История наук о Земле 2008. Т. 1. №4. С.29 – 54

УДК 550.312(091)

Постоянно действующая морская гравиметрическая экспедиция на судах АН СССР (1967–1990 гг.)

В.А. Тулин

Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Аннотация Описывается многолетняя работа Института физики Земли Академии наук СССР в рамках общесоюзной программы мировой гравиметрической съемки. Приводятся сведения о разработке оригинальной цифровой автоматизированной аппаратуры – пионерской для СССР. Кратко упоминается о машинной обработке наблюдений. Параллельно с инструментальными разработками велись морские наблюдения силами Постоянно действующей морской гравиметрической экспедиции на судах научно-исследовательского флота АН СССР. За 23 года существования экспедиции с измерениями пройдено около 480 000 км непрерывных морских профилей. По независимой оценке погрешность наблюдений соответствует лучшим мировым достижениям.

Ключевые слова: автоматизация, АМГ, гиростабилизация, рейс, машинная обработка, погрешности наблюдений.

Вводные замечания

К 50-м годам прошлого столетия в полной мере пришло осознание того, что без знания элементов глобального гравитационного поля Земли невозможно эффективно изучать планету с геодезической и геофизической точек зрения. При этом проявился колоссальный диспаритет наземных и морских измерений ускорения свободного падения (далее – УСП). Если было понятно, как развивать первые, то со вторыми дело обстояло катастрофически. Не было ни специалистов, ни аппаратуры для решения этой задачи. Во всей стране насчитывалось несколько морских маятниковых приборов и, может быть, десяток человек, которые реально представляли себе, что такое морская гравиметрия.

Попытка в какой-то мере закрыть белое пятно размером в 70% земной поверхности с помощью маятниковых наблюдений с подводных лодок была заведомо неперспективной. Поэтому в организациях, имевших отношение к гравиметрии, развернулись поиски альтернативных способов решения этой задачи. Таким способом стало предложение сотрудника ВНИИГеофизики Мингео СССР К.Е. Веселова [1956; Веселов, Пантелеев, 1958], заключавшегося в применении схемы наземного гравиметра с горизонтальной крутильной нитью типа Норгарда. Жидкостный демпфер датчика гравиметра обеспечивал апериодическое затухание колебаний маятника. В разработке теоретических основ способа помимо К.Е. Веселова участвовали специалисты разных научно-исследовательских организаций [Кузиванов, 1958; Романюк, 1961; Пантелеев, Исматходжаев, 1965]. По инициативе Ю.Д. Буланже эта идея начала развиваться и в Институте физики Земли АН СССР (ИФЗ). Здесь зачинателем стал Е.И. Попов, которым были опубликованы описание и первые итоги исследований макета морского гравиметра [Попов, 1959а,б], основанного на идее К.Е. Веселова, в модификации ИФЗ (общее наименование разросшегося потом семейства – ГАЛ).

Постановлением Совета Министров СССР от 24.03.67 № 259-100 была утверждена общесоюзная программа по Мировой гравиметрической съемке (МГС). Морские измерения входили в состав программы непременной составной частью. В числе соисполнителей программы была указана и Академия наук СССР. Во исполнение Постановления СМ СССР Президиумом АН СССР 20.05.1967 г. издано распоряжение № 64, которым, в частности, Институту физики Земли АН СССР поручалось создание постоянно действующей морской гравиметрической экспедиции, базирующейся, в основном, на судах научно-исследовательского флота АН СССР (ПДМГЭ). Распоряжением от 29.11.1967 г. № 45-1602 Президиум АН СССР назначил научным руководителем ПДМГЭ Ю.Д. Буланже, а начальником – В.А. Тулина. Впоследствии действие Постановления СМ СССР было трижды пролонгировано, а распоряжениями 1977, 1984 и 1986 гг. Президиум АН СССР подтверждал существование ПДМГЭ и состав ее руководства.

В круг задач, решаемых ПДМГЭ, входили следующие:

– создание автоматизированной аппаратуры для измерения УСП на подвижном основании, обеспечивающей представление информации в виде, удобном для непосред-

© Тулин В.А., 2008

ственного ввода в ЭЦВМ, а также разработка программ для машинной обработки результатов наблюдений;

– создание устройств для стабилизации гравиметров и стендового оборудования для их лабораторных исследований;

– организация постоянных лабораторий на научно-исследовательских судах АН СССР;

– разработка методики определения ускорения свободного падения на море и проведение измерений в Мировом океане.

Обратим внимание на один немаловажный аспект. Гравиметрические данные в СССР признавались секретными, а потому не подлежали оглашению. В то же время объем получаемых тогда нашей страной материалов был несопоставимо мал по сравнению с мировым. Чтобы иметь доступ к последним, нужно было в порядке обмена вносить свою лепту в международный банк гравиметрических данных. Академии наук СССР в порядке исключения было предоставлено право такого обмена, и в результате мы имели в десятки раз больше информации, чем добывали сами.

Главный прибор для работы ПДМГЭ и его основные данные

В качестве датчика морского гравиметра использовалась упругая система гравиметра ГАЛ. Опустив этапы извилистого и долгого пути решения задачи автоматизации отсчета, укажем, что наиболее перспективным в ИФЗ был признан способ аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сигнала гравиметра, предложенный автором этой статьи в 1962 г. [Тулин, 1965а,б].

Принципиальная схема гравиметра с АЦП показана на рис. 1. Горизонтально расположенная нить закручена на угол φ моментом, создаваемым силой mg и плечом не уравновешенного относительно нити рычага (маятника) L. Мерой изменения g служит изменение φ. Последнее измеряется с помощью автоколлимационной схемы (на рис. 1 не показанной), в которую входят осветитель (Осв), подвижное (ПЗ) и неподвижное (НЗ) зеркала. Первое связано с маятником,

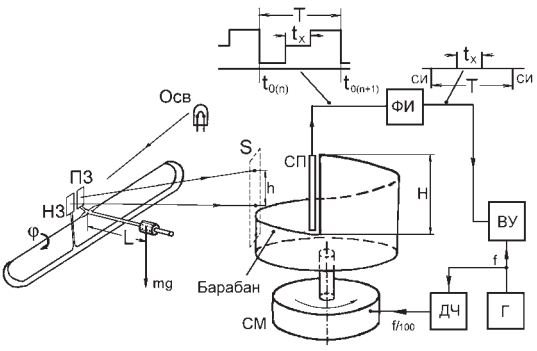


Рис. 1. Принципиальная схема ОМПО

второе – с рамкой, на которой натянута нить. Эту конструкцию принято называть упругой системой (или датчиком) гравиметра. Отраженные от зеркал блики фокусируются в плоскости S (плоскость сканирования); мерой изменения g служит изменение расстояния между бликами h, измеряемое в дальнейшем тем или иным способом. Этот участок схемы регистрации соответствует гравиметру ГАЛ, в котором положение бликов фиксируется на фотопленке.

В предлагаемой схеме АЦП расстояние измеряется с помощью оптико-механического преобразователя отсчета (ОМПО). Плоскости сканирования касается полый вращающийся барабан с винтообразной формой торца; шаг этого винта равен H. Внутри барабана помещается светоприемник (СП). Блики поочередно пересекаются обрезом торца и одновременно задним срезом ширмы. На выходе СП образуется трехступенчатый сигнал. Моменты $t_{0(n)}$ и $t_{0(n+1)}$ соответствуют началам (n)-го и $(n+1)$-го циклов, а интервал между ними (T) есть период преобразования единичного отсчета. Формирователь импульсов (ФИ) преобразует сигнал от СП в пару измерительных импульсов (показаны положительными) и один синхроимпульс (показан отрицательным), которые поступают на вычислительное устройство (ВУ), предназначенное для предварительного (или окончательного) сглаживания сигнала гравиметра. Туда же подается сигнал высокочастотного генератора (Г). Барабан приводится во вращение синхронным мотором (СМ), имеющим 100 пар полюсов. Частота питающего СМ напряжения вырабатывается делителем частоты (ДЧ) и кратна частоте кварцевого генератора (Г). Измерению подлежит интервал t_x, соответствующий отрезку h. Эта операция производится путем заполнения интервала импульсами генератора с последующим подсчетом их количества (n) в полученной пачке. Легко видеть, что $t_x/T=h/H$, или $h=t_x(H/T)$. Переходя к количеству импульсов, получим $h=n\times H/N$. Частоты, используемые в применявшемся нами ОМПО: генератора — 100 кГц, питания СМ – 1 кГц,

вращения барабана – 10 Гц. При таких параметрах максимальный отсчет (диапазон измерений) составляет 10000 имп. Частота генератора стабильна, и он одновременно служит хранителем времени.

Схема датчика гравиметра, приведенная на рис. 1, относится к односистемному прибору. В реальности применяется двухсистемный датчик (рис. 2), свободный от систематической ошибки, возникающей при орбитальных движениях судна (кросс-каплинг-эффект). Датчик представляет собой две идентичные упругие системы с противоположно ориентированными маятниками. На рамках *1* натянуты нити *2*, закрученные весовым моментом маятников *3*. Положение маятников измеряется при помощи подвижных *4* и неподвижного *5* зеркал. В процессе юстировки датчика каждая из этой пары систем может независимо друг от друга поворачиваться в плоскостях нити *XZ* и маятника *YZ*. Нами использовались две схемы регистрации: двух- и одноканальная. В первом случае измерительный тракт содержит два идентичных канала, один из которых иллюстрируется рис. 1. Двухканальная схема показана на рис. 3, *а*. Особенность схемы состоит в том, что оптические пути каждого из каналов, начиная со светоприемника, обособлены. Независимо друг от друга, каждый в своем канале, измеряются интервалы t_1 и t_2 (интервал t_x на рис. 1). Рассмотрим работу устройства на примере канала 1. Схема управления 1 заполняет интервал t_1 импульсами генератора, образуя пачку с числом импульсов в ней n_1 Пачка импульсов поступает на сумматор. Наблюдатель задает время осреднения сигнала гравиметра, и схема управления создает цуг пачек, в котором содержится соответствующее их количество. В итоге сумматор регистрирует сумму импульсов в заданном количестве пачек (сумма ординат сигнала). Этот результат выводится на световое табло, фиксируется вручную и далее делится на число ординат. В результате получается средняя ордината за интервал наблюдений. Разность средних ординат 1-го и 2-го каналов есть отсчет по гравиметру. Схема была реализована вычислительными устройствами ВУМ. Они имеют пересчетные схемы емкостью 8 десятичных разрядов с выдачей результата суммирования на световые табло. Десятичный разряд представлен кодом 1-2-4-2. Этот первый вариант ОМПО применялся в гравиметрах ГАЛ-ОМПО-2 и использовался в первых морских работах.

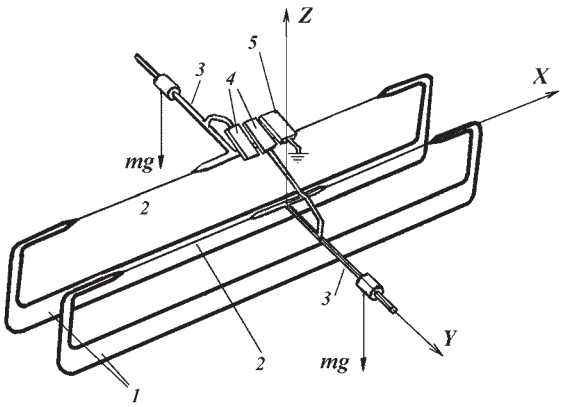
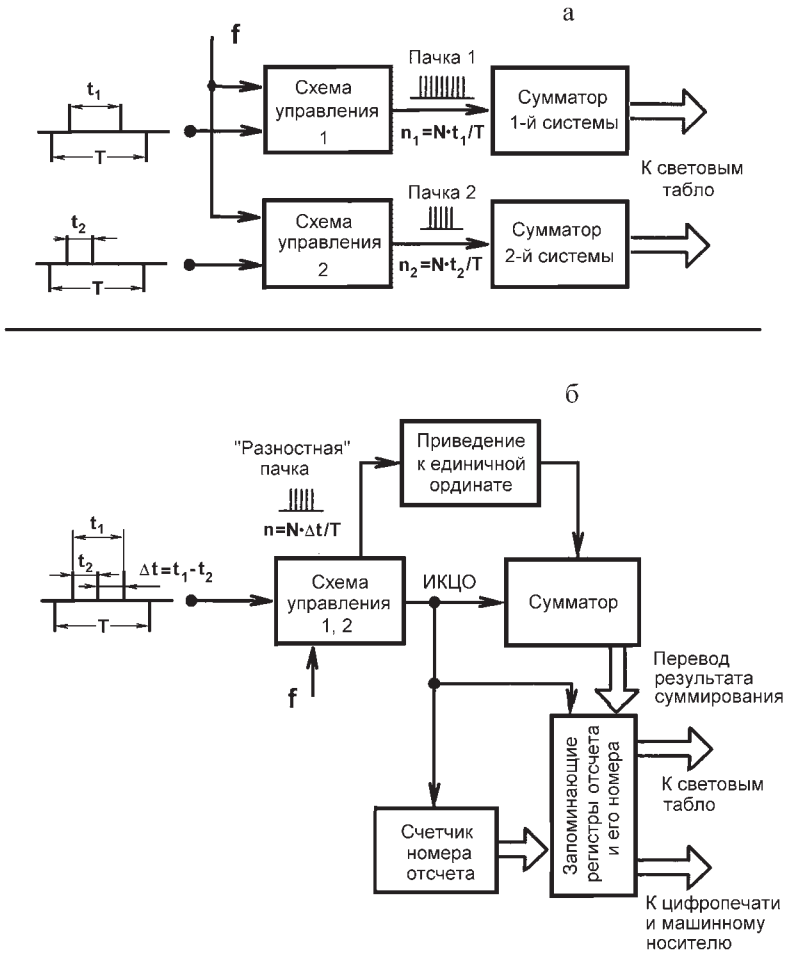


Рис. 2.
Двойная система гравиметра АМГ



Свое развитие ОМПО получил в схеме одноканальной регистрации (рис. 3, *б*). На светоприемник попадают два блика от подвижных и один от неподвижного зеркал, поэтому сигнал ОМПО имеет четырехступенчатую форму, а после ФИ он представлен ансамблем из трех положительных

Рис. 3.
Схемы регистрации ОМПО: а – двухканальная, б – одноканальная

и одного отрицательного импульсов. По желанию наблюдателя схема управления 1, 2 может образовывать либо пачку 1, либо пачку 2, либо их разность. Иными словами, каждую из систем можно наблюдать по отдельности, что бывает необходимо при лабораторных исследованиях, либо получать разность их сигналов без образования пачек 1 и 2. Результат осреднения выдается в виде единичной 5-разрядной ординаты с одним десятичным знаком после запятой независимо от времени осреднения, а порядок каждой из фиксируемых цифр сохраняется постоянным. Помимо суммирующего был введен запоминающий регистр, а также счетчик номера отсчета. После достижения заданного количества суммируемых ординат вырабатывается импульс конца цикла осреднения (ИКЦО на рис. 3,*б*), который переводит результат, накопленный в сумматоре, в запоминающий регистр и дает команду на считывание обновленной информации. Последнее происходит параллельно с началом очередного цикла осреднения. Эта принципиальная схема стала основной и реализована приборами АМГ-ВУ разных модификаций.

Первые гравиметры с этим АЦП были изготовлены в 1965 г. [Осинская и др., 1966], тогда же разработан и первый макет обеспечивающего его работу электронного блока [Башилов и др., 1966]. Впоследствии способ был реализован в ОКБ ИФЗ серией из 18 приборов. В своих последовательных модификациях они успешно применялись в морских работах с 1967 г. Последняя конфигурация гравиметра (1990 г.) позволяет получать информацию о гравитационном поле в режиме реального времени. Отметим, что разработки ИФЗ в области автоматизации морских гравиметрических наблюдений были пионерскими для СССР.

Аппаратура пребывала в состоянии перманентного совершенствования, поэтому перед каждым рейсом и после него она подвергалась лабораторным исследованиям на определение цены деления и воздействие инерциальных ускорений. Первое из них, эталонирование наклоном, было основательно проработано как теоретически, так и практически сотрудниками параллельных подразделений ИФЗ [Романюк и др., 1966; Исследования…, 1972; Буланже, 1976; Козьякова, Щеголькова, 1976]. Относительная погрешность эталонирования составляла, как правило, $\pm 1\times 10^{-3}$ в диапазоне 3.5 Гал.

Для выяснения свойств гравиметра без гиростабилизатора были проделаны его исследования на установке ИСВГУ [Универсальный…, 1962] без гиростабилизатора. При вертикальных ускорениях до 95 Гал обнаруживаются погрешности (от прибора к прибору) – (1.2–0.4) мГал. Горизонтальные ускорения в пределах погрешности наблюдений при диапазоне до 100 Гал и периодах 4–120 с не вызывают систематической погрешности [Тулин, 1969]. Исследования гравиметра в комплекте с гиростабилизатором показывали разные результаты, и ниже о них будет упоминаться в каждом конкретном случае.

Типичные для всех дальнейших модификаций прибора характеристики: порог чувствительности гравиметра примерно ±0.2 мГал при диапазоне измерений без перестройки 10–12 Гал; постоянные времени жидкостного демпфера – около 100 с при погрешности их определения 1%.

Начальный период морских работ ПДМГЭ

Особенность работ ПДМГЭ заключалась в том, что наблюдатели в своем основном составе были одновременно и разработчиками аппаратуры. Они перманентно, от рейса к рейсу, вносили в нее усовершенствования или проводили принципиальную модификацию. Автор, будучи руководителем темы, стремился всякую новую инструментальную или методическую разработку проверять лично в морских условиях.

Первые рейсы имели во многом экспериментальный характер. Наиболее основательными в этом плане были исследования в 43-м рейсе э/с «Витязь» и 3-м рейсе НИС «Академик Курчатов», их дополняли работы в 5-м рейсе НИС «Академик Курчатов».

Первоочередная задача — выяснить, с какой погрешностью можно проводить наблюдения на крупнотоннажных судах в открытом океане. В отличие от работы в прибрежной зоне, где успешно применялись методические приемы типа «профильного метода», океанские условия означают наличие следующих обстоятельств: 1) большие периоды (до 20 с) и амплитуды (во многие десятки Гал) возмущающих ускорений, 2) длительные (2 – 4 недели) интервалы между опорными наблюдениями, 3) большое (иногда до 2.5 Гал) изменение УСП между опорными пунктами, 4) как правило, существенное (иногда от Заполярья до тропиков) изменение климатических условий в течение

морских работ, 5) большой объем наблюдений (многие тысячи пунктов). Перечисленное требует высокой долговременной стабильности работы всей аппаратуры, малых погрешностей цены деления и надежной работы гиростабилизатора.

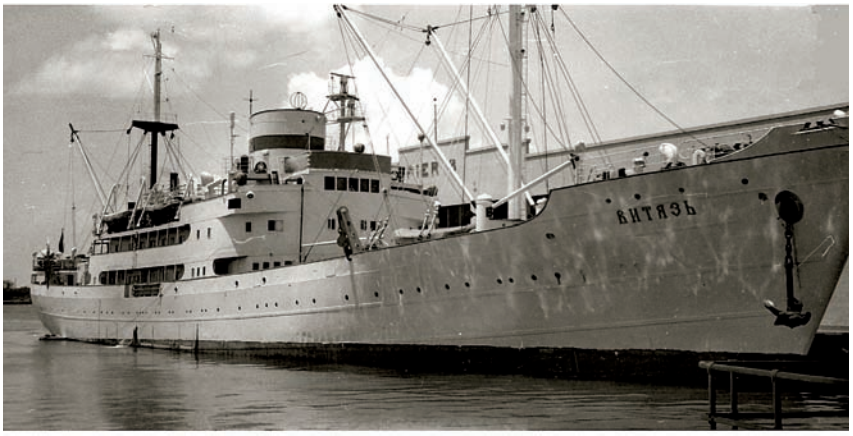
Наблюдения по программе МГС начались в 1968 г. Поначалу применялись два основных типа гравиметров: GSS-2 – известный в мировой практике прибор немецкой фирмы «Аскания» и различные модификации гравиметра ГАЛ разработки ИФЗ. К этому времени гравиметры ГАЛ прошли серьезный комплекс исследований в прибрежных плаваниях (см., например, [Попов, Марков, 1965; Марков, Попов, 1968]). В рамках ПДМГЭ работы велись практически только цифровыми гравиметрами ГАЛ-ОМПО-2 [Осинская, Тулин, 1969] и, главным образом, АМГ [Антонов и др., 1969; Тулин, Осинская, 1970].

1968 г., 43-й рейс э/с «Витязь» (отряд № 1)

В 1939 г. на верфях Бремерхафена (Германия) было построено грузопассажирское судно «Марс». После войны оно в качестве военного трофея было передано Великобритании и переименовано в «Empire Forth», а затем Советскому Союзу, где, в зависимости от ведомственной принадлежности, носило имена «Экватор», «Адмирал Макаров» и, наконец, «Витязь». Последнее имя судно получило в 1946 г. [Кузнецов, Нейман, 2005], и после переоборудования с 1949 г. стало экспедиционным судном АН СССР. Судно имело водоизмещение при полной загрузке 5750 т, наибольшие длину 108 м и ширину 14.4 м. Автор приносит свои извинения за невысокое качество этой (и всех остальных) любительской фотографии.

Отряд имел в своем распоряжении два гравиметра ГАЛ-ОМПО-2, вычислительные устройства ВУМГ, гиростабилизированную платформу Н-55 и прибор РУГ.

Конструктивно ВУМГ выполнен в блочном виде на полупроводниковых платах навесного монтажа. Время предварительного осреднения заранее устанавливается оператором в пределах от 3 до 1000 с 15 значениями – (3, 5, 7, 9, 10)*(1, 10, 100). Единицей времени служит 1 оборот синхронного мотора, питаемого от кварцевого генератора. По окончании очередного интервала осреднения отсчет выводится на световое табло в двоично-десятичном коде (1-2-4-2) и регистрируется оператором вручную. Для начала очередного цикла предыдущий отсчет нужно сбросить и перезапустить счет заново. Гиростабилизатор Н-55 разработан для аэрофотосъемки, но был приспособлен для морских наблюдений. На нем установлены два гравиметра и прибор для регистрации ускорений и фотографирования горизонта РУГ [Попов, Суходольский, 1970].



Экспедиционное судно "Витязь"

Главная методическая задача состояла в учете систематической погрешности, возникающей вследствие совместного воздействия горизонтальных ускорений $\ddot{X}$, $\ddot{Y}$ и остаточных наклонов α, β гиростабилизатора (ГС). Теория показывает, что при известных величинах углов и ускорений, а также фазы между ними учесть ее несложно. Для случая монохроматических возмущений

$$\delta g_{X,\alpha} = -g\frac{\alpha_0^2}{4} + \frac{\ddot{X}_0\alpha_0}{2}\cos\lambda_{X,\alpha}; \qquad (1)$$

$$\delta g_{Y,\beta} = -g\frac{\beta_0^2}{4} + \frac{\ddot{Y}_0\beta_0}{2}\cos\lambda_{Y,\beta}, \qquad (2)$$

где $\delta g_{X,\alpha}$, $\delta g_{X,\beta}$ – эффекты воздействия; индексы «0» означают амплитуды величин, а λ_X и λ_Y – сдвиги фаз между ускорениями и наклонами. Суммарное воздействие горизонтальных ускорений и вызванных ими наклонов $\delta g_{X,Y} = \delta g_{X,\alpha} + \delta g_{X,\beta}$.

Если измерить ускорения сравнительно просто, то с определением остаточных углов возникает проблема. Разрешать ее путем фотографирования горизонта возможно только в идеальных условиях наблюдений. При рядовой съемке работы должны вестись всегда, а ночью, при тумане и дымке, крупной волне горизонт попросту не виден.

Автором был предложен способ учета эффекта $\delta g_{X,\alpha}$ и $\delta g_{X,\beta}$ без измерения остаточных углов. Он основан на том, что углы – это функция горизонтальных ускорений. Если на основании стендовых исследований установить экспериментальные зависимости $\delta g_{X,\alpha} = f(\ddot{X}, T)$ и $g_{X,\beta} = f(\ddot{Y}, T)$, то эффект можно найти по записям показаний аксе-

лерометров. Автор отдает себе отчет в паллиативности этого предложения. Остаточные наклоны состоят из знакопеременных отклонений положения ГС от вертикали вследствие воздействия горизонтальных ускорений и неполной отработки углов наклона палубы. Вторая составляющая зависит от качества технического исполнения ГС и не имеет отношения к его функциональным свойствам как системы автоматического регулирования.

Указанные соображения были проверены экспериментально на стенде ИС-ВГУ [Универсальный…, 1962]. Тележке стенда задавались перемещения от ±40 до ±240 см при периодах от 6.5 до 240 с. Строился график величин измеренного эффекта; они хорошо аппроксимируются прямой. Туда же наносились теоретически вычисленные эффекты. Последние находились с использованием данных об ускорениях того или иного режима и измеренных с помощью коллиматора соответствующих ему остаточных углов. Вычисленные эффекты уверенно ложатся на этот график.

Обратимся к работам в рейсе. Гравиметры располагались на расстояниях от метацентра: продольное X= –1.3 м (в корму), поперечное Y=4.2 м (от диаметральной плоскости судна), вертикальное Z=4.4 м (вверх). Наблюдения велись, когда позволяла погода и судно шло с неизменными курсом и скоростью. Записи РУГ производились по 3 мин в течение каждого часа, что для открытого океана вполне представительно. Как и ожидалось, фотографировать горизонт практически не удавалось, и через неделю попытки были прекращены. Регистрировались только ускорения. Использование фотопленки создает большие неудобства в практической работе, особенно на судне без кондиционера. Отсюда очевидна актуальность замены РУГ более подходящим акселерометром.

Показания двух гравиметров, установленных на одном ГС, нельзя считать независимыми, и оценка точности наблюдений по их сходимости некорректна, но она позволяет судить об уровне стабильности работы аппаратуры.

Для оценки точности были выполнены наблюдения на трех специально организованных полигонах с навигационной опорой в виде заякоренного буя и шести контрольных галсах (место находилось по счислению). По 152 точкам пересечений на полигонах получена полная случайная погрешность ±4.5 мГал при погрешности пункта на галсе ±3.8 мГал. По 40 сравнениям на контрольных галсах те же погрешности равны ±5.3 мГал и ±3.6 мГал соответственно. При камеральной обработке вводилась поправка за горизонтальные ускорения. В среднем за рейс она составила весьма заметную величину в 14 мГал. Систематическую погрешность мы тогда определить не могли. Эта возможность появилась в середине 1980-х годов, когда сотрудниками Ламонтской обсерватории (Lamont-Doherty Geological Observatory, USA; аббревиатура – LDGO) был проведен сравнительный анализ наблюдений в Мировом океане [Watts et al., 1985]. По 83 пересечениям систематическая разность составила –3.6±1.6 мГал. Последний результат подтверждает целесообразность применения упомянутой методики учета эффекта воздействия горизонтальных ускорений и остаточных наклонов.

1968 г., 3-й рейс НИС «Академик Курчатов» (отряд № 2)

Научно-исследовательское судно АН СССР «Академик Курчатов» (далее АК) построено в 1965 г. на верфях г. Висмар (ГДР) по заказу АН СССР, вступило в строй в конце 1966 г.— начале 1967 г. Водоизмещение судна 6830 т, длина 124 м и ширина 17 м. При его оборудовании были установлены гиростабилизированные площадки, разработанные для других целей. Использовались два корабельных гиропоста, способных нести помимо аппаратуры нескольких наблюдателей. Даже датчики этих постов (собственный вес каждого около 800 кг) – гироазимутгоризонт "Диск-46" – можно было нагружать аппаратурой весом в десятки килограмм. В лаборатории судна была смонтирована также гиростабилизированная площадка (ГСП), предназначенная для сухопутного применения. В табл. 1 приведена сводка некоторых эксплуатационных характеристик этих устройств (паспортные данные и последующие натурные исследования). Основная задача работ в рейсе заключалась в выяснении возможности достаточно точных измерений на ходу и в дрейфе с применением этих штатных устройств.

Отряд имел следующую аппаратуру: гравиметры GSS-2 – 2 шт., гравиметры ГАЛФМА с фотозаписью разработки ИФЗ – 4 шт.; прибор РУГ-М для регистрации наклонов и ускорений на гиропосту. Оба типа гравиметров имеют аналоговую форму регистрации. Цена деления самописца «Аска-

Таблица 1. *Некоторые данные штатных гиростабилизаторов НИС «Академик Курчатов»*

Устройство	Погрешность	Время непрерывной работы	Расстояния от МЦ, м		
			X	Y	Z
Гиропост	± 20 (по РУГ)	Максимально 6 ч, практически 2-4 ч	15	3.8	12
“Диск-46”	± 10		–18	0.9	0
ГСП	± 12	2 час, перерыв 4 ч	–13	0	–0.5

ния» составляет 1 мГал/мм, возмущенность записей оценивается в 10-40 мГал. Цена деления ГАЛ-ФМА составляет 100 мГал/мм, возмущенность записей 400-1000 мГал, осреднение возмущенной 10-минутной записи с применением компаратора занимает около 1 ч при ошибке единичного отсчета около 0.05 мм.

Гравиметры GSS-2 вначале наблюдались на гиропосту. Помимо больших возмущений существовали значительная тряска и резкие рывки. Вдобавок при температуре в гиропостах, достигавшей зачастую 33–35°, термостаты гравиметров просто не функционировали. Наблюдения обнаружили неустойчивую межприборную разность от –34 до +112 мГал. При ветровой волне 1–2 балла и зыби 2–3 балла приборная разность составляет 30–40 мГал, при 3–5 баллах ветрового волнения и зыби 3–4 балла появляются выбросы до нескольких сотен мГал. Ввиду неудовлетворительности этих результатов гравиметры были перенесены на "Диск-46", что уменьшило уровень возмущений и улучшило качество стабилизации. Вместе с этим уровень вибраций повысился, поскольку "Диск-46" расположен в пространстве между главным двигателем и гребными винтами. Влияние вибраций оценивалось путем сравнения отсчетов в дрейфе и на ходу (8 сравнений). Разность "дрейф – ход" составила 89 мГал при колебаниях 22 мГал. Случались скачки в 100 мГал и более. Внешний контроль (по подводным наблюдениям Уорзела 1955 г.) показал преувеличение на 58 мГал при средних квадратических колебаниях 15 мГал.

Гравиметры ГАЛ-ФМА были установлены на ГСП. Сравнение с работами Уорзела дает преувеличение на 5–15 мГал.

Общий объем наблюдений в рейсе составляет 2170 миль гравиметром GSS-2 и 950 миль гравиметром ГАЛ-ФМА. Говоря о работах в целом, можно констатировать, что измерения отягощены систематической ошибкой 40–60 мГал. При постоянных курсе и скорости она изменяется на 10, иногда на 15 мГал за несколько часов наблюдений. Случайные погрешности составляют 5–10 мГал для GSS-2 и 10–15 мГал для ГАЛ-ФМА.

Объяснять эти погрешности недостаточным качеством гравиметров нет никаких оснований, поскольку они неплохо зарекомендовали себя во множестве других плаваний. Очевиден вывод о неприменимости для гравиметрических работ штатных ГС по качеству, местам их расположения и малым допустимым временам непрерывной работы. Оснащение ими судна можно объяснить только нашим слабым знанием к тому времени реальных условий наблюдений при плавании в открытом океане.

1969 г., 5-й рейс НИС «Академик Курчатов» (отряд № 5)

Одна из методических задач, решаемых отрядом, заключалась в доказательстве возможности полноценных наблюдений на этом судне. Инструментальная задача состояла в оценке работоспособности новых приборных разработок. В рейсе впервые использовались гравиметры АМГ с одноканальной схемой регистрации. Информация автоматически записывалась в десятичном виде на бумаге и на перфоленте с помощью готового изделия УРИ-2М. Перфоратор ПЛ-20 регистрировал информацию в кодах ЭВМ "Минск-2". Сохранялась возможность визуального отсчета с помощью светового табло. Стандартное время предварительного осреднения равнялось 100 с. В качестве ГС использовался макет, изготовленный на базе Н-55 (условный шифр НГМ), оснащенный электромеханическими акселерометрами МП-14. Аппаратура была удалена от источника вибраций, создаваемых главным двигателем; их уровень на новом месте был на порядок ниже, чем в штатной лаборатории. Расстояния от метацентра: X= +20.1 м, Y= –4.3 м, Z= +4.0 м. По результатам лабора-

торных исследований воздействие горизонтальных ускорений для амплитуд 5–98 Гал и периодов 8–18 с составляло от 0.8 до 1.0 мГал/Гал.

Брак составил 7% из общего объема наблюдений, в том числе 5% из-за погоды. Погрешность наблюдений оценена по сходимости двух применявшихся в рейсе приборов и по пересечениям галсов на полигонах. В первом случае погрешность составила 1.8 мГал, во втором при общем количестве пересечений 626 — 3.2 мГал. Систематическая погрешность по оценке LDGO равна –3.2 мГал. Точность наблюдений неизмеримо выше, чем в 3-м рейсе этого судна, и вопрос о пригодности АК для гравиметрических наблюдений решен однозначно положительно. Что касается новой аппаратуры, то устойчивость ее работы была вполне удовлетворительной.

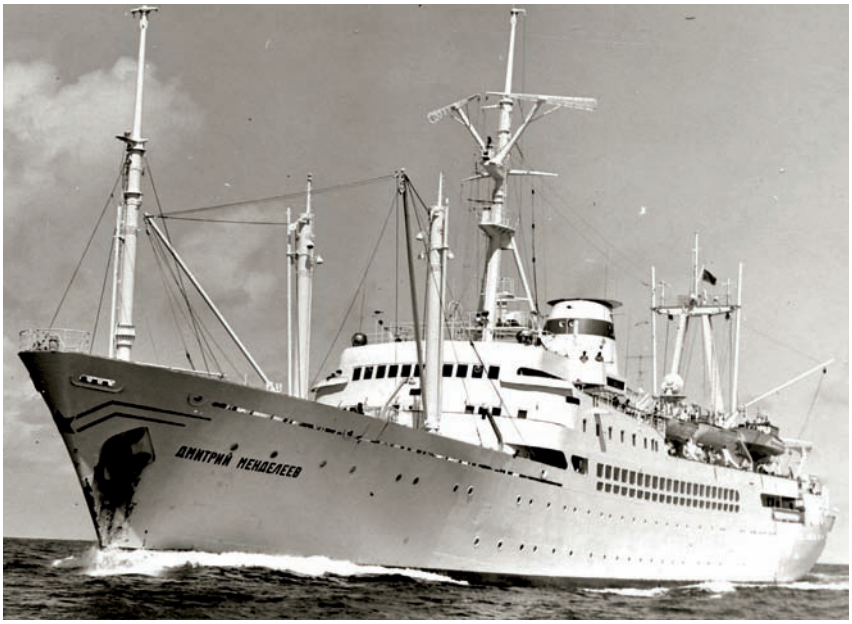
В рейсе впервые была осуществлена оперативная машинная обработка до уровня предварительного каталога на ЭВМ "Минск-2", адаптированная впоследствии к ЭВМ "Минск-22" под аббревиатурой КОМПОСТ [Боярский, 1970, 1974].

Регулярные работы ПДМГЭ

1970 г., 3-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 8)

Большинство океанских работ ПДМГЭ было проведено на НИС «Дмитрий Менделеев». Это судно серии, головным в которой было НИС «Академик Курчатов» (АК). Из числа оборудования были исключены штатные для АК гиростабилизаторы и организованы две дополнительные гравиметрические лаборатории на уровне второй палубы с расстояниями от метацентра: X=–18.0, Y= –6.5 (+6.5), Z= +1.1 м. Уровень вибраций в лабораториях близок к наблюдавшимся в 5-м рейсе АК. Нужды МГС требовали первоочередных наблюдений в Тихом океане, где данные о гравитационном поле были весьма скудны. Судно изначально предназначалось для работ в этом районе Мирового океана, поэтому оно стало основным для базирования ПДМГЭ. Всего на НИС «Дмитрий Менделеев» нами было проведено 14 плаваний.

НИС «Дмитрий Менделеев»



В рейсе была сделана попытка наблюдений на двух ГС для получения независимых результатов по разным гравиметрам. Использовались 2 гравиметра АМГ и 2 гравиметра ГАЛ-ОМПО-2, установленные попарно на гироплатформах НГМ и Н-55. Обслуживающая гравиметры электроника аналогична применявшейся в 5-м рейсе НИС «Академик Курчатов». Во время рейса гироплатформа Н-55 необратимо вышла из строя, и наблюдения велись преимущественно двумя приборами. По стендовым исследованиям эффект воздействия горизонтальных ускорений составлял от 1.2 до 0.8 мГал/Гал. В среднем за рейс волнение было 3 балла, иногда приходилось работать при 4–5 баллах; погрешность введения поправки за горизонтальные ускорения оценивается в ±3 мГал. По внутренней сходимости двух приборов для одного приборопункта погрешность составила ±3.2 мГал, что свидетельствует о неплохой устойчивости их работы.

Работы в рейсе разделялись на две группы: первая — профильные измерения, попутные с другими работами в рейсе; вторая — измерения на гидрологическом полигоне площадью 2°×2°. Полигон представлял собой акваторию с большим количеством заякоренных буев, несущих гидрологическую аппаратуру и расположенных друг от друга на расстояниях в несколько десятков миль. Наблюдения велись на переходах между буями, поэтому о долговременной стабильности режима движения судна не было и речи. Определение места проводилось по счислению и трехкратным (в лучшем случае) астрономическим наблюдениям в сутки. Общая протяженность наших наблюдений составила 7423 мили (3639 пункт). По результатам сравнений в точках пересечений галсов ошибка, случайно меняющаяся от пункта к пункту, составила 3.4 мГал, а слу-

чайная ошибка, присущая галсу в целом независимо от направления, ±5.7 мГал. Полная случайная ошибка аномалии силы тяжести на пункте составила ±6.6 мГал.

1971 г., 6-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 10)

Перед рейсом была произведена перегруппировка гравиметрических лабораторий: на второй палубе вместо двух была оборудована одна, но удвоенной площади, что позволило организовать наблюдения в более удобных условиях.

Методология морских наблюдений, принятая нами, предполагает измерения группой однотипных гравиметров. Такой подход дает возможность оценить точность по внутренней сходимости, но при этом необходима индивидуальная стабилизация каждого прибора, иначе наблюдатель лишается права рассматривать полученные данные как независимые. Имея в виду, что гравиметр постоянно совершенствовался, нужный для наших целей ГС должен быть прост и доступен в изготовлении на неспециализированных производствах, поскольку привлечение для этой цели промышленных предприятий потребовало бы огромных потерь времени и значительных расходов.

Результатом поисков стала конструкция [Кутепов, 1971], в некоторой мере удовлетворяющая указанным требованиям. Гиромаятниковый стабилизатор (ГМС) хорошо зарекомендовал себя при работах, предполагающих наблюдения на коротких галсах. При анализе поведения гравиметра, установленного на ГМС, при воздействии монохроматических возмущений обнаруживается следующее:

$$\delta g_{X,\alpha} = \frac{\ddot{X}^2}{2g}\frac{T_X^2}{T_0^2}, \quad \delta g_{Y,\beta} = \frac{\ddot{Y}^2}{2g}\frac{T_Y^2}{T_0^2}. \qquad (3)$$

Здесь $T_0 = \frac{4\pi H}{\sqrt{mglR}}$; δg – погрешность за воздействие горизонтальных ускорений (по осям X и Y); g — УСП; $\ddot{X}$, $\ddot{Y}$ – амплитуды горизонтальных ускорений по этим осям; T_X, T_Y – их периоды; T_0 – период собственных колебаний ГМС; H — кинетический момент гиромотора (далее ГМ), m – масса стабилизируемой части ГМС; l – расстояние от центра тяжести стабилизируемой части ГМС до оси подвеса (плечо маятниковости); R – жесткость упругого подвеса ГМ.

Обратим внимание, что остаточный угол наклона здесь в явном виде вообще не фигурирует.

Сотрудниками ИФЗ и Тульского политехнического института (ТПИ) разработан гиромаятниковый стабилизатор АМГ-ГМС-1. Собственный период ГМС с отключенными ГМ составляет 2–3 с, а с работающими 60–100 с. Регулировка периода производится изменением плеча маятниковости. Исследования на стендах наклонов «Скорсби» показали, что эффект воздействия знакопеременных наклонов при углах около ±4°30' с периодами от 4 до 22 с не превышает 0.5 мГал. ГМС оснащен двумя парами согласованных между собой 2-минутных уровней. Ампулы одной пары заполнены обычной жидкостью, второй – вязкой, что дает возможность контролировать уход ГМС на качке.

В рейсе использовались три гравиметра АМГ со стабилизаторами АМГ-ГМС-1, один из которых был оснащен акселерометрами МП-18. Эффект воздействия горизонтальных ускорений по результатам стендовых исследований составляет около 0.27 мГал/Гал, т.е. в 3–5 раз меньше, чем для Н-55.

Рейс проходил в хороших погодных условиях. Горизонтальные ускорения бортовой качки лежали в пределах 7–34 Гал, килевой 0–6 Гал. Отличительная особенность наблюдений – многочисленные завалы ГС. Это происходило как на прямолинейных галсах в случаях большого рысканья, так и на поворотах. Причина неустойчивой работы ГМС – малая маятниковость. Оценка по внутренней сходимости дала удручающие результаты. Из общего числа наблюдений отбракована половина приборопунктов, полностью забракованы 33% пунктов. Из числа принятых тремя гравиметрами измерено 25%, двумя – 28%, одним – 14% пунктов. Полная инструментальная ошибка по внутренней сходимости после отбраковки составила: при наблюдениях двумя приборами 2.5–3.0 мГал, тремя — 2.0–2.5 мГал. Оставшийся после отбраковки материал оказался вполне приличного качества. По данным LDGO систематическая погрешность рейса по 181 сравнению составляет +1.2 мГал.

По результатам наблюдений в рейсе были сделаны два однозначных вывода.

1. Стабилизатор гравиметра типа ГМС обеспечивает малую общую систематическую погрешность наблюдений и приемлемую случайную, что подтверждается результатами анализа LDGO и оценки точности по внутренней сходимости.

2. Неустойчивость работы ГМС объясняется малой маятниковостью, поскольку момент сил сухого трения в осях карданова подвеса и изменяющегося момента сопротивления токонесущих проводов оказывается существенным по отношению к моменту, приводящему подвес в положение мгновенной вертикали. Послерейсовые стендовые исследования обнаружили ухудшение качества стабилизации в среднем на 30%, что также свидетельствует об увеличении момента трения в осях подвеса. Вдвое увеличился также разброс точек около аппроксимирующих линий.

Очевидный способ борьбы с такой ситуацией при условии сохранения качества стабилизации – увеличение маятниковости и, как следствие, одновременное увеличение кинетического момента гиромоторов.

1973 г., 9-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 12)

К началу рейса была разработана модификация ГМС (шифр АМГ-ГМС-2), в которой использовались ГМ с кинетическим моментом, в шесть раз превосходящим применявшиеся ранее. Это позволило значительно увеличить плечо маятниковости. Собственный период при включенных гиромоторах составил 320–550 с, т.е. в 5 раз больше, чем у АМГ-ГМС-1. Эффект воздействия горизонтальных ускорений составлял 0.09 мГал/Гал, т. е. втрое меньше, чем у АМГ-ГМС-1. Комплект одного гравиметра (без устройств регистрации) показан на рис. 4.

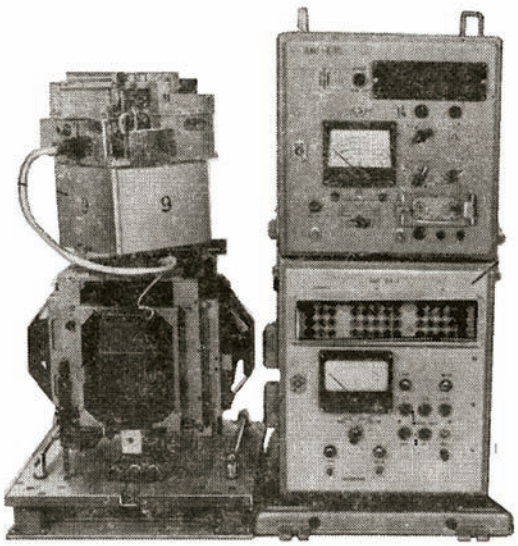


Рис. 4. Комплект одного гравиметра АМГ без устройств регистрации

Помимо АМГ-ГМС-2 применялся новый полупроводниковый блок управления печатью, заменивший собой прежний электромеханический вариант.

В рейсе наблюдались многочисленные обрывы струн подвеса гиромоторов по причине несовершенства конструкции ее заделки. В первой трети рейса произведены замены струн у всех ГМС, что вызывало обеспокоенность по поводу точности наблюдений в рейсе. К счастью, гиромаятниковый стабилизатор, как тип ГС, оказался весьма неприхотливым. Результаты лабораторных исследований после рейса оказались идентичны полученным перед рейсом. Наблюдались также завалы ГМС на циркуляциях и резких рысканьях, для исключения чего нужно соблюдать повышенную аккуратность при маневрировании. Из-за выходов из строя ГС около 17% всего количества пунктов рейса забраковано. Оставшийся материал характеризуется следующими данными: случайная часть погрешности наблюдений, оцененная по сходимости приборов и по пересечениям на полигонах в зависимости от состояния моря и числа работавших приборов составила 2–4 мГал; систематическая часть, по оценке LDGO, равнялась –3.1 мГал (212 сравнений).

В следующем, 10-м рейсе, по аппаратуре и методике повторяющем 9-й, обнаружился неожиданный источник погрешностей. Перед рейсом профилактически заменяются осветительные лампочки оптической схемы, поскольку срок их службы ограничен, а аппаратура в процессе подготовки и морских наблюдений не выключается многими месяцами. Лампочки очередной партии оказались недолговечными, в то время как ранее применявшиеся безупречно служили не менее 6–8 мес. Замена перегоревшей лампочки на новую влечет за собой скачок в смещении нуля, и эта операция допустима только на опорном пункте.

1973 г., г/с «Николай Коломейцев» и «Валериан Альбанов» (отряды № 13 и 14)

Гидрографические суда «Николай Коломейцев» и «Валериан Альбанов» принадлежат к серии судов, головным из которой было г/с «Дмитрий Овцын». Основные данные: водоизмещение 1600 тонн, длина наибольшая 69 м, ширина 12 м, скорость 13.5 узлов. Судовладелец – гидрографическое предприятие ММФ СССР.

Работы, выполнялись по приглашению Министерства геологии СССР. Тогда в стране остро стоял вопрос о широкомасштабной геофизической съемке шельфа, составной частью которой были гравиметрические наблюдения. Необходимой для этого отечественной аппаратуры не было, а зарубежные образцы дороги. Требовался надежный и дешевый гравиметр, простой в изготовлении и адаптированный к использованию в производственных партиях. Организациями Министерства геологии СССР, Академии наук СССР и МГУ были предложены пять вариантов приборов. Для выбора наиболее перспективного Министерством геологии СССР была организована экспедиция в акватории Баренцева моря с целью их совместного исследования. Одновременно экспедиция решала геологоразведочную задачу по поиску углеводородов.

ПДМГЭ участвовала в работах двумя отрядами. Каждый из них имел стандартный набор аппаратуры, тождественный примененному в 9-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев». Подробные данные о результатах работ в экспедиции изложены в работе [Тулин, Боярский, 2007]. Здесь приводится только итог. Средняя квадратическая погрешность (СКП) по внутренней сходимости составила 0.8 мГал (по массиву из 4200 пунктов), ту же точность обнаружили астазированные узкодиапазонные приборы ГМН-72 разработки Министерства геологии СССР, точность остальных образцов оказалась существенно более низкой. Для массовой серии Министерство геологии приняло свои приборы.

Производственные результаты выразились в построении карт сечением 5 мГал на акватории площадью 44000 км^2. Это была первая в СССР площадная надводная гравиметрическая съемка.

1976 г., 23-й рейс НИС «Академик Курчатов» (отряд № 20)

Работы проводились по приглашению Института океанологии РАН в рамках программы сравнительной оценки масштаба нефтегазоносности в Баренцевом и Норвежском морях. Аппаратура была размещена не в штатной гравиметрической лаборатории, а в гидрооптической – подальше от источника вибраций. Наблюдения велись стандартным комплектом АМГ из трех приборов. Гравиметры помещались на гиростабилизаторах АМГ-ГМС-2, установленных на общей амортизированной раме (рис. 5).

Гидрографическое судно «Иван Киреев». Однотипно с судами «Валериан Альбанов» и «Николай Коломейцев»

Вычислительные устройства гравиметров и устройства для регистрации находились на рабочем месте наблюдателя (рис. 6).

Стендовые исследования показали, что при горизонтальных ускорениях до 40 Гал эффект их воздействия составил по разным осям и разным приборам от 0 до 0.08 мГал/Гал. Те же результаты были получены и после рейса.

На циркуляциях наблюдались многочисленные завалы ГМС. Уже в процессе наблюдений утрачено 4.5% приборопунктов, а в результате обработки отбраковано еще 10%.

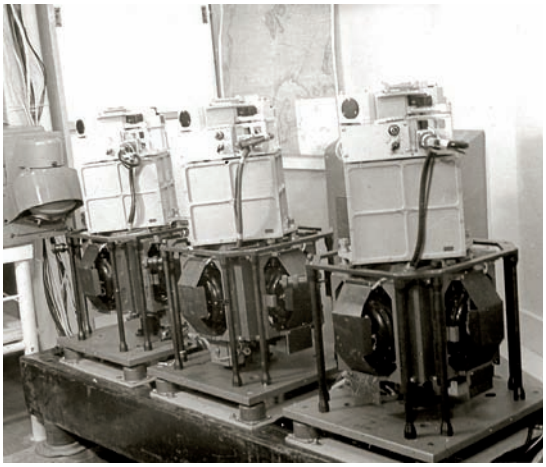


Рис. 5. Штатный комплект гравиметров на гиростабилизаторах АМГ-ГМС-2

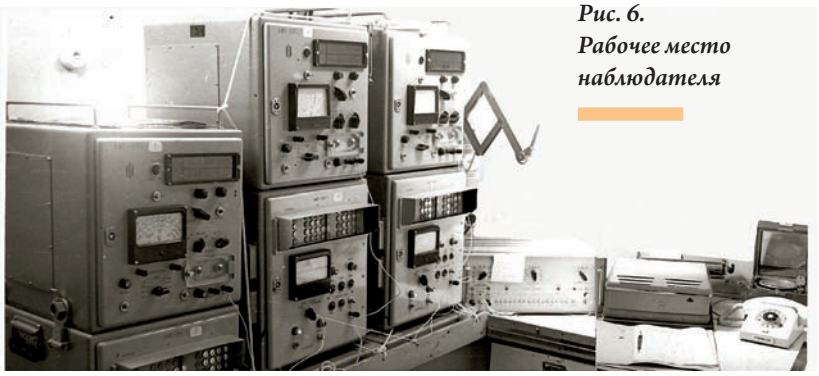
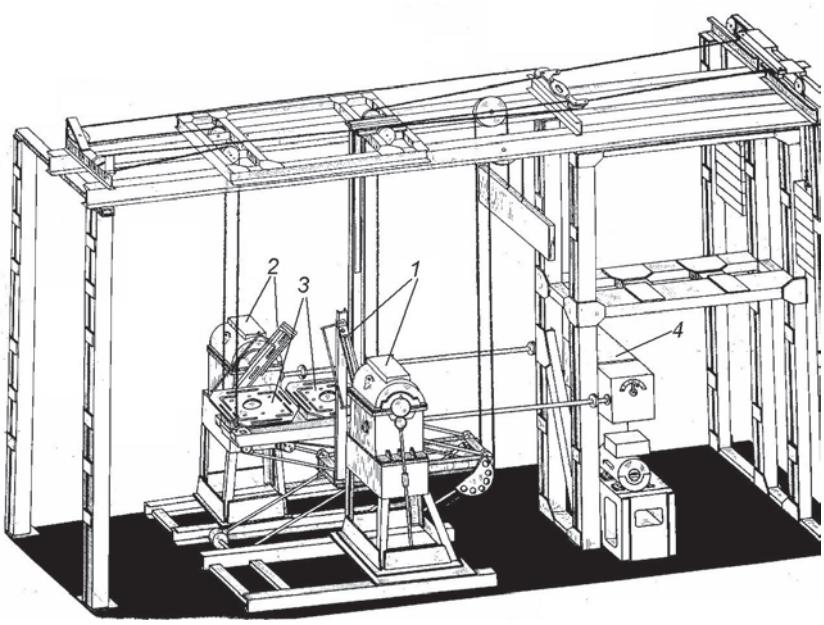


Рис. 6. Рабочее место наблюдателя

Погрешность наблюдений по приборным разностям в целом составила ±2.2 мГал, расхождения по 21 пересечению ±4.5 мГал. Повторные прохождения по четырем профилям общей протяженностью немногим более 100 миль дали погрешность ±3.2 мГал.

Проблема недолговечности лампочки осветителя была решена путем введения в оптический тракт ОМПО устройства, названного имитатором упругой системы. Оно состоит из двух сваренных между собою зеркал, помещаемых в герметически закрытую плоскую коробку, которая по желанию наблюдателя может быть введена (и выведена) в промежуток между объективом оптической системы и защитным стеклом датчика гравиметра. Таким образом, можно наблюдать либо угол между зеркалами датчика (рабочее положение), либо неизменный угол между зеркалами имитатора (контрольное положение). Операции введения/выведения имитатора производятся извне без демонтажа или отключения термостата. После замены лампочки ОМПО юстируется так, чтобы отсчет от имитатора был близким к исходному. Имитатор также дает возможность быстро и надежно установить правильность работы всего тракта АЦП, включая вычислительное устройство и цифропечать. По результатам исследования единичная погрешность установки имитаторов в пересчете на УСП составляет от 0.2 до 0.4 мГал. Как показали длительные морские наблюдения, дрейф отсчета самих имитаторов, линеен и составляет 0.0–0.1 мГал/сут. Он автоматически учитывается поправкой за смещение нуль-пункта.

Рис. 7.
Стенд для исследования гравиметрической морской аппаратуры (СИГМА-4)



Существенно модернизирован датчик гравиметра в направлении увеличения возможностей взаимной юстировки систем, для чего был сконструирован новый корпус датчика. Исследования жесткости корпуса гравиметра [Киреев, Кутепов, 1975] обнаружили его деформации при воздействии горизонтальных ускорений, в том числе горизонтальной составляющей, возникающей при наклонах в процессе эталонирования. Деформации ведут к неконтролируемой погрешности определения цены деления из-за несоответствия углов наклона плиты установки для эталонирования и корпуса упругой системы.

Введение в оптическую схему гравиметра имитатора, модернизация датчика, увеличение жесткости корпуса привели к кардинальным конструктивным изменениям прибора.

Новшеством в береговом обеспечении работ было введение в строй 4-компонентно-го стенда для испытания гравиметрической морской аппаратуры – СИГМА-4 [Жучков и др., 1977]. По сравнению с ранее применявшимися стендами он позволяет намного полнее имитировать картину реальных возмущений. К сожалению, сделать фотографию стенда не удалось, поскольку эта многотонная конструкция размещена в довольно тесном помещении. Взамен дана фотография его аксонометрического чертежа (рис. 7). Редуктор и кривошип *1* обеспечивают вертикальные перемещения, а редуктор и кривошип *2* – горизонтальные. На площадках *3* (стол стенда) располагаются два гравиметра с гиростабилизаторами. Допустимый вес каждого из них не менее 100 кг. Амплитуды перемещений плавно регулируются в пределах от 0 до 75 см ходовыми винтами, расположенными на кривошипах. Периоды устанавливаются набором рукояток, расположенных на коробке скоростей привода 4. Они могут изменяться дискретно от 3 до 120 с при коэффициенте ряда 1.26. Столу стенда могут придаваться синусоидальные горизонтальные и вертикальные ускорения как по отдельности, так и одновременно при любой фазе между ними. При желании одновременно с горизонтальными ускорениями стол может испытывать знакопеременные наклоны до ±7° и поворачиваться по азимуту с периодами, независимыми от периода ускорений. Периоды совместных вертикальных и горизонтальных ускорений могут быть кратными; в этом случае стол описывает фигуры Лиссажу.

Из многочисленных новых результатов, полученных с помощью стенда, следует отметить обнаружение серьезного несоответствия между величинами теоретически вычисленного и экспериментально обнаруженного кросс-каплинг-эффекта [Тулин, Кузиванов, 1988].

1977 г., 18 рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 21)

Для основных работ в рейсе использовался обычный комплект аппаратуры, состоявший из трех гравиметров; АМГ-ГМС-2 модернизирован в направлении его эксплуатационной надежности, и потерь наблюдений по его вине не было. Методика морских работ не отличалась от применявшейся в других рейсах. Поправка за горизонтальные ускорения лежала в пределах от 0 до +4.7 мГал, составляя в среднем +1.8 мГал.

В рейсе проводилась обработка с получением предварительного каталога (без поправок за горизонтальные ускорения) на ЭВМ «Минск-22». Сглаживание 2-минутных отсчетов производилось весовым средним (косинусоида) на 10- или 20-минутном интервалах. С отставанием на 7-10 дней контролировалась работа гравиметров по внутренней сходимости. СКП по измерениям двумя гравиметрами оказалась равной 2.3 мГал, тремя – 1.8 мГал (92.6% всего объема наблюдений). По результатам оценки отбраковано около 1% выполненных измерений. Контроль по пересечениям на полигоне дал величину СКП 2.0 мГал, а по контролю LDGO (324 пересечения) обнаружена систематическая погрешность +2.3 мГал.

Помимо наблюдательных в рейсе, как и всегда, решались экспериментальные задачи. Исследовался на работоспособность в морских условиях опытный образец вычислительного устройства (ВУ), выполненный на современной элементной базе (интегральных микросхемах). Показано, что в кондиционированной лаборатории ВУ работает безупречно.

В комплекте с четвертым гравиметром испытывался макет нового варианта ГМС (шифр ДГМС), обладавшего, как показывали расчеты, заметными преимуществами перед применявшимся. Эта модификация отличалась от предыдущих наличием демпфера прецессионных движений. Было установлено, что погрешность наблюдений не хуже той, которую обеспечивают АМГ-ГМС-2, а эксплуатационные качества много выше. Так, при крутой циркуляции отклонения стабилизируемой части ДГМС от положения вертикали не превышали 10' (при этом АМГ-ГМС-2 ложатся на упоры), время прихода площадки в рабочий горизонт после принудительного отклонения подвижной части на 10° – не более 2 мин, в то время как у АМГ-ГМС-2 оно составляет 20–40 мин. Стабилизатор свободен от резонансных колебаний, присущих недемпфированным ГМС. Заметим все же, что на АМГ-ГМС-2, применявшихся с 1972 по 1978 гг., получено около 45000 пунктов с погрешностью в зависимости от методики и условий наблюдений ±(1–4) мГал.

Отвлекусь от основной нити повествования, показав несколько жанровых сценок, связанных с рейсом, который был особенно богат на интересные заходы. В частности, судно посетило дер. Бонгу, где в XIX в проводил свои этнографические исследования Миклухо-Маклай. Автор познакомился с вождем племени Бонгу и даже сфотографировался с ним. При заходе в порт Брисбен нами был обнаружен столб с указателями расстояний до известных в мире пунктов , в том числе и до Москвы. При заходе в порт Нукуалофу (о. Тонга) с удовольствием уходили в увольнение.

Е.И. Магницкая в Брисбене

«Вождь» ПДМГЭ и вождь Бонгу

Увольнение в Нукуалофе (о-ва Тонга). Слева направо: В.И. Коренфельд, К.Н. Киреев, Т.К. Никифоров, Е.И. Магницкая

1978-1979 гг., 2-й рейс г/с «Иван Киреев» (отряд № 24)

Гидрографическое судно «Иван Киреев» принадлежит к судам, типа г/с «Дмитрий Овцын». Предстояло выяснить, какова будет точность наблюдений в открытом океане на судне малого тоннажа. Гравиметры и обслуживающая их электроника были теми же, что и в 23-м рейсе НИС« Академик Курчатов». Принципиальным инструментальным новшеством было применение макетных образцов ДГМС совместной разработки ИФЗ и ТПИ, получивших впоследствии серийный шифр АМГ-ГМС-3.

Устройство демпфера показано на рис. 8,а. Гироблок подвешен на упругой нити и может совершать прецессионные движения в подшипниках *1*. Этот участок схемы соответствует недемпфированному ГМС. Через муфту *2* физическая ось прецессии связана с осью цилиндрического ротора *3*, вращающегося внутри цилиндрического статора *4*. Зазор между ротором и статором заполнен вязкой жидкостью *5*. Изменяя высоту погружения ротора в жидкость путем вертикального перемещения статора, можно уменьшить или увеличить степень демпфирования. Этого же можно достичь, конечно, изменением вязкости жидкости или величины зазора, но первый путь несравненно проще. Работа ДМГС описана в [Киреев и др., 1978а,б].

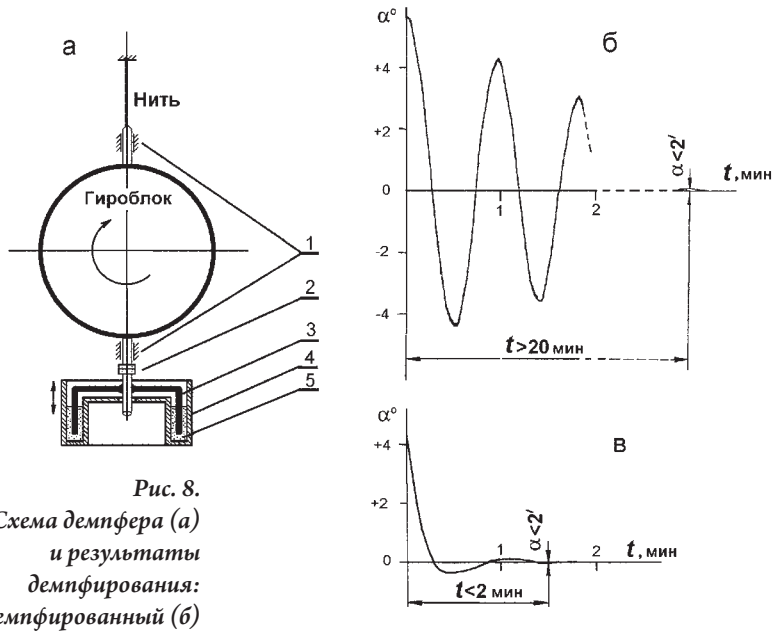


Рис. 8. Схема демпфера (а) и результаты демпфирования: недемпфированный (б) и демпфированный (в) ГМС.

Физику улучшения качества работы гравиметра за счет введения демпфирования можно понять, если обратиться к формулам (1) и (2). Угол сдвига фаз λ зависит, в частности, от степени демпфирования, изменение последнего ведет к изменению величины второго слагаемого правой части. Первое слагаемое всегда отрицательно, и можно найти такой λ, при котором $\delta g=0$. Это относится не ко всему спектру частот возмущений, и настройка демпфера производится для преобладающей полосы.

Погрешность вследствие воздействия горизонтальных ускорений для ДГМС описывается выражениями (4), аналогичными формулам (3) для ГМС.

$$\delta g_X = \frac{\ddot{X}^2}{4g}\frac{T_X^4}{T_0^4}, \quad \delta g_Y = \frac{\ddot{Y}^2}{4g}\frac{T_Y^4}{T_0^4}. \qquad (4)$$

Здесь $T_0=\frac{4\pi H}{\sqrt{mglR}}$.

Погрешности δg_X и δg_Y существенно меньше, чем для ГМС, поскольку численный коэффициент в знаменателе вдвое больше и, кроме того, дроби T_X/T_0 и T_Y/T_0 в случае (3) стоят во второй степени, а в случае (4) – в четвертой. При условиях $T_X<<T_0$ и $T_Y<<T_0$ выигрыш оказывается значительным.

Другое превосходство ДГМС заключается в кратковременности переходного процесса установления ДГМС в горизонт. На рис. 8,б и в показаны результаты экспериментальной оценки переходного процесса, проделанной с одним из вариантов конструкции. После принудительного отклонения на угол около 5° ГМС приходит в горизонт не менее чем через 20 мин, в то время как для ДГМС необходимо не более 2 мин.

Подчеркнем, что введение демпфирования резко повышает динамическую погрешность, и рекомендовать такое устройство для стабилизации других объектов не стоит. Поэтому ДГМС нужно считать эксклюзивным «гравиметрическим гиростабилизатором».

Оценка точности работ в рейсе: по внутренней сходимости для одного приборопункта погрешность составляет ±4.5 мГал, по 100 пересечениям на трех полигонах она равна ±5.3 мГал.

1980 г., 24-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 25)

Для стабилизации гравиметров впервые были использованы стабилизаторы АМГ-ГМС-3 серийного изготовления. Их основные эксплуатационные характеристики: плечо маятниковости стабилизируемой части от 0 до 40 мм при шаге его изменения 3 мм, статические застои при наклонах основания ±20° не выходили за пределы 2'. Влияние го-

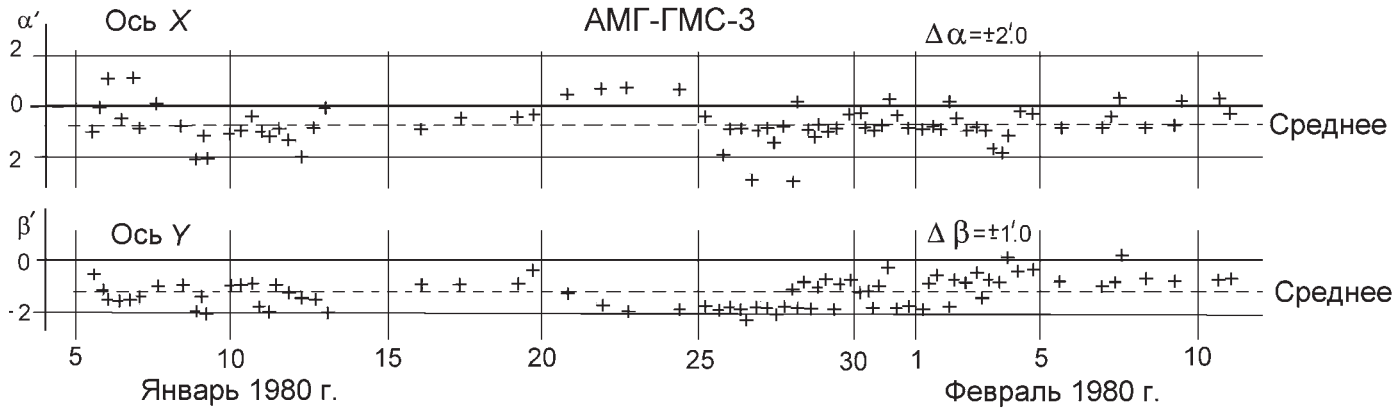


Рис. 9. Поведение гиростабилизатора АМГ-ГМС-3 в море

ризонтальных ускорений (по разным осям и для разных стабилизаторов) в диапазоне до 50 Гал либо близко к нулю, либо составляет –3, –2 мГал. Работу стабилизатора в море иллюстрирует график рис. 9, на котором изображено поведение вязких уровней. Среднее горизонтальное положение на интервале более 5 недель сохраняется с погрешностью 1–2 мин. дуги. Заметим, что результаты исследования гиромаятниковых стабилизаторов с демпфером по оси прецессии послужили основанием для оснащения ими серийных гравиметров ГМН-72 разработки Министерства геологии СССР.

Оценка точности наблюдений в рейсе проведена по повторным прохождениям галсов при перерыве между ними 6–12 сут. По 452 сравнениям погрешность пункта составляет 2.5 ±0.5 мГал.

1982 г., 28-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 26)

Дальнейшее развитие методики наблюдений шло в направлении совершенствования технологии оперативной машинной обработки. Перманентное обновление парка судовых ЭВМ требовало корректировки матобеспечения. Набортная ЭВМ "Минск-22", на которую имелся пакет программ Э.А. Боярского, была заменена машинами ЕС-1010 (ОС ИДОС) и Hewlett-Packard (ОС РТМ) – далее hp. Адаптация к ним пакетом из пяти программ была реализована С.К. Дюкаревым и А.В. Коноплевым. В те времена, когда об использовании персональных ЭВМ, включаемых в комплект гравиметрической аппаратуры, не было и речи, подобные операции были неизбежны. Основной программой нового пакета была GWIN (в модификациях GWINM, GWINR, GWIND и т.д.), предназначавшаяся для вычисления весового среднего отсчета по гравиметрам и статистической оценки точности по внутренней сходимости приборов. После необходимого редактирования окончательный, готовый к камеральному счету материал архивировался на магнитной ленте.

Погрешность одного приборопункта по внутренней сходимости для рейса в целом составляет ±2.2 мГал.

1983-1984 гг., 31-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 28)

Точностные характеристики аппаратуры и условия наблюдений были стандартными.

Серьезным новшеством в методике оперативного контроля наблюдений было привлечение к этой операции графиков аномалий. Построение графиков проводилось на плоттере, входящем периферийным устройством в комплект судовой ЭВМ hp. На рис. 10 приведен 10-часовой фрагмент рисовки группы галсов. На графике ясно виден характер разброса пунктов относительно некой аппроксимирующей кривой. В правом верхнем углу расположена врезка с фрагментом другого галса, иллюстрирующая вид аномалии с двумя забракованными пунктами и влияние неучтенного подворота. Графики строились по всему массиву данных как описываемого, так и двух последующих рейсов «Дмитрий Менделеев». Заметим, кстати, что выбранный рисунок интересен тем, что участок аномалии, имеющий максимум на отметке 50 миль, имеет градиент около 20 мГал/миля, экзотичный для открытого океана.

Все материалы для окончательной камеральной обработки были подготовлены в рейсе на магнитной ленте. Камеральная обработка, как и во всех других случаях, проводилась по программам, разработанным Э.А. Боярским и его сотрудниками [Боярский и др., 1983–1985].

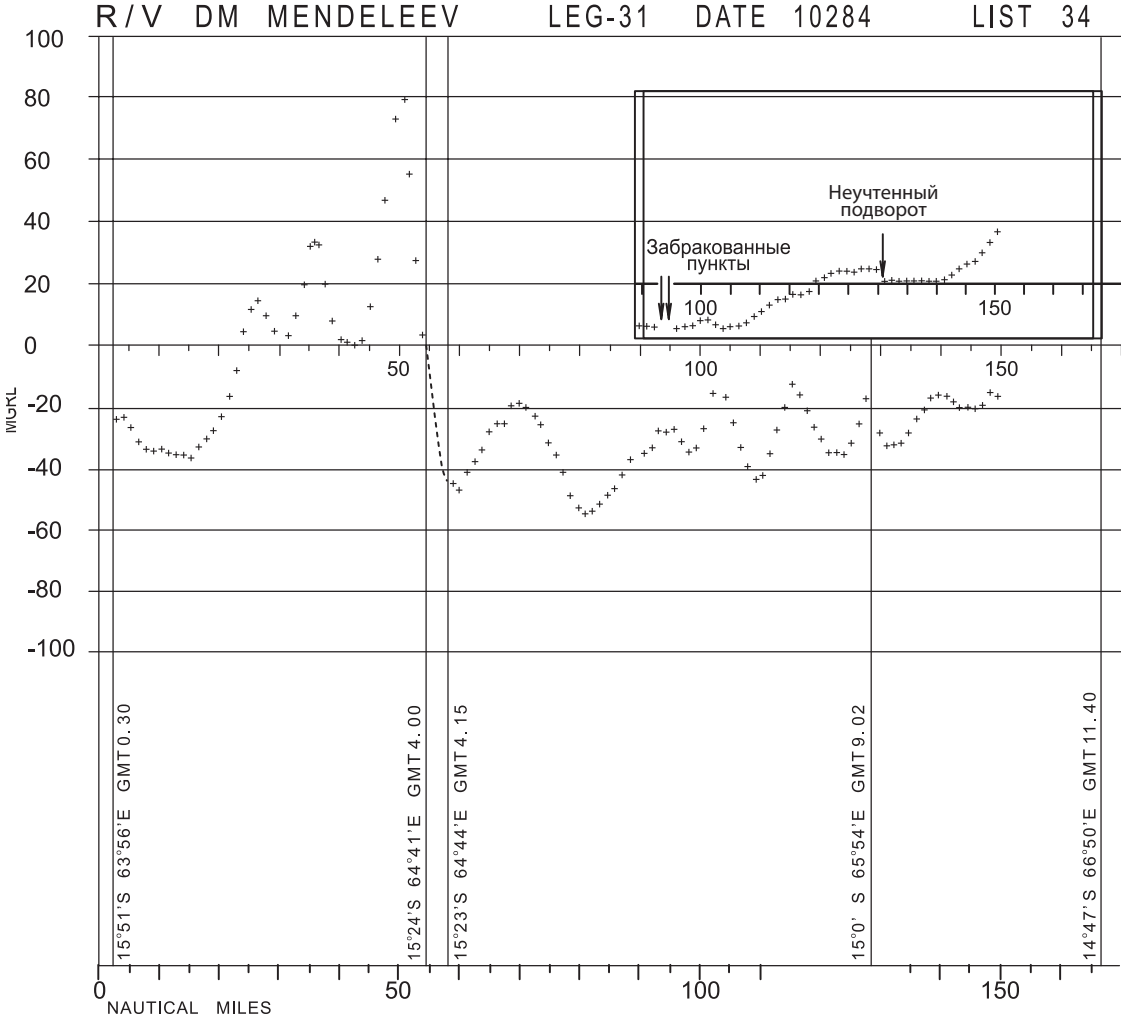


Рис. 10. Образец машинного графика

Погрешность наблюдений для одного приборопункта по внутренней сходимости составляет ±3.0 мГал.

1986 г., 37-й рейс НИС «Дм. Менделеев» (отряд № 29)

Перед рейсом электронная составляющая гравиметра АМГ претерпела существенную модернизацию. Создан комплекс АМГ-ИРК [Коренфельд, 1988], состоящий из вычислительного устройства АМГ-ВУМ, выполняющего также роль блока питания гравиметра, устройства сопряжения АМГ-УС и новых средств регистрации отсчета. АМГ-ВУМ выполнен на микросхемах, тогда как ранее электроника АМГ состояла из узлов с навесным монтажом. Отсчет высвечивается на световом десятичном табло. В качестве машинного носителя информации используется магнитная лента (устройство для подготовки данных на магнитной ленте УПДМЛ ЕС-9004) и перфолента (в качестве страховочного носителя). Предусмотрена также распечатка отсчетов на бумажном носителе. Устройство сопряжения имеет 4 канала и позволяет собирать данные с группы от одного до четырех гравиметров.

Запись на магнитную ленту открывает широкие возможности для применения способа весового осреднения. Получение очередного отсчета по гравиметру идет в два этапа. На первом образуется простое среднее из 30–60 соседних ординат (3–6 с наблюдений). На машинном носителе фиксируется непрерывный цуг простых средних отсчетов, из которых (второй этап) на ЭВМ получается весовое среднее для заданного оператором интервала. Предварительный расчет и последующий стендовый эксперимент показали, что эффективность сглаживания вертикальных ускорений по сравнению с простым осреднением уже при 20–30 весах весьма высока (колебания отсчета уменьшаются в 7–10 раз). В конкретных цифрах это означает, что для гравиметра с постоянной

времени 100 с при вертикальных ускорениях ±50 Гал и их периоде 6 с на 2–3-минутном интервале весового осреднения и продолжительности предварительного осреднения 1–3 с остаточные колебания составляют ±(0.2–0.4) мГал. Не останавливаясь на обосновании режимов предварительного и окончательного осреднения укажем, что первое из них составляет 3 с, второе – 300 с. На одну 300-метровую бобину магнитной ленты помещается 2-х суточный массив непрерывных наблюдений.

Погрешность наблюдений для одного приборопункта не превышает ±2.0 мГал.

1986-1987 гг., 38-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (отряд № 30)

Использовался комплект аппаратуры, аналогичный применявшемуся в предыдущем рейсе. Устранены некоторые недочеты в работе аппаратуры, что привело к заметному улучшению результатов наблюдений. Влияние горизонтальных ускорений составляло 0.05–0.1 мГал/Гал. Углы застоя уровней не превышает 2', изменения их среднего положения за 5-месячный период около ±1'. Погрешность одного приборопункта по внутренней сходимости лежит в пределах от ±1.4 до ±1.6 мГал. Общие потери в наблюдениях из массива в 9100 пунктов составили 0.1%.

Итоги рейса дают основания утверждать, что аппаратура АМГ была доведена до такого состояния, что способна обеспечить долговременные гравиметрические наблюдения в океане на крупнотоннажных судах с погрешностью менее 2 мГал при практически полной автоматизации наблюдений и первичной обработки.

1989 г., 12-й рейс НИС «Академик Борис Петров» (отряд № 31)

В 1984-1985 гг. флот Академии наук СССР пополнился судами среднего тоннажа «Академик Борис Петров» и «Академик Николай Страхов», построенных в Финляндии на верфях г. Холлминг. Имеют водоизмещение около 2700 т при длине по ватерлинии 70.5 м и наибольшей ширине 14.7 м. Автономность плавания 60 сут, максимальный ход 13.5 узла.

Использовалась аппаратура, состав которой аналогичен применявшемуся в 38-м рейсе НИС «Дмитрий Менделеев». Судно имеет общую сеть для сбора первичной геофизической информации. Гравиметрическая информация в число собираемых данных не входит, и обработка производилась по временной схеме на вспомогательной ЭВМ стандарта КАМАК, что тоже оказалось непростым делом по причине несовместимости форматов и оборудования.

Опыт работы в рейсе подтвердил ущербность технологии оперативной обработки по схеме "сбор первичного материала на машиночитаемом носителе – судовая ЭВМ общего назначения" на судах, вычислительные центры которых не приспособлены заранее к обработке гравиметрической информации и ее форматам. К этому времени начали появляться доступные широкому потребителю персональные ЭВМ. В распоряжении отряда имелась одна, по теперешним понятиям весьма примитивная, настольная машина типа ДВК-3М формата ЕС. В течение рейса впервые была разработана и опробована схема обработки первичной информации в реальном времени аппаратурой, входящей в состав комплекта АМГ.

Сигналы от группы гравиметров (от 1 до 4 приборов), представляющие собой средние отсчеты за 3 с, поступают непосредственно на ДВК-3М. Их обработка происходит в стандартной программе GWINM. По мере прохождения галса образуется таблица, содержащая осредненные отсчеты и их разности. Таблица обновляется после окончания наблюдений на очередном пункте. Она хранится в памяти машины и по желанию наблюдателя может выводится на дисплей. Кроме этого также в реальном времени может быть показан график изменения Δg_K по любому из приборов. Как таблица, так и график в любой момент наблюдений могут быть распечатаны на принтере. В качестве страховочной копии 3-секундные отсчеты фиксируются на магнитной ленте. Впоследствии технология обработки в реальном времени была модернизирована применительно к компьютерам формата АТ.

Одна из главных методических задач, стоявших перед отрядом, заключалась в оценке точности наблюдений в океане на судах такого типа при неблагоприятных погодных условиях. Район работ находился в пассатной зоне, характеризующейся постоянным крупным волнением. Ввиду небольшой длины судна особенно велики вертикальные ускорения. Горизонтальные ускорения измерялись акселерометрами, а при определении вертикальных ($\ddot{Z}$) использовался сигнал гравиметра, который наблюдался на

Таблица 2. Возмущающие ускорения (Гал) в 12-м рейсе НИС «Академик Борис Петров»

ось	В среднем за рейс, Гал		Максимальные, Гал	
	средний уровень	его колебания	средний уровень	его колебания
$\ddot{X}$	± 21.0	± 8.6	± 41.5	± 17.5
$\ddot{Y}$	29.8	9.6	56.6	20.4
$\ddot{Z}$	139	49.1	267	102

экране осциллографа и употреблялся для оценки общего фона возмущений. В табл. 2 приведена сводка уровня возмущений по осям как в среднем за рейс, так и в наихудших условиях, когда судно идет навстречу волне (столбцы 2 и 4), а также средние квадратические колебания уровня от галса к галсу (столбцы 3 и 5). Горизонтальные ускорения втрое, а вертикальные впятеро больше, чем это наблюдается на крупнотоннажных судах.

Тем не менее СКП одного приборопункта по внутренней сходимости составляет ±1.1 мГал. Эта оценка не может в полной мере характеризовать точность наблюдений, но свидетельствует, по крайней мере, о возможности работы в указанных условиях и об идентичности гравиметров и гиростабилизаторов. Другого способа оценки не применялось, поскольку конфигурация галсов не позволила провести сравнения по взаимным пересечениям.

1990 г., 10-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (отряд № 32)

По приглашению Института геологии РАН были проведены исследования гравитационного поля Восточного Средиземноморья в рамках международного проекта «Тетис». Эта акватория, несмотря на ее доступность, была изучена слабо. По данным Национального центра геофизических данных США там имелись единичные галсы 8 экспедиций, большинство которых было проведено в 1964–1966 гг., когда точность морских наблюдений оставляла желать лучшего. С использованием этих данных была построена карта аномалий Буге [Morelli, 1988], которая была единственным источником сведений о поле региона.

Отряд провел съемку на площади 53000 км^2 объемом 5150 пунктов. Съемка имеет вид сетки из взаимно пересекающихся галсов при среднем расстоянием между ними около 7 миль. Погрешность измерений по внутренней сходимости приборов составляла ±1.0 мГал, по 318 точкам пересечений галсов ±2.0 мГал. Навигационное обеспечение осуществлялось спутниковой системой «ТРАНЗИТ» при интервалах между соседними обсервациями 40–50 мин, доходящих иногда до 2 ч. Итогом наблюдений являются карты аномалий в свободном воздухе и Буге с сечением 5 мГал [Boyarsky et al., 1991; Тулин, Ильинский, 2007]. Для сравнения наших результатов с имеющейся информацией использовались данные аномалий в свободном воздухе, построенные по спутниковым данным [http://fopex.uscd.edu/marine-grav/mar_grav.html] и карта Морелли. Были построены «разностные» карты, показавшие, что в первом случае различия лежат в диапазоне от –10 до +10 мГал, доходя в одном случае до –30 мГал. Такой порядок сходимости надводных и «спутниковых» аномалий получен и другими авторами (см., например, [Железняк, Конешев, 1995]). Различия в аномалиях Буге лежат в пределах от –40 до +50 мГал, достигая кое-где –90 мГал. Оценка точности работ ПДМГЭ достаточно убедительна, и, по нашему мнению, их результатам следует отдать предпочтение.

Это был последний рейс ПДМГЭ. В «дикие девяностые» в стране не стало ни средств для проведения научно-исследовательских морских работ, ни интереса к ним. Редкие рейсы судов научного флота имели прикладной характер, выполняя конкретные задания. Чтобы выжить, НИС иногда превращались в круизные лайнеры или попросту в транспортные средства для перевозки «челноков» с товаром.

Уровень точности работ ПДМГЭ

Обратимся к вопросу о погрешности наблюдений аппаратурой ПДМГЭ. Ранее автором рассматривался вопрос об оценке точности мировой океанской съемки в принципе [Тулин, 1993]. Выводы анализа вкратце сводятся к тому, что систематическую часть погрешности было бы правильным оценивать по сходимости с работами других экспедиций, а случайную – по внутренней сходимости наблюдений в конкретном рейсе, т.е. по приборным разностям и по расхождениям повторных измерений в том же рейсе. Величины случайных ошибок работ ПДМГЭ приводились выше. Что касается систематических, то наиболее репрезентативным, на наш взгляд, является сравнение с результатами, приведенными в сводке LDGO. В банк его данных вошли результаты, полученные экспедициями 15 организаций разных стран в период 1960–1982 гг. Сводка включает сведения о 753 экспедициях, объем наблюдений которых составляет примерно 2.4 млн. пунктов. В этот массив входят также материалы 12 рейсов ПДМГЭ, полученные в 1968–1978 гг. Оговоримся, что под систематической погрешностью в данном случае понимается не разница между уровнем мировой опорной сети и уровнем измерений в том или ином рейсе, а разница между последним и общим уровнем морской съемки. Эта разница определялась по пересечениям с маршрутами других экспедиций.

Обобщенная сводка систематических уровней наблюдений приведена в табл. 3. В ней представлены широко известные в области наук о Земле организации разных стран:

Из 15 организаций банка LDGO оставлено 11, рейсы которых в сумме имеют более 1000 пересечений. Это, конечно условное, количество обеспечивает, на наш взгляд, статистическую значимость результатов последующих вычислений. Столбцы 2–4 табл. 3 демонстрируют, что объем привлеченного материала достаточно велик. В этой таблице ПДМГЭ помечена как IPE (*), поскольку в банке LDGO символ IPE присвоен еще четырем рейсам, два из которых вообще не имеют отношения к ИФЗ. Систематический уровень наблюдений близок к нулю и от организации к организации и по абсолютной

Таблица 3. Сводка систематических уровней наблюдений наиболее активных организаций мира

Организация	Систематическая разность по внешнему контролю				
	Количество			Среднее весовое,мГал	СКО**,мГал
	рейсов	пунктов	пересечений		
BGR	19	81126	1538	1.2	±3.7
BMR	6	58870	2353	0.3	2.6
CNEXO	34	61124	1501	2.0	3.7
HIG	48	198986	8492	1.3	11.8
IPE (*)	12	48727	2999	–1.8	2.0
LDGO	416	893869	38696	–0.4	4.2
NAVY	13	179202	1681	1.9	2.7
NOAA	38	344383	11587	0.1	8.8
OSU	24	65264	3168	0.6	3.4
SIO	34	70354	2501	1.7	3.4
WHOI	53	263268	5576	1.5	10.7

** В данном случае – средние квадратические отклонения.

величине колеблется в пределах от 0.1 до 2.0 мГал. Однако устойчивость этих цифр неоднородна. Колебания среднего уровня составляют от ±2 до ±12 мГал. По устойчивости систематического уровня (его колебания равны ±2.0 мГал) работы ПДМГЭ относятся к наилучшим. Напомним, что это не авторская, а независимая оценка.

Конкретные данные о точностях работ в 12 рейсах ПДМГЭ за 10-летний период наблюдений сведены в табл.4. Только в одном случае систематический уровень превышает 4 мГал (столбец 5).

Приведенные данные не охватывают интервала 1983–1990 гг. Однако, автор не видит причин, по которым оценка могла бы ухудшиться, особенно учитывая факт непрерывного совершенствования аппаратуры и методики наблюдений.

С середины 1970-х годов в нашей стране начали активно развиваться морские гравиметрические исследования. Многочисленные научные и производственные организации, включившиеся в этот процесс, работали сообразно своей технической оснащенности и уровню подготовки кадров. Создавались многочисленные макеты гравиметров, разрабатывались различные методики морских работ и береговой подготовки аппаратуры. Результаты наблюдений представлялись в произвольных форматах, зависящих от вкусов исследователей, что зачастую вело к трудностям при сравнивании материалов разных организаций. Возникла настоятельная необходимость в регламентации лабораторных исследований, морских наблюдений и их камеральной обработки. Силами сотрудников заинтересованных ведомств был создан документ, призванный устранить имеющийся разнобой — Инструкцию по морской гравиметрической съемке, известной как ИГ-78. Она стала обязательной для всех организаций страны, ведущих гравиметрические наблюдения. Сотрудники ПДМГЭ приняли активное участие в ее написании и редактировании. Формат каталога наблюдений был разработан в ИФЗ ранее и принят целиком в состав ИГ-78; формат вводных записей практически повторяет международный формат MGD77.

Таблица 4. Сводка систематических уровней наблюдений рейсов ПДМГЭ

Рейс	Год	Количество		Систематический уровень
		Пунктов	Пересечений	
1	2	3	4	5
VIT-43	1968	2240	83	-3.6
AKK-05	1969	6405	693	-3.2
DMM-03	1970	3639	381	-1.5
DMM-05	1971	5595	360	-4.0
DMM-06	1971	4112	181	1.2
VIT-51	1972	5204	223	-1.3
DMM-09	1973	4693	212	-3.1
DMM-10	1973	4295	158	-4.2
AKK-23	1976	942	114	-0.9
DMM-18	1977	4450	324	2.3
IVK-01	1978	7152	101	0.1
IVK-1B	1978		169	-1.2
Всего		48727	2999	
		Среднее весовое		-1.8

Таблица 5. Классы морской гравиметрической съемки, принятые в России

Вид (назначение) съемки	Класс	Погрешность не более, мГал	
		Систематическая	Случайная
Геологическая разведка; съемка континентального шельфа	I	0.5	1
Съемка континентального шельфа	II	1.0	2
Геофизические полигоны, съемка в центральном Арктическом бассейне	III	1.5	3
Региональная гравиметрическая съемка	IV	3.0	5
Съемка для решения планетарных геодезических и геофизических задач	V	4.0	10

В табл. 5 приведена выдержка из ИГ-78, касающаяся точностных характеристик съемок различного назначения (классов морской гравиметрической съемки). Наблюдения в открытом океане должны удовлетворять требованиям V класса. На эту точность изначально были ориентированы и наши работы. Фактически систематический уровень океанских работ ПДМГЭ соответствует IV классу, а при детальных исследованиях (Шпицберген, Кипр) – не хуже, чем II классу.

Планирование морских работ ПДМГЭ по плану Мировой гравиметрической съемки происходило по предложениям ИФЗ АН СССР, согласованным с междуведомственной комиссией, образованной при Главном управлении геодезии и картографии при СМ СССР. Наряду с авторской оценкой результаты работ ПДМГЭ (научно-технические отчеты и каталоги) рассматривались указанной комиссией, и все материалы были приняты для использования в программе МГС и рекомендованы для международного обмена.

Сводка плаваний ПДМГЭ

В период с 1967 по 1990 гг. в составе ПДМГЭ были организованы 32 полевых отряда и 25 отрядов берегового обеспечения. В числе подготовленных, но не вышедших в море по тем или иным форс-мажорным обстоятельствам значатся 3 отряда. Кроме того, еще 5 вели работы опытно-методического и прикладного характера. Остальные 24 отрядов разбиваются на две группы: в 18 из них наряду с плановыми наблюдениями исследовались новые инструментальные или методические разработки, а остальные 6 вели наблюдения с применением установившихся к моменту их проведения конфигурациями аппаратуры и методики. Рейсы судов АН СССР, как правило, были специализированными (биология, гидрофизика, гидрология и др.). Имея широкий выбор судов и акваторий плавания, мы стремились участвовать, по возможности, в рейсах геолого-геофизической направленности, каковых насчитывается 11. Отряды берегового обеспечения участвовали в подготовке аппаратуры к рейсу, включая предрейсовые лабораторные исследования, доставке и монтаже на судах и, если требовалось, в ее регулировке. По окончании рейса они участвовали в эвакуации аппаратуры и послерейсовых исследованиях.

В табл. 6 приведена сокращенная выдержка из ведомости работ ПДМГЭ, относящихся к упомянутым в статье 18 рейсам, а в табл. 7 – к остальным шести.

Таблицы дают представление об охвате акваторий рейсами экспедиции и объемах наблюдений, выполненных отрядами. Что касается персоналий, то следует отметить не упомянутых в таблицах 6 и 7, но внесших существенный вклад в работу ПДМГЭ В.Ф. Антонова, И.П. Башилова, Л.А. Жучкова, Н.А. Казлюка, К.В. Ковальчука, К.Я. Козьякову, С.В. Осинскую, Л.П. Полосатова. Еще около 15 человек эпизодически привлекались к несению вахт.

В течение всего времени работы ПДМГЭ, начиная с 1968 г. и до ее ликвидации в 1990 г., основной руководящий состав не менялся. Это – ее начальник В.А. Тулин, начальник отрядов и электронщик В.И. Коренфельд, начальник отрядов и мастер на все руки Т.К. Никифоров.

В заключение автор с признательностью отмечает неизменно благожелательное отношение к нуждам ПДМГЭ со стороны руководителей Института океанологии РАН ныне покойных А.С. Монина и А.А. Аксенова, благодаря которым экспедиция не испытывала серьезных организационных затруднений. Успеху работ в немалой степени способствовал профессионализм экипажей судов и их администрации, особенно капитанов дальнего плавания Э.А. Ребайнса и А.С. Свитайло.

Таблица 6. Сводка рейсов ПДМГЭ, в которых велись исследования новой аппаратуры

Год	Судно, рейс	Акватория работ, заходы в порты	Личный состав отряда	Приборы, пункты
1	2	3	4	5
1968	Вит-43	**Тихий океан**. Владивосток, Хакодате, Токио, Хило, Гонолулу, Папеете, Нукуалофа, Сува, Паго-Паго	Тулин В.А., Коренфельд В.И., Артемьев М.Е., Меднов Н.Е., Сапа В.Г., Фомин С.П.	ГАЛ-ОМПО 2240
1968	АК-3	**Атлантический океан**. Калининград, Варнемюнде, Абиджан, Джеймстаун, Гибралтар	Коган М.Г., Боярский Э.А., Камаев Ю.А., Алексеев А.А., Никифоров Т.К.	GSS-2, ГАЛ 400
1969	АК-5	**Атлантический океан.** Калининград, Мариго, Виллемстад, Порт-оф-Спейн, Рио-де-Жанейро, Гибралтар	Тулин В.А., Панасенко В.Н., Боярский Э.А., Черемисенов Г.В., Стожаров Н.Б., Светлаков Л.В.	АМГ 6405
1970	ДМ-3	Атлантический океан. Калининград, Лас-Пальмас, Дакар, Пуэнт-а-Питр (о. Гваделупа), Фор-де-Франс (о. Мартиника), Гибралтар, Калининград	Тулин В.А., Никифоров Т.К., Панасенко В.Н. – все ИФЗ, Третьяков А.В. – ТПИ, Стожаров Н.Б. – НИИГА, Ковальчук К.В. – ГУ МО СССР.	ГАЛ-ОМПО,АМГ 3639
1971	ДМ-6	**Тихий океан**. Владивосток, Сингапур, Маданг, с. Бонгу, Порт-Вила, Сидней, Лорд-Хау, Нумеа, Сува, Апиа, Токио	Тулин В.А., Никифоров Т.К., Сапрыкин Г.В., Горбунов Д.Н., Афанасьева Л.В., Хайт Б.С.	АМГ 4112
1973	ДМ-9	**Тихий океан**. Владивосток, Гонолулу – дважды, Мансанильо, Апиа, Сува, Порт-Вила, Токио	Тулин В.А., Панасенко В.Н., Черемисенов Г.В., Иванов А.И., Хайт Б.С.	АМГ 4693
1973	НК	**Атлантический океан.** Архангельск, Баренцбург, Тромсё, Архангельск	Тулин В.А., Панасенко В.Н., Попов С.А., Веревкин В.И..	АМГ ~2600
1973	ВА	**Атлантический океан**. Архангельск, Баренцбург, Тромсё, Архангельск	Боярский Э.А., Никифоров Т.К., Иванов А.И., Бусырев В.А.	АМГ ~1600
1976	АК-23	**Атлантический океан**. Калининград, Висмар, Харстад, Баренцбург, Акурейри, Рейкъявик, Гетеборг, Мурманск	Тулин В.А., Иванов А.И., Афанасьева Л.В., Войдецкий И.Е., Никифорова В.А.	АМГ 942
1977	ДМ-18	**Тихий океан**. Владивосток, Порт-Морсби, Кавиенг, Маданг, с. Бонгу, Лаэ, Брисбен, Нукуалофа, Сува, Сингапур, высадки на 12 островов	Тулин В.А., Магницкая Е.И., Коренфельд В.И., Боярский Э.А., Никифоров Т.К., Киреев К.Н.	АМГ 4450
1978-1979	ИК-2	**Атлантический океан.** Ленинград, Дакар, Ресифи, Антверпен	Тулин В.А., Никифоров Т.К., Кузиванов С.В., Киреев К.Н.	АМГ 3495
1980	ДМ-24	**Тихий океан**. Владивосток, Нукуалофа, Апиа, Сува, Сингапур	Тулин В.А., Коренфельд В.И., Коровкина Н.Г., Кутепов В.С.	АМГ 6389
1982	ДМ-28	**Тихий океан**. Находка, Сува, Сингапур, Находка	Тулин В.А., Кузиванов С.В., Никифоров Т.К., Иванов К.В.	АМГ 3945
1983-1984	ДМ-31	**Атлантический и Индийский океаны**. Калининград, Копенгаген, Монтевидео, Порт-Луи, Коломбо, Сингапур, Владивосток	Тулин В.А., Никифоров Т.К., Баранова С.М., Грушинский А.Н.	АМГ 15401
1986	ДМ-37	**Тихий океан**. Владивосток, Акапулько, Бальбоа, Сан-Франциско	Тулин В.А., Коренфельд В.И., Фомин С.П., Никифоров Т.К., Дюкарев С.К.	АМГ 14703
1986-1987	ДМ-38	**Тихий океан.** Владивосток, Кальяо, Пайта, Бальбоа, Акапулько, Энсенада, Сан-Франциско	Тулин В.А., Коренфельд В.И., Рукавишников Р.Б., Никифорова О.Д., Баранова С.М.	АМГ 5692
1989	АБП-12	**Атлантический океан, Средиземное море**. Калининград, Бриджтаун, Лас Пальмас, Лимасол, Севастополь	Тулин В.А., Юзвенко В.А.	АМГ 6624
1990	АНС-10	**Средиземное море.** Севастополь, Лимасол, Гамбург, Калининград	Тулин В.А., Никифорова О.Д., Боярский Э.А., Афанасьева Л.В., Ефремов А.А.	АМГ 5149

Таблица 7. Сводка работ ПДМГЭ в рядовых съемочных рейсах

Год	Судно, рейс.	Акватория работ. Порты заходов	Личный состав отряда	Приборы, пункты
1	2	3	4	5
1971	ДМ-5	**Атлантический и Тихий океаны.** Калининград, Кингстон, Гонолулу, Сува, Порт-Вила, Иокогама, Владивосток	Коренфельд В.И., Боярский Э.А., Румянцева Н.Д., Щеголькова Т.П. – все ИФЗ, Хайт Б.С. – НИИГА.	АМГ 5595
1972	Вит-51	**Тихий океан.** Владивосток, Брисбен, Лаэ, Фукуока, Науру	Строев П.А., Гладун В.А., Бобров Ю.В. – все ГАИШ, Доброхотов Ю.С., Дубовской В.Б. – оба ИФЗ.	GSS-2 5204
1973	ДМ-10	**Индийский океан.** Владивосток, Фримантл, Момбаса, Виктория, Мале, Коломбо, Сингапур	Коренфельд В.И., Авсюк Ю.Н., Магницкая Е.И., Светлосанова З.П. – все ИФЗ, Хайт Б.С. – НИИГА.	АМГ 4295
1978	ИК-1	**Атлантический океан.** Архангельск, Санта-Крус, Луанда, Рио-де-Жанейро, Лас-Пальмас, Амстердам, Ленинград	Коган М.Г., Рыльский И.И., Никифоров Т.К. – все ИФЗ.	АМГ 7152
1978	ДМ-21	**Тихий океан.** Владивосток, Токио, Гонолулу, Маданг, Лоренгау, Сингапур, Манила	Коренфельд В.И., Щеголькова Т.П., Фомин С.П., Зеленский Б.Г. – все ИФЗ.	АМГ 4889
1982 -1983	ДМ-30	**Тихий океан.** Владивосток, Сингапур, Веллингтон, Данидин, Монтевидео, Антверпен, Калининград	Коренфельд В.И., Никифоров Т.К., Синдюков А.Н., Фомин С.П. – все ИФЗ.	АМГ 4818

Руководство ПДМГЭ. Слева направо: В.А. Тулин, В.И. Коренфельд, Т.К. Никифоров

Заключение

Образование ПДМГЭ, предназначенной для выполнения работ по плану мировой гравиметрической съемки, преследовало две главные цели: разработку инструментально-методической части морской гравиметрии и получение результативного материала. Наряду с этим участие в работах обеспечивало Институту физики Земли прочную экспедиционную базу для натурных исследований разрабатываемой аппаратуры.

ИФЗ АН СССР стал пионером в области автоматизации морских гравиметрических наблюдений, разработав в начале 1960-х годов оригинальный аналого-цифровой преобразователь сигнала гравиметра. Поэтапная реализация идеи привела, в конце концов, к комплекту аппаратуры АМГ, дающей возможность получать график аномалии УСП в режиме реального времени. Разработаны компактные и недорогие гиростабилизаторы, обеспечившие высокую точность наблюдений, а также уникальное стендовое оборудование для их исследования.

Огромные объемы первичного материала требовали привлечения компьютерных технологий. Разработаны пакеты программ, нашедшие свое применение в работах не только ИФЗ, но и других организаций. В этой области ИФЗ РАН также оказался и пионером, и лидером. Внесен вклад в разработку нормативных документов, регламентирующих порядок проведения наблюдений и формат представления их результатов.

В период 1967–1990 гг. были организованы 32 полевых отряда, работавших практически во всех акваториях Мирового океана. Некоторые из отрядов решали опытно-методические или прикладные задачи. Показана возможность качественных океанских наблюдений на судах большого, среднего и малого тоннажа. В целом с работами пройдено более 480 000 км, наблюдения были проведены более, чем на 124 000 пунктов, что составляет около 5% мирового объема по состоянию на 1982 год. ИФЗ РАН, как организация академическая, не ставил перед собой задачи проведения производственной съемки, и основное количество сведений в интересах МГС приобретено в порядке обмена с зарубежными исследователями.

Помимо подразделений ИФЗ РАН работа ПДМГЭ шла в тесном взаимодействии со многими организациями. В плавания приглашались специалисты Министерств геологии, обороны, высшего образования, Главного управления геодезии и картографии. Автор приносит глубокую благодарность всем смежникам, участвовавшим в деятельности ПДМГЭ.

Литература

Антонов В.Ф., Осинская С.В., Попов Е.И., Тулин В.А. Двухсистемный автоматизированный морской гравиметр с одноканальной регистрацией // Морской автоматизированный гравиметр и его работа. ВИНИТИ, Деп. 985-69, 1969. С. 162-189.

Башилов И.П., Коновалов В.А., Тулин В.А. Вычислительное устройство для морского гравиметра с оптико-механическим преобразователем // Приборы для определения силы тяжести на море и их исследование. М.: Наука, 1966. С.79-97.

Боярский Э.А. Комлексная обработка морских профильных определений силы тяжести на ЭЦВМ «Минск-22» // Морской автоматизированный гравиметр и его работа. Вып. 2. М.: ИФЗ АН СССР. ВИНИТИ, Деп. № 2491-71. 1971. С. 128-245

Боярский Э.А. Автоматизированная обработка морских гравиметрических измерений на ЭЦВМ «Минск-22». М.: ВИНИТИ, Деп. № 1965-74. 1974.

Боярский Э.А., Афанасьева Л.В., Никифорова О.Д. Программы для обработки гравиметрических измерений. Материалы Мирового Центра Данных Б. М.:, 1983–1985 гг.,7 выпусков общим объемом 396 с.

Буланже Ю.Д. (ред.). Результаты исследований по эталонированию гравиметров. М.: Сов. радио, 1976. 75 с.

Веселов К.Е. О статическом способе измерений силы тяжести на море с помощью упругой системы вращательного типа // Прикл. геофизика. М.: Гостоптехиздат, 1956. Вып. 15. С. 91-102.

Веселов К.Е., Пантелеев В.Л. О влиянии возмущающих ускорений при измерении силы тяжести статическим гравиметром на море // Прикл. геофизика. М.: Гостоптехиздат, 1958. Вып. 20. С. 86-100.

Железняк Л.К., Конешев В.Н. Оценка погрешности данных спутниковой альтиметрии по сравнению с гравиметрическими материалами // Физика Земли, 1995. № 1. С.76-81.

Жучков Л.А., Кутепов В.С., Полосатов Л.П., Тулин В.А. Стенд для испытания морской гравиметрической аппаратуры // Изв. ВУЗ'ов. Сер. геодезия и аэросъемка. 1977. № 6. С.54-58.

Исследования по эталонированию гравиметров. М.: ИФЗ АН СССР, 1972. 137 с. (Деп. ВИНИТИ. № 5104-72).

Киреев К.Н., Кутепов В.С. Исследование жесткости корпуса морского гравиметра АМГ // Вопросы морской инструментальной гравиметрии. М.: ИФЗ АН СССР, 1975. С. 36-44. Деп. в ВИНИТИ, № 579-75.

Киреев К.Н., Кутепов В.С., Тулин В.А., Черемисенов Г.В. Демпфирование гиромаятникового стабилизатора для уменьшения ошибок гравиметра // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978,а. № 3. С. 92-95.

Киреев К.Н., Кутепов В.С., Пущина Л.В., Тулин В.А., Черемисенов Г.В. Стабилизация морского гравиметра / Под ред. Ю.Д. Буланже. М.: Наука, 1978,б. 79 с.

Козьякова К.Я., Щеголькова Т.П. Эталонирование морских автоматизированных гравиметров (АМГ) методом наклона // Результаты исследований по эталонированию гравиметров. М., 1976. С. 27-41.

Коренфельд В.И. Измерительно-регистрационный комплекс АМГ-ИРК // Аппаратура и методика океанских гравиметрических наблюдений. М., 1988. С. 42-54.

Кузиванов В.А. Определение силы тяжести гравиметром на море // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 5. С. 648-654.

Кузнецов О.А., Нейман В.Г. К истории экспедиционных исследований института океанологии им. П.П. Ширшова. М.: Науч. мир, 2005. 519 с.

Кутепов В.С. Стабилизатор морского гравиметра, построенный по принципу гиромаятника // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 1. С. 107-113.

Марков Г.С., Попов Е.И. Морские испытания гравиметров типа ГАЛ на надводных кораблях // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. № 11. С. 82-87.

Осинская С.В., Попов Е.И., Тулин В.А. Конструкция гравиметра с оптико-механическим преобразователем отсчета // Приборы для определения силы тяжести на море и их исследование / Под ред. Ю.Д. Буланже. М.: Наука, 1966. С. 71-78.

Осинская С.В., Тулин В.А. Гравиметр ГАЛ-ОМПО-2 // Морской автоматизированный гравиметр и его работа. ВИНИТИ, Деп.985-69, 1969. С.16-40.

Пантелеев В.Л., Исматходжаев С.К. К оценке точности гравиметрических наблюдений статическими гравиметрами, установленными на подвижном основании // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 8. С. 77-84.

Попов Е.И. Кварцевый гравиметр для морских наблюдений // Вопросы инструментальной гравиметрии. М., 1959,а. № 8. С. 32-41. (Тр. ИФЗ АН СССР; Вып. 175).

Попов Е.И. Морские измерения с гравиметрами ГАЛ // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959б. № 12. С. 1793-1798.

Попов Е.И., Марков Г.С. Пробные гравиметрические измерения на гиростабилизированном основании с надводных судов // Аппаратура и методы экспериментальных исследований по гравиметрии. М.: ИФЗ АН СССР, 1965. С. 3-22.

Попов Е.И., Суходольский В.В. Прибор РУГ для регистрации ускорений и наклонов // Аппаратура и методы измерения силы тяжести на море. М.: Наука, 1970. С.115-121.

Романюк В.А. Определение ускорения силы тяжести гравиметром, установленным на подвижном основании // Тр. ИФЗ АН СССР. 1961. №18. С.3-97.

Романюк В.А., Рукавишников Р.Б. Эталонирование гравиметров с горизонтальной крутильной нитью методом наклона. М.: Наука, 1966. 126 с.

Тулин В.А. Кварцевый гравиметр.: Авт. свид. № 168902 с приоритетом от 01.11.62, опубл. в Бюллетене изобретений № 5 26.02.1965,а.

Тулин В.А. Способ число-импульсного кодирования сигнала гравиметра // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965,б. № 12. С. 56-61.

Тулин В.А. Исследование гравиметра ГАЛ-ОЛМО-2 на стенде больших ускорений // Морской автоматизированный гравиметр и его работа. М.: ИФЗ АН СССР. 1969.

ВИНИТИ, Деп. № 985-69. С. 109-125.

Тулин В.А. Уровень точности мировой морской гравиметрической съемки // Морские гравиметрические исследования. М.: НГК РАН, 1993. С. 40-46.

Тулин В.А., Осинская С.В. Морской гравиметр с автоматизированным отсчетом // Аппаратура и методы измерения силы тяжести на

море. М.: Наука, 1970. С. 93-101.

Тулин В.А., Дюкарев С.К. Методика и программы оперативной обработки морских гравиметрических наблюдений // Аппаратура и методика океанских гравиметрических наблюдений. М., 1988. С. 22-41.

Тулин В.А., Кузиванов С.В. Экспериментальное изучение кросс-каплинг эффекта // Гравиметрические исследования на море. М.: Наука, 1988. С. 76-85.

Тулин В.А., Ильинский Д.А. Гравитационное поле к востоку, югу и западу от о. Кипр // Геофизика XXI столетия: 2006 г. Сб. трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского (2-4 марта 2006 г., Москва). М., 2007. С. 64-71.

Тулин В.А., Боярский Э.А. Начало надводных площадных гравиметрических наблюдений в России // Геофиз. исслед. М., 2007. Вып. 7. С. 3-11.

Универсальный испытательный стенд ИС-ВГУ с подвесными измерительными платформами для моделирования возмущающих ускорений, действующих на гравиметрическую и гиростабилизированную аппаратуру, установленную на движущемся основании. Гос. реестр научно-исследовательских работ. № 32591 от 17.10.1962.

Boyarsky E.A., Afanasjeva L.V., Illinsky D.A., Kandaurova N.A., Nikiforova O.D., Tulin V.A. Gravity field of high seismicity zone Southward of Cyprus // Proceeding of the First Regional Seminar on Earthquake Activity and Risk Assessment in the Mediterranian Region, Nov. 2-4, Cairo: 1991. P. 228-234.

Morelli C.(chairman of editorial board). Bouguer gravity anomalies (IBCM-G) // Published by the head department of navigation and oceanography of the USSR ministry of defence. Leningrad, 1988.

Watts A.B., Korner G.D., Wessel P., Hastings J. Global gravity data bank system. Techn. Rep. Lamont-Doherty geol. Observ. N.Y.: 1985. 85 p.

Сведения об авторе

ТУЛИН Владимир Александрович
доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли РАН
23995, ГСП-5, Москва, Д-242, Б. Грузинская, 10.
Телефон: (495) 254-45-59.
Факс: (499) 254-60-40

Permanent Marine Gravimetrical Expedition on the Vessels of the USSR Academy of Sciences (1967–1990)

Tulin V.A.

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

Abstract Long-term activity of Schmidt Institute of Physics of the Earth within the frameworks of the All-Union program for the world gravimetrical survey is described. Information on development of the pioneer for the USSR digital automatic instruments is given. Computational algorithms are briefly mentioned. The Permanent Marine Gravimetrical Expedition was carrying on marine survey using the research vessels of the USSR Academy of Sciences. The continuous marine profiles of 480 000 kilometers in length were measured during 23 years. According to an independent estimation, the survey accuracy was similar to the best world achievements.