условия, изменяющие уровень инерциальных ускорений;

- неустойчивая радиосвязь.

Отсек с установленными гравиметрами внутри самолета лаборатории AN-26БРЛ.





Тундра. В период с 2011 по 2013 гг. сотрудники ИФЗ РАН выполняли с самолета лаборатории АН-26БРЛ съемку над обширным участком арктического побережья России.

Внутри самолета необходимо было создать отдельное помещение, обеспечивающее эксплуатацию аэрогравиметрических комплексов на его борту. При создании такого помещения учитывались следующие условия:

- оно должно было находиться в виде отдельного замкнутого объема для удобства его отдельного термостатирования внутри самолета;

- помещение должно быть расположено вблизи метacentра самолета лаборатории;

- для уменьшения “термоударов” (влияния резкого изменения температуры) на

обшивку самолета лаборатории в полете и на стоянке была необходима “пассивная” термоизоляция салона гравиметрической лаборатории;

- антенны GPS должны находиться на минимальном расстоянии от аэрогравиметрических комплексов и “вынесены” от фюзеляжа самолета лаборатории (не должны соприкасаться с фюзеляжем);

- внутри лаборатории, в местах крепления аэрогравиметрических комплексов, должна быть предусмотрена вибрационная “защита”, рассчитанная с учетом массы установленных

там аэрогравиметрических комплексов.

В 2006–2013 гг. коллективом лаборатории 601 Института физики Земли РАН с борта самолета лаборатории АН-26БРЛ были выполнены гравиметрические измерения над южной, центральной и северо-западными частями архипелага островов Новая Земля и над прилегающими акваториями Баренцева и Карского морей. На общей площади (180 тыс. км²) были выполнены аэрогравиметрические съемки и построены гравиметрические карты масштаба 1:200 000. В ходе работ,

помимо перенесенных трудностей и невзгод в Арктике, можно было наблюдать величественные картины нетронутой природы.

В 2011–2013 гг. тот же коллектив выполнил площадную аэрогравиметрическую съемку масштаба 1:200 000 на площади 60 тыс. км² в

центральной части Карского моря. В 2013–2017 гг. сотрудники ИФЗ РАН выполнили аэрогравиметрическую съемку масштаба 1:200 000 общей площади 560 тыс. км² восточного побережья и районов Камчатки, акваторий Тихого океана и Охотского моря, ряда островов Курильской гряды.

Выполненные обширные экспедиционные работы показали, что коллектив ученых ИФЗ РАН способен решать конкретные задачи гравиметрии и, по необходимости, проводить высокоточные морские и аэрогравиметрические съемки гравитационного поля Земли.

Информация

Галактика NGC 3981

В рамках программы “Космические сокровища”, используя приемник FORS2 на Очень Большом Телескопе (VLT) “Анту” Европейской Южной Обсерватории (ESO), астрономы сфотографировали спиральную галактику NGC 3981, расположенную в 65 млн св. лет от нас в созвездии Чаши (см. 4-ю стр. обложки). Это часть Местной группы – часть сверхскопления Девы, включающего примерно 30 тысяч галактик, в том числе Млечный Путь, которой также принадлежат известные взаимодействующие галактики Антенны

(NGC 4038 и NGC 4039) в созвездии Ворона.

FORS2 выделяется среди множества современных приемников комплекса VLT своей исключительной многофункциональностью. Этот инструмент прозвали “швейцарским ножом” за способность исследовать астрономические объекты разными методами, в том числе и получать такие замечательные по качеству изображения. Чувствительность FORS2 позволила выявить спиральные ветви NGC 3981, в которых заметны многочисленные пылевые волокна и области звездообразования, газопылевые облака и плазма, а также яркий диск, состоящий из молодых горячих звезд. Галактика очень удачным образом повернута по отношению к Земле: это позволяет обозревать ее центральную область и испускающее яркое высокоэнергетическое из-

лучение ядро, в котором находится сверхмассивная черная дыра. В NGC 3981 есть хорошо развитая периферийная спиральная структура, частично простирающаяся за ее пределы. Скорее всего, она возникла в результате гравитационных взаимодействий при произошедшем в прошлом столкновении галактик.

На снимке ESO галактика NGC 3981 – не единственный интересный объект. Наряду с несколькими звездами переднего плана, принадлежащими нашей Галактике, обнаружен пересекающий поле зрения бродячий астероид (слабая линия в верхней части изображения). Фотография получена наложением трех различных экспозиций.

*Пресс-релиз ESO,
12 сентября 2018 г.*